

М. В. НЕМЦОВ, М.Л.НЕМЦОВА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНИКА

Оқулық

*«Білім беруді дамыту федералдық институты»
федералдық мемлекеттік мекемесімен
техникалық мамандықтар бойынша
«Электротехника және электроника» пәні бойынша
орта кәсіптік білім беру бағдарламасын іске асыратын
білім беру мекемелерінде оқу процесінде
пайдалануға арналған оқулық ретінде ұсынылған*

«БДФИ» ФММ 2010 жылғы 12 наурыздағы рецензияның тіркеу нөмірі 044

8басылым, стереотиптік



Мәскеу
«Академия» баспа орталығы
2015

ӘОЖ 621.3(075.32)
КБЖ 31.2я723
Н507

Бұл кітап Қазақстан Республикасының Білім және ғылым министрлігі және «Кәсіпқор» холдингі» КЕАҚ арасында жасалған шартқа сәйкес ««ТЖКБ жүйесі үшін шетел әдебиетін сатып алуды және аударуды ұйымдастыру жөніндегі қызметтер» мемлекеттік тапсырмасын орындау аясында қазақ тіліне аударылды.

Аталған кітаптың орыс тіліндегі нұсқасы Ресей Федерациясының білім беру үдерісіне қойылатын талаптардың ескерілуімен жасалды.

Қазақстан Республикасының техникалық және кәсіптік білім беру жүйесіндегі білім беру ұйымдарының осы жағдайды ескеруі және оқу үдерісінде мазмұнды бөлімді (технология, материалдар және қажетті ақпарат) қолдануы қажет.

Аударманы «Delta Consulting Group» ЖШС жүзеге асырды, заңды мекенжайы:

Астана қ., Иманов көш., 19,

«Алма-Ата» БО, 809С, телефоны: 8 (7172) 78 79 29, эл. поштасы: info@dcg.kz

Пікір берушілер:

Мәскеу қ. П.А. Овчинников атындағы №13 ОКБ МББМ Политехникалық колледжінің оқытушысы *Г. И. Никольская*;

Мәскеу теміржол көлігі колледжінің оқытушысы *А. Е. Бояринов*

Немцов М.В.

Н507 Электротехника және электроника : орта кәсіптік білім беру мекемелерінің студенттеріне арналған оқулық / М.В.Немцов, М.Л.Немцова— 8-ші басылым, стер. — М. : «Академия» баспа орталығы, 2015. — 480 б.

ISBN 978-601-333-234-5 (каз.)

ISBN 978-5-4468-2336-9 (рус.)

Оқулық «Электротехника және электроника» жалпы кәсіптік пәні, техникалық бағыттағы барлық мамандықтар үшін орта кәсіптік білім берудің Федералдық мемлекеттік білім беру стандарттарына сәйкес құрылған.

Оқулықта электр тізбектері, өнеркәсіптік электроника, электрлік өлшеулер теорияларының негізгі ережелері қарастырылған. Синусоидалық және тұрақты тоқты электр машиналарының, автоматика мен басқару аппараттарының, жартылай өткізгіш аспаптардың, электрондық күшейткіштердің, генераторлардың, түзеткіштер мен стабилизаторлардың, сондай-ақ сандық құрылғылар мен өлшеу аспаптарының құрылыстары мен жұмыс қасиеттерінің сипаттамалары берілген. Электр жетегі туралы мәліметтер келтірілген, электрлік қауіпсіздік негіздері баяндалған.

Орта кәсіптік білім беру мекемелерінің студенттеріне арналған.

ӘОЖ 621.3(075.32)

КБЖ 31.2я723

© Немцов М.В., Немцова М.Л., 2007

© Немцов М.В., Немцова М.Л., 2014, өзгерістер енгізілген

© «Академия» білім-баспа орталығы, 2014

© Ресімдеу. «Академия» баспа орталығы, 2014

ISBN 978-601-333-234-5 (каз.)

ISBN 978-5-4468-2336-9 (рус.)

Осы оқулық техникалық бағыттағы барлық мамандықтар бойынша оқу-әдістемелік кешеннің бір бөлігі болып табылады.

Оқулық «Электротехника және электроника» жалпы кәсіптік пәнін оқып зерттеуге арналған.

Жаңа буындағы оқу-әдістемелік жинақтар жалпы білім беретін және жалпы кәсіптік пәндер мен кәсіптік модульдердің оқып зерттелуін қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін, дәстүрлі және инновациялық оқу материалдарын қамтиды. Әрбір жинақ жұмыс берушінің талаптары ескерілген жалпы және кәсіптік құзіреттерді меңгеруге қажетті оқулықтар мен оқу құралдарынан, оқыту және басқару құралдарынан тұрады.

Оқу басылымдары электрондық білім беру ресурстарымен толықтырылады. Электрондық ресурстар интерактивті жаттығулар мен жаттықтырғыштары бар теориялық және практикалық модульдерді, мультимедиялық объектілерді, Интернеттегі қосымша материалдар мен және ресурстарға берілген сілтемелерді қамтиды. Оларда оқу процесінің негізгі параметрлері: жұмыс уақыты, бақылау және практикалық тапсырмаларын орындау нәтижесі тіркелетін терминологиялық сөздіктер мен электрондық журналдар қамтылған. Электрондық ресурстар оқу процесіне оңай енгізіліп, әртүрлі оқу бағдарламаларына бейімделе алады.

«Электротехника және электроника» пәні бойынша оқу-әдістемелік жинақ «Электротехника және электроника» электрондық білім беру ресурсын қамтиды.

Оқулық техникалық мамандықтар бойынша мамандарды даярлауды жүзеге асыратын орта кәсіптік білім беру мекемелерінде «Электротехника және электроника» пәнін оқитын студенттерге арналған. Оның мазмұны аталған пәннің үлгілік бағдарламасына сәйкес келеді.

Тақырыптарды өту реті мен оларды толықтыру дәрежесі мамандыққа, орта кәсіптік білім беретін әртүрлі мекемелердің материалы және жұмыс бағдарламаларын жеткізудің қабылданған әдістемесіне байланысты өзгеріп тұруы мүмкін.

«Электротехника және электроника» пәні студенттердің жалпы кәсіптік даярлығы үшін және технологиялық процестерді автоматтандырумен, сәйкес салаларды электрмен жабдықтаумен және электрмен қамтамасыз етумен байланысты келесі кезектегі арнайы пәндерді оқу мақсатында теориялық базаны қалыптастыру үшін қызмет етеді.

Оқулық материалы сәйкес стандарттардың талаптарына қатаң сәйкестікте электр тізбектері мен электротехникалық құрылғылардағы процестерді сипаттаудың заманауи математикалық әдістерін қолдана отырып жазылған.

ЭЛЕКТР ӨРІСІ

1.1. ЭЛЕКТР ӨРІСІНІҢ НЕГІЗГІ ҚАСИЕТТЕРІ МЕН СИПАТТАМАЛАРЫ

Электр өрісі (статикалық) — қозғалмайтын, зарядтары уақыт бойынша өзгермейтін, электрлік зарядталған өріс.

Электр өрісі зарядталған денелердің өзара күштік әрекеттесуі ретінде анықталады. Бұл ретте зарядтар оң және теріс зарядтар болып бөлінеді. Бірдей таңбадағы зарядтар бір-бірінен тебілсе, әртүрлі таңбадағы зарядтар тартылады.

Электр өрісінің қасиеттерін сипаттау негізінде тәжірибе жүзінде дәлелденген Кулон заңы жатыр.

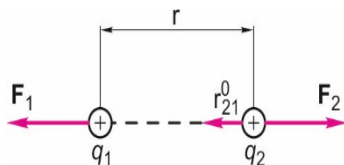
Кулон заңы. *Зарядтардың көбейтіндісіне пропорционалды, олардың арақашықтығының квадратына кері пропорционалды және бір зарядтан екінші зарядқа дейін түзу сызық бойымен бағытталған күш тыныштықтағы нүктелік зарядтар арасында әрекет етеді* (1.1-сурет):

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} r_{21}^0 = -F_2 \quad (1.1)$$

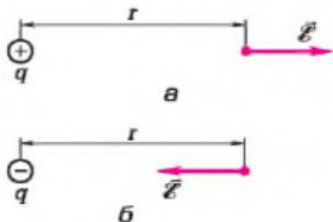
мұндағы F_1 — q_1 зарядына әсер ететін күш; r — q_1 және q_2 зарядтары арасындағы арақашықтық; F_2 — q_2 зарядына әсер ететін күш; r_{21}^0 — бірінші зарядтан екінші зарядқа қарай бағытталған бірлік векторы; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — *электр тұрақтысы*.

Нүктелік зарядтар деп мөлшері олардың арақашықтығымен салыстырғанда өте кішкентай болатын зарядталған денелерді есептейміз.

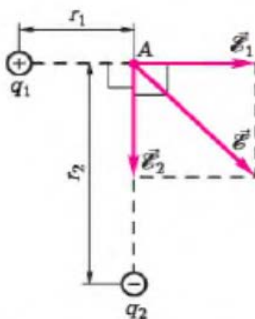
Халықаралық бірліктер жүйесіндегі (ХБЖ) күштің негізгі өлшем бірлігі – Ньютон (Н); заряд — кулон (Кл): 1 Кл = 1 А • с; ұзындықтар — метр (м) деп алынады.



1.1-сурет



1.2-сурет



1.3-сурет

Кернеулік, электр потенциалы және потенциалдар айырымы немесе кернеу электр өрісін сипаттайтын негізгі шамалар болып табылады.

Электр өрісінің кернеулігі деп өрістің қарастырылып отырған нүктесіне енгізілетін q_0 сынама оң нүктелік зарядқа әсер ететін $\vec{F}$ күшінің заряд мәніне қатынасына тең күш қарқындылығы өлшемін айтамыз:

$$\vec{\xi} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (1.2)$$

$\vec{F}$ күш секілді $\vec{\xi}$ электр өрісінің кернеулігі – векторлық шама, яғни әсер ету мәні мен бағыты арқылы сипатталады.

СИ-дегі электр өрісінің негізгі өлшем бірлігі – вольттың метрге қатынасы (В/м).

(1.1)-формуладан, r қашықтықтағы q нүктелік зарядының электр өрісінің кернеулігі дегеніміз

$$\xi = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{|q|}{4\pi r^2} \quad (1.3)$$

екендігі және заряд оң болған жағдайда зарядтың кернеулігі анықталатын орналасу нүктесінен (1.2-сурет, а) бастап, ал теріс болған жағдайда қарама-қарсы бағытта (1.2-сурет, б) бағытталғандығын анықтаймыз.

Егер электр өрісін тудыратын зарядтар бірнеше болса, онда өрістің кез-келген нүктесіндегі кернеулік, олардың әрқайсысынан жеке-жеке алынатын кернеуліктерінің қосындысына тең болады.

1.1-мысал. $q_1 = 1,11 \cdot 10^{-10}$ Кл және $q_2 = -4,44 \cdot 10^{-10}$ Кл нүктелік зарядтарынан $r_1 = 1$ м және $r_2 = 2$ м қашықтықта орналасқан A нүктесіндегі электр өрісінің кернеулігінің әсер ету мәні мен бағытын анықтау (1.3-сурет).

Шешімі. (1.3) формула бойынша A нүктесіндегі q_1 және q_2 нүктелік зарядтары әсерінен алынатын электр өрісінің кернеулігін анықтаймыз:

$$\xi_1 = \frac{1,11 \cdot 10^{-10}}{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 1^2} \approx 1 \text{ В/м}$$

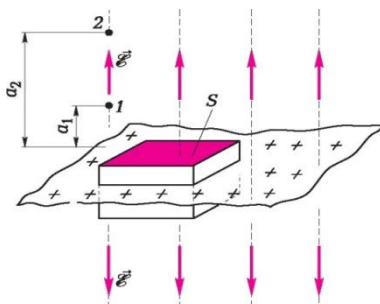
$$\xi_2 = \frac{4,44 \cdot 10^{-10}}{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 2^2} \approx 1 \text{ В/м}$$

$\vec{\xi}_1$ және $\vec{\xi}_2$ кернеулік векторларының бағыты, сынама оң нүктелік зарядты A нүктесіне орналастырған жағдайдағы бағытымен сәйкес келеді.

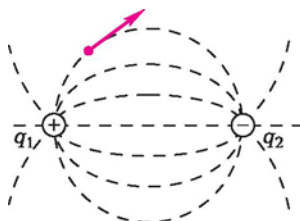
A нүктесіндегі қорытынды электр өрісінің $\vec{\xi}$ кернеулігі, катеталары $\vec{\xi}_1$ және $\vec{\xi}_2$ кернеулік векторлары болып табылатын, тікбұрышты үшбұрыштың гипотенузасы бойымен бағытталған және оның мәні:

$$\xi = \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2} = \sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2} \text{ В/м}$$

$\vec{\xi}$ векторының өрісі туралы айтуға және осы өрісті *вектор сызықтарымен* – *күштік сызықтармен* бейнелеуге болады. Егер электр өрісінің кернеулігі барлық нүктелерде бірдей болса, онда өріс *біртекті*, мысалы шексіз өлшемді біртекті зарядталған жазық пластинаның өрісі (1.4-сурет), ал егер әртүрлі болса, онда өріс *біртектісіз* болады, мысалы екі нүктелік зарядтардың өрісі (1.5-сурет).



1.4-сурет



1.5-сурет

q заряды ұзындығы l еркін учаскенің бойымен электр өрісінде орын ауыстырған кезінде $\mathbf{F}$ өрісі күші әсерінен

$$A = \int_l \mathbf{F} d\mathbf{l} = q \int_l \vec{\xi} d\mathbf{l} \quad (1.4)$$

жұмыс атқарылады. Бұл ретте еркін тұйықталған контур бойымен зарядтың тасымалдау бойынша жұмыс нөлге тең. Шыныменде, өрістің барлық қасиеттері зарядтардың салыстырмалы орналасуына қатысты анықталатындықтан, зарядты тұйықталған контур бойынша тасымалдау және бастапқы нүктеге қайтару, зарядтардың бастапқы үлестірілуін және энергия запасын білдіреді. Бұл сонымен бірге, (1.4)-ті ескерсек, кернеулік векторының айналуы нөлге тең екендігін білдіреді:

$$\oint \vec{\xi} d\mathbf{l} = 0 \quad (1.5)$$

(1.5) шарты электр өрісін әрбір нүктеде оның координаттарының функциясымен – электр потенциалымен сипаттауға мүмкіндік береді.

Электр өрісінің берілген нүктесіндегі *электр потенциалы*

$$\mathbf{V} = \int_l \vec{\xi} d\mathbf{l} \quad (1.6)$$

(1.4)-ті ескерсек, бірлік оң зарядты берілген нүктеден, потенциалы нөлге тең деп алынған нүктеге тасымалдау кезінде электр өрісінің күштері атқаратын жұмысқа саны жағынан тең.

Электр өрісінің 1-ші және 2-ші нүктенің *потенциалдар айырымы*, немесе 1-ші және 2-ші нүктелер арасындағы *кернеулік*

$$V_1 - V_2 = U_{12} \quad (1.7)$$

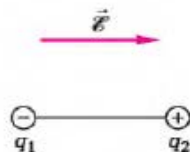
бірлік оң зарядты 1-ші нүктеден 2-ші нүктеге тасымалдаған кезде электр өрісі күштері атқара алатын жұмысқа сан жағынан тең.

Электр потенциалының СИ-дегі өлшем бірлігі — *вольт* (В).

1.2. ЭЛЕКТР ӨРІСІНІҢ ӨТКІЗГІШТЕР МЕН ДИЭЛЕКТРИКТЕРГЕ ӘСЕРІ

Өткізгіштер деп емін еркін қозғала алатын зарядтардан (*еркін зарядтардан*) тұратын заттарды айтады. Мұндай заттарға, мысалы, бос электрондардан тұратын металлдар (2.1-кестені қараңыз) және оң және теріс зарядталған бос иондардан тұратын электролиттер жатады.

Диэлектриктер деп бос зарядтары жоқ заттарды атайды. Алайда, өздерінің электрлі бейтарап молекулалары ішінде, олар өзара байланысқан оң және теріс зарядтардан тұрады. Мұндай заттарға, мысалы, эбонит, гетинакс, асбестті цемент және т.б. жатады. (1.1-кестені қараңыз).



1.6-сурет

Өткізгіштер мен диэлектриктер бар болған кезде, өткізгіштер мен диэлектриктер жоқ болып, ал олардың электр өрісіне әсері, осы заттарда электр өрісі әсерінен орын ауыстырған және өз кезегінде электр өрісін тудыратын қосымша зарядтардың пайда болуына әкелетін кездегідей, сол вакуумда электр өрісі бар болады.

Бос зарядтар өткізгіштерде статикалық электр өрісі әсерінен, өткізгіштердің жоғарғы бетіне орналаса отырып, еркін қозғалады. Статикалық электр өрісі өткізгіштерде бола алмайды, себебі керісінше жағдайда бос зарядтардың орын ауыстыруы болатын еді.

Электр өрісі әсерінен диэлектриктерде, байланысқан зарядтардың молекулалары ішінде серпімді ығысу — *поляризация* жүреді (1.6-сурет, оң зарядтар — өріс бағытының бойымен, теріс зарядтар — кері бағытта).

Гаусс заңы. *S* тұйықталған бетімен шектелген көлем ішіне алынған барлық бос және байланысқан зарядтардың қосындысы, осы бет арқылы өтетін электр өрісінің кернеулік векторы ағынына пропорционалды

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{\sum q_{\text{бос}} + \sum q_{\text{байл}}}{\epsilon_0} = \frac{\sum q_{\text{бос}}}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (1.8)$$

мұндағы ϵ_r — диэлектриктердің салыстырмалы диэлектрлік өткізгіштігі (өлшемсіз шама). Вакуум үшін $\epsilon_r = 1$.

ϵ_r салыстырмалы диэлектрлік өткізгіштігін ϵ_0 электрлік тұрақтылығына көбейту абсолютті диэлектрлік өткізгіштік деп аталады:

$$\epsilon_a = \epsilon_r \epsilon_0$$

1.2-мысал. Заряд тығыздығы $\delta = 10^{-10} \text{ Кл/м}^2$ болатын біркелкі зарядталған пластинаның біртекті электр өрісінің кернеулігін және өрістің күш сызығы бойымен зарядталған пластинадан $a_1 = 1$ м мен $a_2 = 3,5$ м аралықта орналасқан 1 және 2 нүктелер арасындағы потенциалдар айырымын анықтау (1.4-суретті қараңыз).

Шешімі. Гаусс теоремасы (1.8) бойынша, қырларының ауданы *S* болатын, текше беті арқылы өтетін электр өрісінің кернеулік

векторының ағыны

$$\xi \cdot 2S = \delta S / \varepsilon_0$$

тең, осыдан

$$\xi = \frac{\delta}{2\varepsilon_0} = \frac{10^{-10}}{2 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}} \approx 5,5 \text{ В/м}$$

(1.6) және (1.7) формулалар бойынша 1 және 2-нүктелер арасындағы потенциалдар айырымы:

$$V_1 - V_2 = \xi(a_2 - a_1) = 5,5(3,5 - 1) = 13,75 \text{ В}$$

1.3. ЭЛЕКТР СЫЙЫМДЫЛЫҒЫ, КОНДЕНСАТОРЛАР МЕН СЫЙЫМДЫЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕРІ

Конденсатор деп зарядтарды жинақтайтын құрылғыны атайды.

1.7, а суретінде әрқайсысының ауданы S -ке тең, бір-бірінен d арақашықтықта вакуумда орналасқан екі параллелді қоршауға ие, қарапайым жазық конденсатор бейнеленген. Егер конденсатордың жоғарғы және төменгі қоршауларының арасына $u_{ab} > 0^*$ кернеуді салса, онда конденсатордың жоғарғы және төменгі қоршауларында бірдей оң және теріс бос зарядтар $\pm q_\delta = \pm q$ жиналады.

Конденсаторда жинақталған q заряд, салынған кернеуге пропорционал $u_{ab} = u_C$:

$$q = C u_{ab} = C u_C \quad (1.9)$$

мұндағы C пропорционалдық коэффициенті конденсатордың *электрлік сыйымдылығы* (сыйымдылығы) деп аталады.

Сыйымдылықтың СИ-дегі өлшем бірлігі — *фарад* (Ф): $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В} = 1 \text{ А} \cdot \text{с/В}$.

Жазық конденсатордың қоршаулары арасындағы электр өрісі

$$\xi = u_{ab} / d = q / \varepsilon_0 S \quad (1.10)$$

кернеулігіне ие, (егер шектік әсерін ескермесек) біртекті болады (1.2-мысалды қараңыз).

* Бұл жерде және бұдан әрі уақытқа тәуелді электрлік шамаларды *лездік мән* деп атаймыз және кіші әріптермен белгілейміз: u кернеу, i ток, e ЭҚК және т.с.с.

(1.9) бен (1.10) қатынастарын салыстыра отырып, жазық вакуумдық конденсатор сыйымдылығы үшін

$$C = \varepsilon_0 S / d$$

өрнегін аламыз.

Жазық конденсатордың сыйымдылығын арттыру үшін оның қоршауларының арасындағы кеңістікті диэлектрикпен толтырады (1.7-мысал, б).

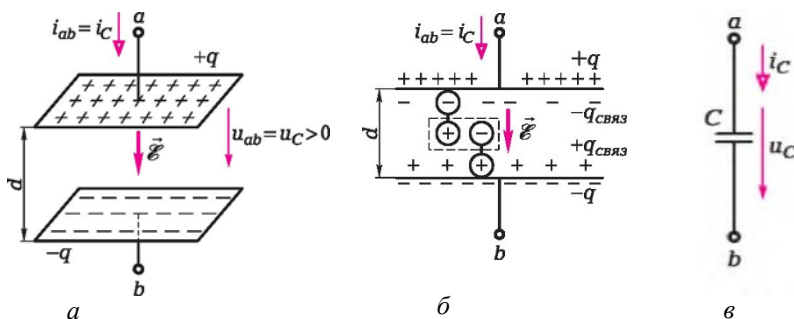
Электр өрісінің әсерінен кеңістікте бейберекет бағытталған диэлектриктердің дипольді молекулалары бағдарланудың басым бағытын иеленеді. Бұл ретте, біртекті диэлектрик ішіндегі дипольді молекулалардың оң және теріс зарядтары бір-бірінің орынын толтырады (1.7, б суретінде штрих сызықтармен белгіленген), ал жазық конденсатордың қоршауларының шекарасында $q_{\text{байл}}$ байланысқан зарядтардың орыны толтырылмаған қабаттары қалып қалады. Оң (теріс) зарядталған қоршау шекарасында теріс (оң) байланысқан зарядтардың қабаты орналасады. Байланысқан зарядтар бар болған кезде конденсатор ішіндегі электр өрісінің кернеулігі

$$\xi = u_{ab} / d = (q - q_{\text{байл}}) / \varepsilon_0 S \quad (1.10)$$

Осыдан шығатыны, электр өрісінің сондай кернеулігінде, демек $u_{ab} = u_C$ кернеулерінде, q заряды көбірек болуы қажет. Сондықтан (1.8) бен (1.9) шығатындай, жазық конденсатордың сыйымдылығы осындай вакуумдық конденсатордың сыйымдылығымен салыстырғанда артады:

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 S / d \quad (1.11)$$

Кейбір диэлектриктердің параметрлерінің мәндері 1.1-кестеде; конденсаторлардың шартты графикалық белгілері 1.2-кестеде;



1.7-сурет

1.1-кесте. Диэлектрлік өткізгіштік (салыстырмалы), электрлік беріктілік және кейбір материалдардың меншікті көлемдік кедергісі

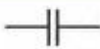
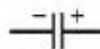
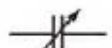
Зат	ε_r	ξ_{II} , МВ/м*	ρ_v , Ом м
Трансформатор майы	2,1 – 2,4	15 – 20	$10^{12} - 10^{13}$
Совол	4,8 – 5,0	14 – 18	$10^{11} - 10^{13}$
Вазелин	2,2 – 2,6	20 – 25	$5 \cdot 10^{12} - 10^{13}$
Полиэтилен	2,2 – 2,4	35 – 60	$10^{13} - 10^{15}$
Лавсан	3,0 – 3,5	80 – 120	$10^{14} - 10^{16}$
Поливинилхлориді (пластикаттар)	6,0 – 8,0	6 – 15	$10^{10} - 10^{12}$
Парафин	2,0 – 2,2	22 – 32	$10^{14} - 10^{16}$
Эбонит	3,0 – 3,5	15 – 20	$10^{12} - 10^{14}$
Гетинакс	6 – 8	20 – 40	$10^9 - 10^{11}$
Слюда (мусковит)	6,5 – 7,2	98 – 175	$10^{12} - 10^{13}$
Мрамор	8 – 9	1 – 4	$10^7 - 10^8$
Шифер	6 – 8	0,5 – 1,5	$10^6 - 10^7$
Асбестті цемент	6 - 8	2 - 3	$10^6 - 10^7$

* Барлық материалдардың электрлік беріктігі синусоидалді кернеудің қолданыстағы мәндері үшін көрсетілген (4.4-бөлімшені қараңыз).

түрлі диэлектриктер негізіндегі конденсаторлардың кейбір типтерінің сипаттамалары 1.3-кестеде келтірілген.

Құрамында, мысалға алюминийдің жұқа оксидті пленкасы қолданылатын электролиттік конденсаторлар ең үлкен сыйымдылыққа (15 000 мкФ дейін) ие. Оксидті пленка электр өрісінің кернеулігінің тек бір бағытында ғана диэлектрик болып табылады. Осы себепті электролиттік конденсаторлар, салыстырмалы түрде аз салынған кернеуде (5—450 В) тек бір полярлықта ғана жарамды.

1.2-кесте. Конденсаторлардың шартты графикалық белгілері

Конденсатор атауы	Шартты белгісі
Тұрақты сыйымдылықты	
Электролиттік	
Айнымалы сыйымдылықты	
Сызықтық емес өздігінен реттелетін, мысалы Π параметріне	

1.3-кесте. Конденсаторлардың кейбір типтерінің сипаттамалары

Конденсатор типі	Сыйымдылығы, мкФ	Максималды жұмыс кернеуі, В	Максималды температурасы, °С	Оқшаулау кедергісі, МОм
Слюдалық	$10^{-6} - 10^{-1}$	50	150	10^5
Қағаз	$5 \cdot 10^{-4} - 50$	10^6	125	10^2
Полистиролдық	$5 \cdot 10^{-5} - 10$	10^3	85	10^4
Керамикалық	$10^{-6} - 2,2$	$6 \cdot 10^3$	125	10^3
Шыны	$10^{-5} - 0,15$	$6 \cdot 10^3$	125	10^5

Электр өрісі электрлі-техникалық құралдардың кернеу астында тұрған түрлі бөлшектері арасында бар болатындықтан, олардың арасында электрлік сыйымдылық бар.

Сызықтық сыйымдылық элементі заряд мәні кернеуге пропорционал болатын, электр-техникалық құрылғылардың кез-келген бөлігінің алмастыру схемасының құраушысы болып табылады. Оның параметрі ретінде $C = \text{const}$ сыйымдылығы қолданылады.

Егер зарядтың кернеуге тәуелділігі сызықтық емес болса, онда алмастыру схемасы, $q(u_C)$ сызықтық емес *кулон-вольттық сипаттамамен* берілетін *сызықтық емес сыйымдылық элементінен* тұрады. Оның сыйымдылығы оған салынған $C(u_C) = q(u_C) / u_C$ кернеуінің мәніне тәуелді болады.

1.8-ші суретте сызықтық (a сызығы) мен сызықтық емес (b сызығы) сыйымдылық элементтерінің кулон-вольттық сипаттамалары, және де олардың алмастыру схемасындағы шартты белгілері келтірілген.

Егер сыйымдылық элементіне салынған кернеу өзгертін (артатын немесе азаятын) болса, онда зарядта өзгереді, яғни сыйымдылық элементінде ток бар. Сыйымдылық элементінде токтың оң бағытын оған салынған кернеудің оң бағытымен сәйкес келетіндей етіп таңдап аламыз (1.7, в суретін қараңыз). Анықтамасы бойынша, ток зарядтың өзгеру жылдамдығына тең:

$$i_{ab} = i_C = dq / dt \quad (1.12)$$

(1.9)-ды ескере отырып, сызықтық сыйымдылық элементінде ток

$$i_C = C du_C / dt \quad (1.13)$$

тең. Егер t_1 уақытында сыйымдылық элементіндегі кернеу нөлден u_{C1} -ге дейін өзгертін болса, онда элементтің электр өрісінде

$$W_{эл} = \int_0^{t_1} i_C u_C dt$$

немесе (1.12)-ні ескерсек

$$W_{эл} = \int_0^{q_1} u_C dq = \int_0^{u_{C1}} u_C C(u_C) du_C \quad (1.14)$$

энергиясы жиналады, мұндағы q_1 — $u_C = u_{C1}$ кернеуі кезіндегі еркін зарядтың мәні.

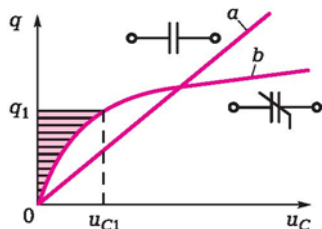
Сыйымдылық элементінің u_C ((1.14) формуласын қараңыз) кернеуі кезіндегі электр өрісінің энергиясы, кулон-вольттық сипаттама мен ординаттар осы арасында бекітілген (u_{C1} кернеуі кезінде сызықтық емес сыйымдылық элементінің электр өрісінің энергиясына пропорционал штрихтелген аудан бейнеленген 1.8 суретті қараңыз), сәйкес ауданға пропорционал.

(1.14)-тен алынған u_C кернеуі кезіндегі сызықтық сыйымдылық элементінің электр өрісінің энергиясы (1.9) ескерсек

$$W_{эл} = Cu_C^2 / 2 = qu_C / 2 \quad (1.15)$$

тең.

Сыйымдылық элементтерін энергия аккумуляторлары ретінде қарастыруға болады.



1.8-сурет

1.4. КОНДЕНСАТОРЛАРДЫ ЖАЛҒАУ ӘДІСТЕРІ

Конденсаторларды параллель және тізбектей жалғауға болады.

Параллель жалғау кезінде (1.9-сурет) барлық конденсаторлар бір U кернеу астында болады, ал олар энергия көзінен алатын заряд жеке конденсаторлардың зарядтарының қосындысына тең:

$$q = \sum_{k=1}^n q_k$$

мұндағы n — конденсаторлар саны; k — конденсатордың реттік нөмірі.

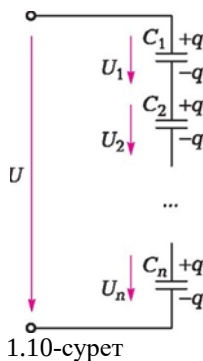
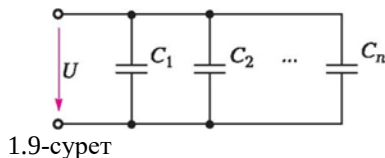
Демек, параллель жалғанған конденсаторлардың ортақ сыйымдылығы (1.9) бойынша жеке конденсаторлардың сыйымдылығының қосындысына тең:

$$C = \frac{\sum_{k=1}^n q_k}{U} = \sum_{k=1}^n C_k$$

Конденсаторларды *тізбектей* жалғау кезінде (1.10-сурет) жалпы кернеу жеке конденсаторлардағы кернеу қосындысына тең:

$$U = \sum_{k=1}^n U_k$$

мұндағы n — конденсаторлар саны; k — конденсатордың реттік нөмірі.



Алайда энергия көздерінен зарядты тек екі шеткі конденсаторлардың сыртқы электродтары ғана алады. Өзге қос-қостан электрлік жалғанған электродтарда өзара тең оң зарядтың бір электродқа және теріс зарядтың екінші электродқа ауысуынан зарядтар туындайды. Осылайша, конденсаторларды тізбекті жалғаған кезде олардың зарядтары тең болады. Конденсатор заряды оның сыйымдылығының оған салынған кернеуге көбейтіндісіне тең болғандықтан

$$q = U_1 C_1 = U_2 C_2 = \dots = U_n C_n,$$

онда конденсаторлардағы кернеу

$$U_1 = \frac{q}{C_1}; U_2 = \frac{q}{C_2}; \dots U_n = \frac{q}{C_n}$$

тең, ал тізбектей жалғанған конденсаторлардың жалпы сыйымдылығы

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q}{U_1 + U_2 + \dots + U_n} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}$$

Егер әрқайсысының сыйымдылығы C_0 болатын n бірдей конденсаторлар тізбектей жалғанған болса, онда олардың жалпы сыйымдылығы мынаған тең болады:

$$C = \frac{C_0}{n}$$

1.5. КОНДЕНСАТОРДЫ Ң ЗАРЯДТАЛУЫ ЖӘНЕ РАЗРЯДТАЛУЫ

Конденсатор энергиясын кенеттен көтерілу арқылы өзгерту үшін шексіз қуат көзі керек

$$P = \frac{\Delta W_{эл}}{\Delta t} \Big|_{\Delta t \rightarrow 0} = \infty$$

ал бұл мүмкін емес. Сондықтан да, конденсатордың зарядталуы және зарядының бітіп қалуы кезінде оның энергиясы, демек ондағы u_C кернеуі кенеттен көтерілу арқылы өзгере алмайды. Бұл шарт *коммутация заңы* деп аталады және келесі түрде жазылады

$$u_C(t) = u_C(t_+), \quad (1.16)$$

мұндағы t және t_+ — t уақыт моментінің алдындағы және конденсатордың зарядталуы мен зарядының бітіп қалуы басталатын t уақытынан кейінгі уақыт моменті.

Конденсаторды зарядтау. Конденсатордың $E = U$ тұрақты кернеу көзінен (2.7-бөлімшені қараңыз) R кедергісіне ие резистор (2.4-бөлімшені қараңыз) арқылы K кілтінің $t = 0$ уақыт моментінде тұйықталу кезінде зарядталу процесін қарастырайық (1.11-сурет, а).

Тұрақты кернеу көзінің кернеуі резистор мен конденсатордағы кернеулер қосындысына тең

$$U = u_R + u_C,$$

немесе (2.1) және (1.13) ескерсек

$$U = RC \frac{du_C}{dt} + u_C \quad (1.17)$$

(1.17)-гі айнымалыларды жіктейік

$$\frac{dt}{RC} = \frac{du_C}{U - u_C} \quad (1.18)$$

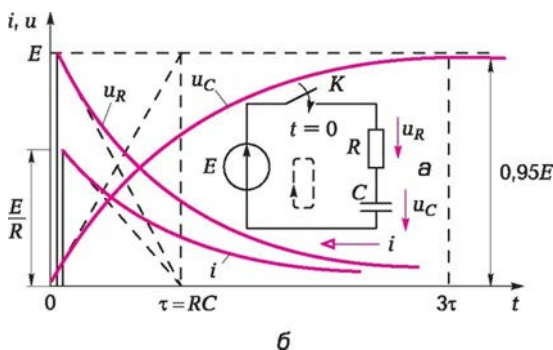
және (1.18)-ді интегралдайық

$$\frac{1}{RC} t = \ln(U - u_C) + \ln A \quad (1.19)$$

мұндағы интегралдаудың белгісіз тұрақтысы $\ln A$ түрінде жазылған.

(1.19) теңдеуінің екі жағын да (-1) -ге көбейтіп және логарифмдер айырымын жеке логарифммен алмастырғаннан кейін, потенциалдағаннан соң алатынымыз:

$$e^{-\frac{1}{RC}t} = \frac{U - u_C}{A}$$



1.11-сурет

немесе

$$u_C = U - Ae^{-\frac{1}{RC}t} \quad (1.20)$$

(1.20)-дан A тұрақтысын анықтау үшін (1.16) сыйымдылық элементіне арналған коммутация заңына жүгінейік. Кілттің тұйықталуына дейін, яғни $t=0_-$ уақыт моментінде де сыйымдылық элементі зарядталмаған болсын деп алайық. Сондықтан да

$$u_C(0_-) = 0 = u_C(0_+) = E - A,$$

бұдан

$$A = E.$$

A тұрақтысының мәнін (1.20)-ға қойып, зарядталу кезіндегі сыйымдылық элементіндегі кернеуді табамыз (1.11-сурет, б):

$$u_C = E(1 - e^{-t/\tau}), \quad (1.21)$$

мұндағы $\tau = RC$ уақыт өлшемділігіне ие ($\text{Ом} \cdot \text{Ф} = \text{Ом} \cdot \text{А} \cdot \text{с/V} = \text{с}$) және тізбектің уақыт тұрақтысы деп аталады. Ол өту процесінің жылдамдығын анықтайды.

(1.21) сыйымдылық элементіндегі кернеу резистордағы заряд тогы мен кернеуінің уақытқа тәуелділігін анықтайды (1.11, б суретті қараңыз):

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{R} e^{-t/\tau}; u_R = Ri = E e^{-t/\tau}$$

Кілт тұйықталғаннан кейін $t = 0_+$ бастапқы мезетте тізбектегі ток кенеттен $i(0_-)$ нөлден $i(0_+) = E/R$ -ге дейін артады. Тізбекте аз R кедергі кезінде токтың айтарлықтай кенеттен көтерілуі байқалуы мүмкін.

Зарядталу процесін, 3τ уақыт интервалынан кейін тіптен аяқталды деп санауға болады, ол мысалға уақыт релесінде – белгілі бір уақыт өткеннен кейін іске қосылатын құрылғыларда қолданылатын, жеткілікті ұзақ болуы мүмкін.

Конденсатордың разрядталуы. Зарядталған сыйымдылық элементінің электр өрісінде (1.15) энергия жинақталуы мүмкін, оның есебінен сыйымдылық элементінің өзі қандайда бір уақыт аралығында энергия көзі бола алады. $u_C = E$ кернеуіне дейін алдын ала зарядталған сыйымдылық элементін R кедергісіне ие резистивті элементке (1.12-сурет, а) қосқаннан кейін, тізбектегі ток сыйымдылық элементінің q зарядының өзгерісімен шартталады (1.13):

$$i = -\frac{dq}{dt} = -C \frac{du_C}{dt} = \frac{u_R}{R} = \frac{u_C}{R} \quad (1.22)$$

мұндағы «минус» таңбасы i тогы — бұл, суретте штрих сызықтармен белгіленген, сыйымдылық элементінде кернеуге қарай бағытталған тізбек контурындағы заряд біту тогы

(1.22)-гі айнымалыларды бөліп

$$-\frac{dt}{RC} = \frac{du_C}{u_C} \quad (1.23)$$

(1.23)-гі интегралдайық

$$-\frac{1}{RC} t = \ln u_C - \ln A \quad (1.24)$$

мұндағы интегралдаудың белгісіз тұрақтысы $(-\ln A)$ түрінде жазылған. (1.24)-гі потенциалдағаннан кейін алатынымыз:

$$u_C = A e^{-t/(RC)}. \quad (1.25)$$

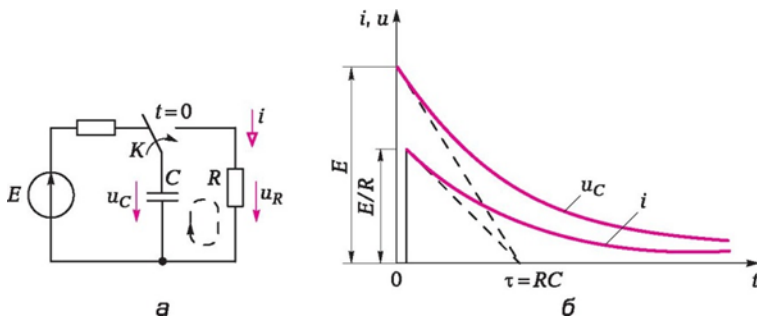
(1.25)-гі A тұрақтысын анықтау үшін (1.16) сыйымдылық элементіне арналған коммутация заңына жүгінейік. Коммутацияға дейін, яғни $t = 0_-$ уақыт моментінде де сыйымдылық элементі ток көзі кернеуіне дейін зарядталған болғандықтан, онда

$$u_C(0_-) = E = u_C(0_+) = A.$$

A тұрақтысының мәнін (1.25)-ке қойып, сыйымдылық элементінің зарядының бітуі кезіндегі кернеуінің өзгерісінің тәуелділігін аламыз (1.12-сурет, б):

$$u_C = E e^{-t/\tau} \quad (1.26)$$

мұндағы $\tau = RC$ — тізбектің уақыт тұрақтысы.



1.12-сурет

Разрядталу тогын (1.22) бойынша табамыз:

$$i = -C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{R} e^{-t/\tau}$$

Разрядталу тогы алдымен $i(0_-)=0$ нөлден $i(0_+)=E/R$ -ге дейін кенеттен артып, кейін экспоненциалды кемиді (1.12, б суретін қараңыз).

Тізбектегі токтың аз мәнідерінде және ЭҚК үлкен мәндерінде 1.12, а суретіндегі конденсатор заряды, импульсті көздерде үлкен токпен разрядталуы кезінде қолдануға болатын, өте көп энергияны жинақтауға мүмкіндік береді.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Электр потенциалы мен электр потенциалының айырымына анықтама беріңіз.
2. Сызықтық және сызықтық емес сыйымдылық элементеріне анықтама беріңіз
3. Қандай заттар өткізгіштер деп аталады және олардың жақсы электр өткізгіштігі немен түсіндіріледі? Өткізгіштерге мысал келтіріңіз.
4. Қандай заттар диэлектриктер деп аталады және олардың нашар электр өткізгіштігі немен түсіндіріледі? Диэлектриктерге мысал келтіріңіз.
5. Неліктен электролиттік конденсаторлар оның қоршаулары арасына салынған кернеудің тек бір ғана полярлығында қолданылады?

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. $q=1$ Кл зарядқа ие, сыйымдылығы $C=1$ Ф конденсатор $t=0$ уақыт моментінде $R=1$ Ом кедергісіне ие резистор арқылы заряды таусыла бастайды (1.12 суретті қараңыз). $t=0,5$ с уақыт моментіндегі резистордағы токты анықтаңыз.
Жауабы: 0,6085 А
2. 1.1-ші есеп шарттарын сақтай отырып, $t=0,5$ с уақыт моментіндегі конденсатор энергиясын анықтаңыз.
Жауабы: 0,183 Дж
3. 1.1-ші есеп шарттарын сақтай отырып, $t=0,5$ с уақыт

моментінде резисторда энергияның қанша мөлшері жылу түрінде бөлінетінін анықтаңыз.

Жауабы: 0,317 Дж

4. Жазық конденсатор (1.7, а суретті қараңыз) әрқайсысының ауданы 20 см^2 құрайтын, $\epsilon_r = 2,1$ салыстырмалы диэлектрлік өткізгіштігіне ие, қалыңдығы 0,05 мм парафин қабатымен бөлінген екі фольга қағазынан тұрады. Конденсатор сыйымдылығын анықтаңыз.

Жауабы: 0,745 нФ.

5. Параллель жалғанған екі конденсатордың жалпы сыйымдылығын анықтаңыз, әрқайсысының сыйымдылығы 1 мкФ (1.9-суретті қараңыз).

Жауабы: 2 мкФ.

6. Тізбектей жалғанған екі конденсатордың жалпы сыйымдылығын анықтаңыз, әрқайсысының сыйымдылығы 2 мкФ (1.10-суретті қараңыз).

Жауабы: 1 мкФ.

2.1. ЖАЛПЫ МАҒЛҰМАТТАР

Электр құбылыстарын және олардың тәжірибелік қолданыстарын жүйелі түрде зерттеу тарихи тұрғыдан уақыт өте өзгермейтін токтың қасиеттерін зерттеуден басталды. Бұған тұрақты токтың электр энергиясы көздерінің – алдымен гальвани элементтерінің (А. Вольта, 1745—1827), кейіннен аккумуляторлардың пайда болуы мен қол жетімділігі, сондай-ақ электрді жарықтандыруға (П.Н.Яблочков, 1847—1894), электролиз бен гальванопластикаға (Б.С.Якоби, 1801 — 1874) қолданудағы алғашқы сәтті тәжірибелері ықпал етті.

А.М. Ампер (1775—1836), Г.С. Ом (1787—1854), Ш.О. Кулон (1736—1806) және басқа да физиктер жүргізген тұрақты токтың қасиеттерін тәжірибелік зерттеу жұмыстары, бірқатар заңдылықтар мен түсініктерді анықтауға және негіздеуге мүмкіндік берді. М.Фарадей (1791 —1867), Э.Х. Ленц (1804—1865), Д. Генри (1797—1878), Э.В. Сименс (1816— 1892), Д. Джоуль (1818—1889), В. Вебер (1804—1891), Д.К. Максвелл (1831 —1879), Г.Р. Герц (1857—1894) және басқа ғалымдар орындаған ары қарайғы зерттеу жұмыстары, тұрақты ток тізбектерін талдау кезінде анықталған көптеген заңдылықтар электротехниканың іргелі заңдары болып табылатындығын көрсетті.

Электротехникалық құрылғылар — бұл электр энергиясын өндірудің, үлестірудің, бақылаудың, түрлендірудің және қолданудың кешенді мәселелерін шешу кезінде белгілі бір функцияны атқаруға арналған өндірістік бұйым.

Тұрақты токтың электротехникалық құрылғылары әртүрлі, мысалы аккумулятор, энергия жеткізу желісі, амперметр, реостат. Тұрақты ток алюминийді электрохимиялық әдіспен алу кезінде, қалалық және теміржол электр көліктерінде, электроникада, медицинада және ғылым мен техниканың өзге салаларында қолданылады.

2.2. ТҰРАҚТЫ ТОҚТАҒЫ ЭЛЕКТР ТІЗБЕГІНІҢ ЭЛЕМЕНТТЕРІ

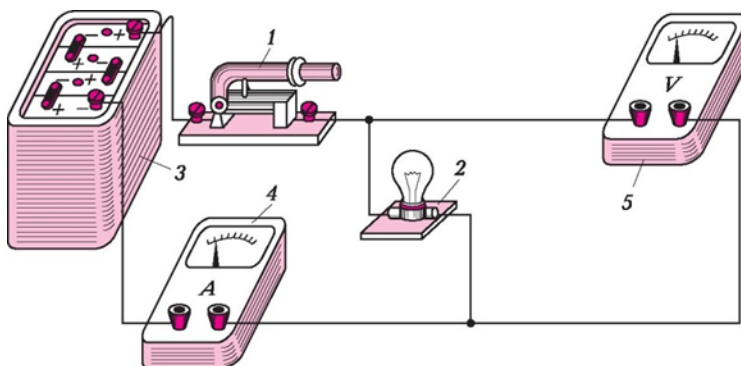
Электр тізбегі, немесе тұрақты ток тізбегі, жалпы жағдайда электр энергиясының көздерінен, электр энергиясын қабылдағыштардан, өлшеу аспаптарынан, автоматика мен басқару аппараттарынан, байланыс желілері мен сымдарынан тұрады.

Электр энергиясы көздерінде энергияның басқа түрлерінің электр энергиясына түрлендірілуі жүреді, мысалы гальваника элементтері мен аккумуляторлардағы химиялық процестер энергиясы, термопара негізіндегі термдік түрлендіргіштердегі жылу энергиясы.

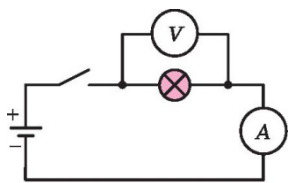
Электр энергиясын қабылдағыштарда электр энергиясы, мысалы механикалық (тұрақты ток қозғалтқыштары), жылу (электрлік пештер), химиялық (электролиздік ванналар) энергиясына түрленеді.

Электрлік автоматика мен басқару аппараттары, байланыстыру желілері мен өлшеуіш аспаптар энергия көздерінен электр энергиясын жіберу, оны қабылдағыштардың арасында тарату және барлық электротехника құрылғыларының жұмыс режимін бақылау үшін қызмет етеді.

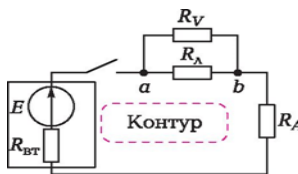
Электр тізбегінің графикалық бейнесі *схема* деп аталады. Тізбекті бейнелеудің бірнеше тәсілдерін ажыратады. 2.1-суретте мысал ретінде электротехникалық құрылғылар мен тұрақты токтың қарапайым тізбегінде, оларды жалғау әдістерінің үлгілік бейнесі



2.1-сурет



2.2-сурет



2.3-сурет

келтірілген. Ажыратқыш 1 тұйықталған кезде қызу шамына 2 – электр энергиясын қабылдағышқа – тұрақты токтың электр энергиясының көзі –аккумуляторлы батареясы 3 қосылады. Энергия қабылдағышының жұмыс режимін қадағалау үшін амперметр 4 мен вольтметр жалғанады. Электрлік техникалық құрылғылардың және олардың жалғануының шынайы суреті өте үлкен және көп еңбекті қажет ететін схемаларға әкеледі. Егер әрбір электротехникалық құрылғыны (MEMST бойынша) оның шартты белгісімен алмастыратын болсақ, тізбек суретін қарапайымдауға болады (2.2-сурет). Тізбектердің мұндай графикалық бейнеленуін *принциптік схемалар* деп атайды. Принциптік схема, электротехникалық құрылғылардың тағайындалымын және олардың әсерлесуін көрсетеді, бірақ тізбек жұмыс режимін есептеу кезінде қолайсыз болмақ. Есептеу жүргізу үшін әрбір электротехникалық құрылғыны оның алмастыру схемасымен көрсету қажет.

Электр тізбегінің *алмастыру схемасы* тізбектегі процесті берілген жуықтаумен сипаттауға болатындай таңдап алынған, түрлі идеалдандырылған элементтердің жиынтығынан тұрады.

Тізбектің алмастыру схемасының конфигурациясы тармақ, түйін, контур секілді геометриялық (топологиялық) түсініктермен анықталады.

Схема *тармағы*, әрқайсысы екі шықпаға (басы мен соңы) ие, бір немесе бірнеше тізбектеп жалғанған элементтерден тұрады, және де әрбір алдыңғы элементтің соңына келесі элементтің басы жалғанады.

Схема *түйінінде* үш немесе одан да көп тармақтар жалғанады.

Контур — бірде бір тармақ тап және түйін де бір реттен көп кездеспейтіндей етіп, бірнеше тармақтардан өтетін тұйықталған жол.

2.1-суретте көрсетілген тізбектің алмастыру схемасы (2.3-сурет) үш тармақтан тұрады, және де екеуінің әрқайсысы бір элементтен, ал үшіншісі үш элементтен тұрады. Суретте элементтердің параметрлері көрсетілген: $R_{ш}$ — шам тізбегінің кедергісі; R_V —

вольтметр тізбегінің кедергісі; R_A — амперметр тізбегінің кедергісі; E — аккумулятор ЭҚК мен $R_{\text{к}}$ — оның ішкі кедергісі. Үш тармақ a және b екі түйінінде жалғанған.

Егер тізбектің алмастыру схемасының барлық элементтерінің параметрлерінің мәні белгілі болса, оның барлық элементтерінің жұмыс режимін есептеп шығуға, яғни бүкіл электротехникалық құрылғылардың электрлік күйін анықтауға болады.

Бұдан әрі *электр тізбегінің алмастыру схемасы* терминінің орнына – *тізбек схемасы* немесе *схема* қысқартуын қолданатын боламыз.

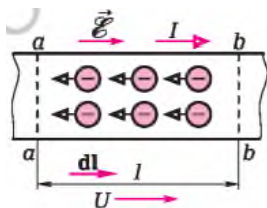
2.3.

ТОКТАР МЕН КЕРНЕУЛЕРДІҢ ОҢ БАҒЫТТАРЫ

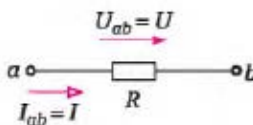
Электр өткізгіштігінің электрондық теориясына сәйкес, металдардағы валентті электрондар оң иондар болатын, атомдарынан оңай ажырайды. Иондар қатты денеде кеңістіктік периодтылыққа ие кристаллдық тор түзеді. Еркін электрондар атомдарға соқтығыса отырып, олардың арасында тор кеңістігінде бейберекет қозғалады.

l ұзындықты өткізгіште электр энергиясы тудыратын $\vec{\xi}$ кернеулікті көлденең электр өрісінің әсерінен, еркін электрондар қосымша жылдамдыққа ие болып, өткізгіш бойымен бір бағытта қосымша орын ауыстырады (2.4-сурет).

Өткізгіш ортадағы *тұрақты ток*, жалпы жағдайда электр өрісінің әсерінен оң және теріс зарядтардың реттелген қозғалысын білдіреді. Мысалы, электролиттерде және газдарда оң және теріс зарядты иондар бір-біріне қарай қозғалады. Оң және теріс зарядтардың бағыттары қарама-қарсы болғандықтан, қандай зарядтардың қозғалысын ток бағыты деп есептейтінімізді нақтылап алу қажет. Оң зарядтардың қозғалыс бағытын, яғни электр өрісінің



2.4-сурет



2.5-сурет

әсерінен өткізгіштегі электрондардың қозғалыс бағытына кері бағытты I тогының бағыты деп есептеу қабылданған. Бұл бағыт бағыттауыш сызығымен көрсетілген (2.4-суретті қараңыз).

Тұрақты токты

$$I = |q| / t$$

формуласы бойынша анықтайды, мұндағы t — қарастырылып отырған тізбек бөлігінің көлденең қимасы арқылы $|q|$ қосынды зарядының біркелкі орын ауыстыруының уақыты.

Токтың СИ-дегі негізгі өлшем бірлігі — *ампер* (А): 1 А = 1 Кл/с.

Тізбектегі ток мәні амперметр құралымен өлшенеді, оны тізбектей, яғни тізбек ажыратылуына қосады.

Тізбекті есептеу кезінде оның элементтеріндегі токтардың нақты бағыты жалпы жағдайда алдын ала белгісіз. Сондықтан да, шартты оңдарды, немесе, қысқаша айтқанда оңдарды - тізбектің барлық элементтеріндегі токтардың бағытын алдын ала таңдап алу қажет.

R кедергісіне ие элементтегі (2.5-сурет) немесе тармақтағы *токтың оң бағыты* дербес таңдап алынады және бағыттауыш сызығымен көрсетіледі. Егер токтың таңдап алынған оң бағыттарында, тізбектің жұмыс режимін есептеу нәтижесінде берілген элементтегі ток мәні оң болса, онда токтың нақты бағыты таңдап алынған оң бағытпен сәйкес келеді. Кері жағдайда, нақты бағыты таңдап алынған оң бағытқа қарама-қарсы.

Тізбек схемасының элементіндегі *кернеудің оң бағыты да* (2.5-сурет) дербес таңдап алынады және бағыттауыш сызығымен көрсетіледі, алайда энергия көздері жоқ тізбек бөліктері үшін, оны 2.5-суреттегідей токтың оң бағытымен сәйкестендіріп таңдауға кеңес беріледі.

Егер элемент шықпалары белгіленген болса, мысалы a мен b деп (2.5-суретті қараңыз) және бағыттауыш сызық a шықпасынан b шықпасына қарай бағытталған болса, онда оң бағыты

$$U = U_{ab} = V_a - V_b$$

кернеуінің анықталатындығын білдіреді.

Осындай белгілеуді ток үшін де қабылдауға болады. Мысалы, I_{ab} белгісі a шықпасынан b шықпасына қарай тізбек элементіндегі немесе схемасындағы токтың оң бағытын көрсетеді.

Өткізгіштердегі еркін электрондардың кристалдық торлар атомдарымен соқтығысуы олардың ілгерілемелі қозғалысын тежейді. Бұл еркін электрондардың бағытталған қозғалысына, яғни тұрақты токқа қарсы әсер, өткізгіштің *электрлік кедергісінің* физикалық түпнегізін құрайды. Электролиттердегі және газдардағы тұрақты токқа кедергі келтірудің механизмі ұқсас.

R кедергісіне ие тізбек бөлігіндегі (2.5-суретті қараңыз) токтың кернеуге тәуелділігі *Ом заңы* деп аталады

$$U_{ab} = RI_{ab} \text{ немесе } U = RI \quad (2.1)$$

қатынасымен анықталады.

Кедергіге кері *жартылай өткізгіштік* деп аталады:

$$G = 1/R \quad (2.2)$$

Кедергінің СИ-дегі негізгі өлшем бірлігі — *ом* (Ом), өткізгіштікі — *сименс* (См).

Материалдың өткізгіштік қасиеті, қыры 1м текшенің қарама-қарсы жақтары арасындағы кедергіге тең ρ_V *көлемдік меншікті кедергісін* анықтайды.

Көлемдік меншікті кедергісіне кері шама көлемдік меншікті өткізгіштік деп аталады

$$\gamma_V = 1/\rho_V \quad (2.3)$$

Көлемдік меншікті кедергісінің өлшем бірлігі— 1 Ом • м, көлемдік меншікті өткізгіштікі — 1 См/м.

Өткізгіштің кедергісі оның ұзындығына, көлденең қимасының ауданына және өткізгіш жасалынған материалына тәуелді.

Бұл тәуелділік

$$R = \rho_V l / S, \quad (2.4)$$

формуласымен өрнектеледі, мұндағы R — өткізгіш кедергісі, Ом; ρ_V — меншікті кедергі, Ом • мм²/м; l — өткізгіш ұзындығы, м; S — өткізгіштің көлденең қимасының ауданы, мм².

Өткізгіштің тұрақты токқа кедергісі температураға тәуелді. Аз аралықта (шамамен 200 °С) температураның өзгерісі кезіндегі бұл тәуелділікті

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)] \quad (2.5)$$

формуласымен өрнектеуге болады, мұндағы R_1 мен R_2 — θ_1 , θ_2 температуралары кезіндегі кедергілер; α — температура 1°C -қа өзгерген кезде кедергінің салыстырмалы өзгерісіне тең температуралық кедергі коэффициенті.

2.1-кестеде кейбір өткізгіштердің, ал 1.1-кестеде электроқшаулаушы материалдардың көлемдік меншікті кедергісі мен кедергінің температуралық коэффициенті мәні келтірілген.

Резистор деп кедергісі бар және тоқты шектеуге қолданылатын электротехникалық құрылғыны атайды.

2.1-кесте. Кейбір өткізгіш материалдардың меншікті кедергісі мен кедергінің температуралық коэффициенті

Материал	20 °C температурасы кезіндегі көлемдік меншікті кедергісі, Ом*м	Кедергінің температуралық коэффициенті (1°C -қа)
Күміс	$1,6 \cdot 10^{-8}$	0,0035
Техникалық мыс	$(1,72—1,82) \cdot 10^{-8}$	0,0041
Алюминий	$2,95 \cdot 10^{-8}$	0,004
Болат	$(1,25—1,46) \cdot 10^{-7}$	0,0057
Темір	$(0,9—1,1) \cdot 10^{-7}$	0,006
Шойын	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,001
Қорғасын	$(2,18—2,22) \cdot 10^{-7}$	0,0039
Вольфрам	$0,503 \cdot 10^{-7}$	0,0048
Көмір	$(1—6) \cdot 10^{-7}$	0,005
Манганин (қорытпа: Cu— 85 % Mn— 12 % Ni — 3 %)	$(0,40—0,52) \cdot 10^{-7}$	0,00003
Константан (қорытпа: Cu — 57—60 %; Ni — 39—41 %; Mn — 1—2 %)	$4,4 \cdot 10^{-7}$	0,00005
Нихром (қорытпа : Cr — 20 %, Ni — 80 %)	$(1,02—1,120) \cdot 10^{-6}$	0,0001

2.2-кесте – Резисторлардың шартты графикалық белгісі

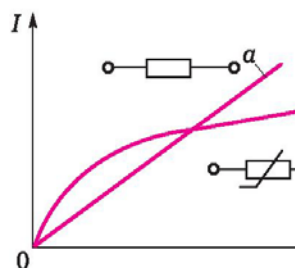
Атауы	Шартты белгісі
Тұрақты	
Бұрғыштары бар	
Айнымалы (реостат)	
Тізбек ажыратқышына ие	
Тізбек ажыратқышынсыз	
Сатылы реттелетін айнымалы (реостат)	
Сызықтық емес өздігінен реттелетін, мысалы сыртқы ортаның P параметріне қатысты	

Реттелетін резистор *реостат* деп аталады. Резисторлардың түрлі типтерінің шартты белгілері 2.2-кестеде берілген.

Резистивті элементтер деп, тұрақты токқа осы құбылыстың физикалық табиғатына қарамастан кедергі келтіретін, резисторлардың немесе басқа да кез-келген электротехникалық құрылғыларының немесе олардың бөліктерінің идеалдандырылған үлгісін атайды. Олар тізбектердің алмастыру схемаларын жасау және олардың тәртіптерін есептеу кезінде қолданылады. Идеалдандыру кезінде резисторлардың оқшаулаушы жабындылары, сымды реостаттардың қаңқасы және т.с.с. арқылы өтетін токтарды елемейді.

Сызықтық резистивті элемент, ток кернеуге пропорционалды болатын, электротехникалық құрылғысының кез-келген бөлігінің алмастыру схемасы болып табылады. Оның параметрі ретінде $R = \text{const}$ кедергісі алынады.

Егер токтың кернеуге тәуелділігі сызықтық емес болса, онда алмастыру схемасы *сызықтық емес резистивті элементтен* тұрады, ол $I(U)$ сызықтық емес *вольт-амперлік сипаттамамен* беріледі. 2.6-суретте сызықтық (a сызығы) және сызықтық емес (b сызығы) резистив-



2.6-сурет

ті элементтердің вольт-амперлік сипаттамасы (BAC), және де олардың алмастыру схемасындағы шартты белгісі берілген.

2.3. РЕЗИСТОРЛАРДЫ ЖАЛҒАУ ТӘСІЛДЕРІ

Резисторларды электр тізбегінде тізбектеп, параллельді және аралас жалғауға болады.

Тізбекті деп алдыңғы резистордың соңына келесінің басы жалғастырылатын жалғануды атайды. 2.7-суретте үш резистивті элементтің тізбекті жалғанғандағы тізбек схемасы көрсетілген. Бұл ретте әрбір резистивті элементтегі I ток бірдей. Тізбекке салынған кернеу резистивті элементтердегі кернеулер қосындысына тең және Ом заңын ескере отырып,

$$U = R_{\text{бал}} I = U_1 + U_2 + U_3 = R_1 I + R_2 I + R_3 I$$

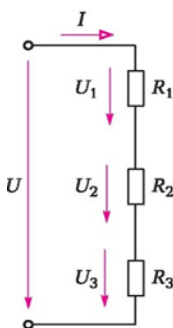
тең болады, мұндағы $R_{\text{бал}}$ — тізбектің балама кедергісі.

Теңдіктің екі бөлігін I -ге бөліп,

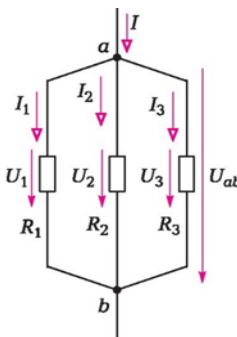
$$R_{\text{бал}} = R_1 + R_2 + R_3$$

қатынасын аламыз.

Параллель жалғау деп резисторлардың басын тізбектің бір түйініне, ал соңын басқа түйініне жалғайтын резисторлар тобының жалғануын айтады. 2.8-суретте a және b түйіндері арасында үш резистивті элементтердің параллель жалғанғандағы тізбек схемасы



2.7-сурет



2.8-сурет

көрсетілген. Бұл ретте барлық резистивті элементтердегі кедергі бірдей:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_{ab} = U.$$

Тізбектің жалпы тогы резисторлардағы токтар қосындысына тең және Ом заңын ескерсек:

$$I = U/R_{\text{бaл}} = I_1 + I_2 + I_3 = U/R_1 + U/R_2 + U/R_3,$$

мұндағы $R_{\text{бaл}}$ — тізбектің балама кедергісі.

Теңдіктің екі бөлігін U -ге бөліп,

$$1/R_{\text{бaл}} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$

қатынасын аламыз, немесе резистордың өткізгіштігі $G = 1/R$ тең екендігін ескере отырып,

$$G_{\text{бaл}} = G_1 + G_2 + G_3.$$

Параллель жалғанған екі резистор үшін:

$$1/R_{\text{бaл}} = 1/R_1 + 1/R_2, \text{ немесе } R_{\text{бaл}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2).$$

Егер n бірдей резисторлар $R_1 = R_2 = \dots = R_n$ параллель жалғанған болса, онда $R_{\text{бaл}} = R/n$.

2.8-суретте бейнеленген схема үшін:

$$I_1 R_1 = U; I_2 R_2 = U; I_3 R_3 = U.$$

Бұл теңдіктердің оң жақ бөлігі өзара тең болғандықтан

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3.$$

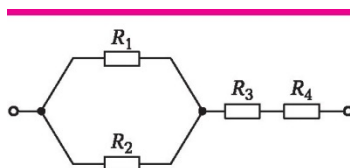
Осыдан келесі қатынасты аламыз:

$$I_1 / I_2 = R_1 / R_2; I_2 / I_3 = R_3 / R_2; I_3 / I_2 = R_1 / R_3$$

Бұл параллель қосылған резисторлардағы ток олардың кедергісіне кері пропорционалды үлестірілетінін білдіреді.

Аралас жалғау деп резисторлардың бір бөлігі параллель, ал басқа бөлігі тізбектеп жалғанатын тізбектегі резисторлар жалғануын атаймыз.

Мұндай тізбектерді есептеу кезінде алдымен параллель және тізбектей жалғанған резисторлар тобының баламалы кедергісі, содан соң – тізбектің жалпы кедергісі анықталады. Мысалы, 2.9-суреттегі тізбек схемасы үшін паралелді жалғанған R_1 және R_2 резистивті элементтерінің бөліктері мен тізбектеп жалғанған R_3 және R_4 резистивті элементтерінің баламалы кедергілері мынаған тең болады:



2.9-сурет

$$R_{\text{бал}12} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$$

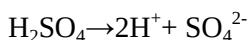
$$R_{\text{бал}34} = R_3 + R_4$$

Тізбектің жалпы кедергісі мынаған тең:

$$R_{\text{жал}} = R_{\text{бал}12} + R_{\text{бал}34}$$

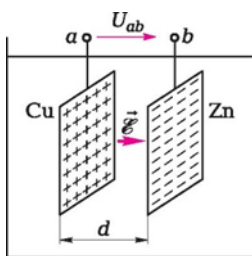
2.6. ТҰРАҚТЫ ТОКТАҒЫ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫНЫҢ КӨЗІ. ЭЛЕКТР ҚОЗҒАУШЫ КҮШ

Cu мыс және Zn мырыштан жасалынған, күкірт қышқылы ерітіндісіне салынған екі пластинадан тұратын, гальваникалық элемент мысалында (2.10, а суретін қараңыз) тұрақты токтың электр энергиясы көздерін қарастырайық. Таза қышқыл электр тогын өткізбейді. Алайда оны дистилдендірілген суда еріткен кезде ол оң және теріс зарядталған иондарға ыдырайды:



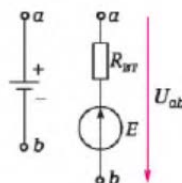
Қышқыл, сілті немесе тұздардың дистилдендірілген судағы немесе басқа еріткіштердегі ерітінділерін *электролиттер*, ал ерітінділер әсерінен химиялық қосылыстардың иондарға ыдырау процесін – *электролиттік диссоциация* деп атайды.

Химиялық процестер салдарынан Zn^{2+} мырыштың оң иондары, мырыштық пластинада теріс еркін зарядтардың артық мөлшерін қалдыра отырып, күкірт қышқылы ерітіндісіне өтеді. Күкірт қышқылы ерітіндісінде сол аралықта ауыр және аз қозғалатын Zn^{2+} мырыштың оң иондары, сутегінің жеңіл және қозғалғыш H^+ оң ион-



а

2.10-сурет



б

в

дарын, беткі жағында сутегінің бейтарап атомдарын қалпына келтіру жүріп жатқан мыс пластинасына қарай ығыстыра бастайды. Бұл ретте мыс пластинасы еркін теріс зарядтарын жоғалта бастайды, яғни оң зарядталады

Екі түрлі зарядталған пластиналардың арасында, иондардың ерітіндіде бағытталған қозғалысына кедергі келтіретін, $\vec{\xi}$ кернеулігіне ие біртекті электр өрісі туындайды. Өрістің $\xi = \xi_0$ кернеулік мәндерінде пластиналарда зарядтардың жинақталуы тоқтайды. Заряд жинақталуы тоқтайтын, пластиналар арасындағы потенциалдар айырымына тең кернеу, заряд жинауға ұмытылатын *сыртқы күштің* (бұл жағдайда химиялық табиғатты) сандық өлшемі болып табылады.

Электр қозғаушы күш деп (ЭҚК) сыртқы күштердің сандық өлшемі аталады. Гальваникалық элемент үшін E ЭҚК:

$$E = \xi_0 d = U_{abx}$$

формуласымен анықталады, мұндағы d — пластиналар арасындағы арақашықтық; $U_{abx} = V_{ax} - V_{bx}$ — бос жүріс режиміндегі, яғни гальваникалық элементте ток болмаған кездегі пластиналар шықпасының арасындағы потенциалдар айырымына тең кернеу.

Егер гальваникалық элементтің шықпаларына қабылдағышты, иысалы резисторды қоссақ, онда тұйықталған тізбекте ток туындайды. Қышқыл ерітіндісіндегі иондардың бағытталған қозғалысы олардың өзара соқтығысуымен бірге жүреді, ал бұл гальваникалық элементтің тұрақты токқа *ішкі кедергісін* туындатады. Үлгілік бейнесі 2.10, а суретінде, ал принциптік схемадағы белгілері 2.10, б суретінде берілген гальваникалық элементті тізбектеп жалғанған E ЭҚК көзінен және оның ішкі кедергісіне тең $R_{\text{ш}}$ кедергісіне ие резистивті элементтен тұратын алмастыру схемасымен көрсетуге болады (2.10, в сурет). ЭҚК бағыттауыш сызығы гальваникалық элементтегі оң зарядтардың сыртқы күштер әсерінен қозғалысының бағытын көрсетеді. U_{ab} кернеуінің бағыттауыш сызығы, егер қабылдағышты гальваникалық элементке қоссақ, электр өрісі күштері әсерінен ондағы оң зарядтардың қозғалыс бағытын көрсетеді.

2.10, в суретіндегі алмастыру схемасы, гальваникалық элементтен ЭҚК мен ішкі кедергісінің физикалық табиғатымен ерекшеленетін тұрақты токтың электр энергиясының кез-келген басқа көздері үшін дұрыс болмақ.

Электр энергиясы көзі мен оған жалғанған $R_{\kappa c}$ жүктеме кедергісіне ие резистордан тұратын тізбектегі процестерді қарастырайық. Электр энергиясының көзін 2.10, в суретіндегі алмастыру схемасымен, ал бүкіл тізбекті – 2.11, а суретіндегі схемамен көрсетейік.

Электр энергиясы көзінің қасиеттерін *вольт-амперлік*, немесе *сыртқы сипаттама* – $U_{ab}=U$ шықпаларының арасындағы кернеудің энергия көзінің I тогына тәуелділігі, яғни $U(I)$ анықтайды:

$$U = E - R_{iш} I = U_x - R_{iш} I \quad (2.6)$$

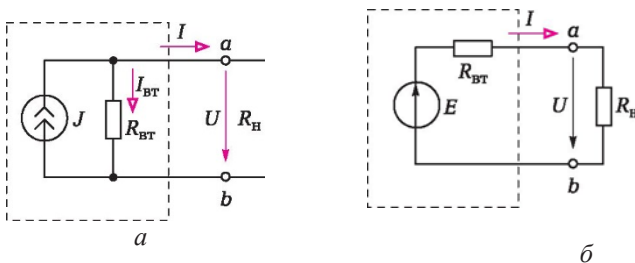
оған 2.12, а суретіндегі сызық сәйкес келеді. Токтың артуы кезіндегі энергия көзінің кернеуінің азаюуы, оның $R_{iш}$ ішкі кедергісіндегі кернеудің азаюуының өсуімен түсіндіріледі. $U = 0$ кернеу кезінде энергия көзі тогы қысқаша тұйықталу тогына тең: $I = I_{\kappa} = E / R_{iш}$

Токтың теріс мәндеріндегі сыртқы сипаттама бөлігі, энергия көзінің онымен салыстырғанда сыртқы тізбектен, мысалға аккумулятор зарядынан алып тұтынуымен сәйкес келеді.

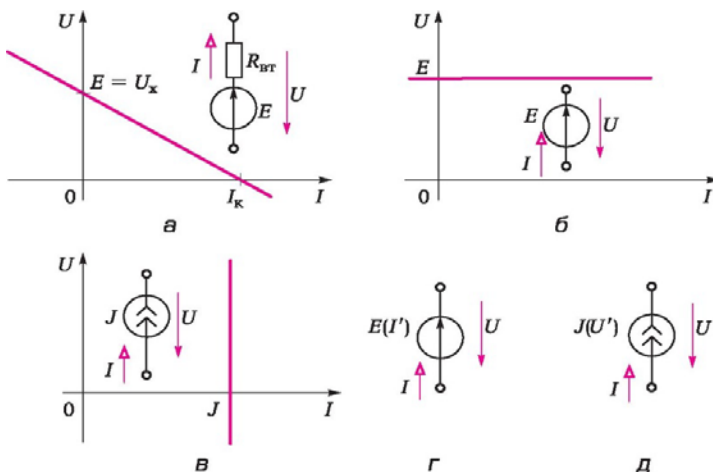
ЭҚК мен ток көзі электр энергиясы көзінің дара жағдайы болып табылады.

ЭҚК көзі. Егер электр энергиясының көзінің ішкі кедергісі жүктеме тізбегінің кедергісінен бірнеше есе аз болса, онда (2.6) бойынша энергия көзінің кернеуі Ом заңы бойынша $I = E / (R_{iш} + R_{\kappa c})$ ток және $R_{\kappa c}$ $R_{iш}$ кезінде ЭҚК тең болады:

$$U = E - \frac{R_{iш} E}{R_{iш} + R_{\kappa c}} = E - \frac{E}{1 + R_{\kappa c} / R_{iш}} \approx E = \text{const}$$



2.11-сурет



2.12-сурет

Ішкі кедергісі төмен электр энергиясы көздерін, $R_{\text{шт}}=0$ болатын идеалдандырылған моделмен алмастыруға болады. Мұндай идеалдандырылған электр энергиясының көзі *ЭҚК идеалды көзі* деп аталады және $E=U_x=U$ бір параметрімен сипатталады. Идеалды ЭҚК көзі шықпаларының арасындағы кернеу токқа тәуелсіз, ал сыртқы сипаттамасы, 2.12, б суретіндегі түзу сәйкес келетін

$$U = E = \text{const}, \quad (2.7)$$

өрнегімен анықталады. Сонымен қатар мұндай көздер *кернеу көзі* деп те аталады. Осы суретте ЭҚК идеал көзінің схемалардағы белгісі көрсетілген.

Ток көзі. Егер электр энергиясы көзінің ішкі кедергісі жүктеме тізбегінің кедергісінен бірнеше есе көп болса, онда энергия көзі тоғын $R_{\text{шт}}$ $R_{\text{к}}$ кедергісі мәндерінде оның қысқаша тұйықталу тоғына тең деуге болады:

$$I = \frac{E}{R_{\text{шт}} + R_{\text{к}}} \approx E / R_{\text{шт}} = I_{\text{к}} = J = \text{const}$$

Ішкі кедергісі жоғары электр энергиясының көзін, $R_{\text{шт}} \rightarrow \infty$ мен $E \rightarrow \infty$ және $E / R_{\text{шт}} = J$ теңдігі әділетті болатын идеалдандырылған моделмен алмастыруға болады. Электр энергиясының мұндай идеалдандырылған көзі токтың *идеалды көзі* деп аталады және $J = J_{\text{к}}$ бір параметрімен сипатталады. Көздегі ток оның шықпаларының

арасындағы кернеуге тәуелсіз, ал оның сыртқы сипаттамасы, 2.12, *в* суретіндегі түзу сәйкес келетін

$$I = J = \text{const}, \quad (2.8)$$

өрнегімен анықталады. Осы суретте ток көзінің схемалардағы белгісі берілген. Кернеудің теріс мәніне ие сыртқы сипаттамасының бөлігі, онымен салыстырғанда сыртқы тізбектен алынатын энергияны ток көзінің тұтынуына сәйкес келеді.

2.11, *а* суретіндегі энергия көзінің алмастыру схемасынан ток көзі бар баламалы алмастыру схемасына өтуге болады. Ол үшін (2.6) теңдеуінің барлық қосылғыштарын көздің $R_{iш}$ ішкі кедергісіне бөлейік:

$$U / R_{iш} = E / R_{iш} - I ,$$

немесе

$$E / R_{iш} = J = U / R_{iш} + I = I_{iш} + I$$

2.11, *б* суретіндегі баламалы алмастыру схемасы алынған теңдеуге сәйкес келеді. Шынайы электр энергия көздерін екі алмастыру схемасы түрінде көрсету тізбектің сыртқы бөлігіне қатысты баламалы болып табылады, екі жағдайда да көздердегі токтар мен олардың шықпаларының арасындағы кернеулер бірдей.

Тізбектер теориясында ЭҚК мен токтардың тәуелсіз және тәуелді көздерін ажыратады. Соңғы жағдайда олардың параметрлерінің мәндері басқа шамалардың мәндеріне тәуелді болады, мысалы $E(I')$ (2.12-сурет, *з*), $J(U')$ (2.12-сурет, *д*), мұндағы I' және U' — тізбектің қандайда бір тармағының тогы мен кернеуі.

2.8. КИРХГОФТЫҢ БІРІНШІ ЖӘНЕ ЕКІНШІ ЗАҢДАРЫ. ЖАЛПЫЛАНҒАН ОМ ЗАҢЫ

Кирхгофтың екі заңы — электр тізбектерінің негізгі заңдары.

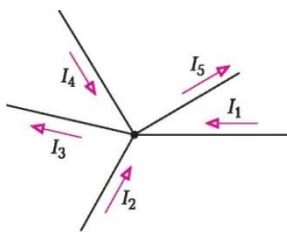
Кирхгофтың бірінші заңы. *Электр тізбегінің кез-келген түйініндегі токтардың алгебралық қосындысы нөлге тең:*

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

(2.9)

мұндағы n — түйінде жалғанатын тармақтар саны; k — тармақтың реттік нөмірі.

(2.9)-да «плюс» таңбасымен түйіннен оң бағытталған токтар, ал «минус» таңбасымен — түйінге қарай оң бағытталған токтар жазылады, немесе керісінше. Басқаша айтқанда, түйіндерден бағытталған токтар қосындысы, түйіндерге бағытталған токтар қосындысына тең. Мысалы, 2.13 суреттегі тізбек түйіндері үшін:



2.13-сурет

$$-I_1 - I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = \sum_{k=1}^n I_k = 0$$

немесе

$$I_3 + I_5 = I_1 + I_2 + I_4.$$

Бұл заң, тұрақты ток тізбегінің түйіндерінде зарядтар жиналмайтындығының салдары болып табылады. Кері жағдайда, түйіндер потенциалы мен тармақтардағы токтар өзгертін еді.

Кирхгофтың екінші заңы. *Электр тізбегінің кез-келген контуры бөлігіндегі кернеулердің алгебралық қосындысы нөлге тең*

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0$$

(2.10)

мұндағы m — контур бөліктерінің саны; k — бөліктің реттік нөмірі.

(2.10)-да «плюс» таңбасымен, оң бағыттары контур айналымының еркін тандап алынған бағытымен сәйкес келетін кернеулер, ал «минус» таңбасымен — қарама-қарсы бағытталған кернеулер жазылған, немесе керісінше.

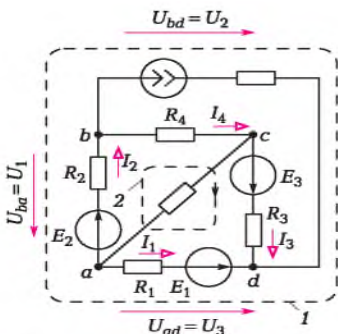
Тек ЭҚК көздері мен резистивті элементтерден ғана тұратын тізбек схемасының контуры үшін, *резистивті элементтердегі кернеулердің алгебралық қосындысы ЭҚК алгебралық қосындысына тең*, яғни Кирхгофтың екінші заңы:

$$\sum_{k=1}^n U_{Rk} = \sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{k=1}^m E_k$$

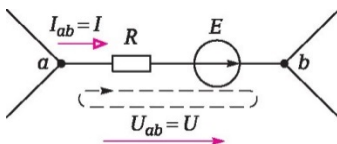
(2.11)

өрнегі түрінде болады, мұндағы n және m — контурдағы резистивті элементтер мен ЭҚК саны.

(2.11)-де «плюс» таңбасымен, оң бағыттары контур айналымының еркін тандап алынған бағытымен сәйкес келетін ЭҚК мен токтар, ал «минус» таңбасымен — қарама-қарсы бағытталған токтар жазылады, немесе керісінше.



2.14-сурет



2.15-сурет

Ток көздерінен тұратын контурлар үшін Кирхгофтың екінші заңы, (2.11)-ші түрінде емес, тек (2.10)-шы түрінде ғана жазылуына болады.

Мысалы, 2.14-суреттегі тізбек схемасының 1-контуры үшін (2.10) бойынша

$$-U_1 + U_2 - U_3 = 0$$

2-контуры үшін (2.11) бойынша

$$\sum_{k=1}^4 R_k I_k = -R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_4 I_4 + R_3 I_3 = \sum_{k=1}^3 E_k = -E_1 + E_2 + E_3.$$

(2.10)-шы Кирхгофтың екінші заңы, тұрақты электр өрісінде, тұйықталған контур бойымен оның кернеулік векторының айналымы нөлге тең болуының (1.5) салдары болып табылады.

Дара жағдайда тізбектің тек бір ғана тармағы контурға ене алады, сондықтан да ол тізбектің басқа тармақтарынан тыс тұйықталады (2.15-сурет). Бұл жағдайда (2.11)-ге сәйкес

$$RI_{ab} + U_{ab} = E$$

бұдан

$$I_{ab} = \frac{(U_{ab} + E)}{R} = \frac{V_a - V_b + E}{R}$$

$$\text{немесе } I = \frac{U + E}{R} \quad (2.12)$$

мұндағы тармақтың $U_{ab} = U$ кернеуі және $I_{ab} = I$ тогы бағыт бойынша сәйкес келеді.

(2.12) теңдеуі, қосынды кедергісі R және E ЭҚК ие кез-келген (ток көздерінсіз) тармақтың немесе осы тармақтың R мен E параметрлеріне ие жеке бөлігі үшін жалпыланған Ом заңын өрнектейді.

Жалпы жағдайда тізбек схемасының B тармағы мен Y түйіндері болады, оның ішінде B_I тармағы ток көздерінен тұрады.

Алдымен тізбек схемасының ток көздерінсіз есептеулерін, яғни $B_I = 0$ кезінде, содан соң жалпы жағдайды қарастырайық.

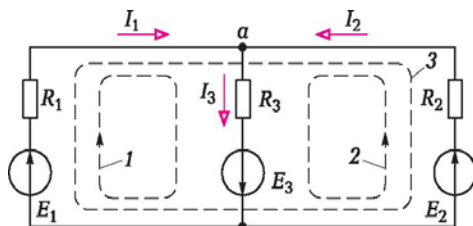
Ток көздерінсіз тізбек схемасы. ток көздерінсіз тізбек схемасын есептеу, B тармақтарындағы токтарды анықтауға саяды. Ол үшін, Кирхгофтың бірінші заңы бойынша $Y-1$ тәуелсіз теңдеулерді және Кирхгофтың екінші заңы бойынша $K = B - Y + 1$ тәуелсіз теңдеулерді құрастырайық. Осы теңдеулерге сәйкес келетін түйіндер мен контурлар *тәуелсіздер* деп аталады.

Планарлы схемалар үшін, яғни тармақтардың қиылысуынсыз жазықтықтағы бейнесіне жол беретін схемалар үшін, олардың әрқайсысында тек осы контурға тиесілі бір тармақтың бар болуы K тәуелсіз контурларды айрықшалаудың жеткілікті шарты болып табылады.

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша тәуелсіз теңдеулердің саны түйіндер санынан бір санына кем, себебі әрбір тармақтың тогы ол жалғайтын түйіндерге арналған теңдеуге әртүрлі таңбалармен кіреді. Барлық түйіндердің қосылатын теңдеулерінің қосындысы нөлге теңбе-тең тең.

Теңдеулер жүйесін шешу тармақтар тогын анықтайды.

2.16 суреттегі, $Y=2$ түйіндерінен және $B=3$ тармақтарынан, яғни $K=B-Y+1=3-2+1=2$ тәуелсіз контурларынан (1 мен 2, немесе 1 мен 3, немесе 2 және 3) тұратын тізбек схемасының есептелуін қарастырайық.



2.16-сурет

I_1, I_2, I_3 тармақтар тогының оң бағыттарын дербес етіп таңдап аламыз. Кирхгофтың бірінші заңы бойынша бір ($Y-1 = 2 - 1 = 1$) тәуелсіз теңдеуін мысалы a түйіні үшін, және де Кирхгофтың екінші заңы бойынша — екі ($K = 2$) тәуелсіз теңдеуін, мысалы 1 және 2 контурлар үшін құрастырамыз:

$$\left. \begin{aligned} -I_1 - I_2 + I_3 &= 0; \\ R_1 I_1 + R_3 I_3 &= E_1 + E_3; \\ R_2 I_2 + R_3 I_3 &= E_2 + E_3, \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

мұндағы резистивті элементтердегі кернеу Ом заңы бойынша анықталады.

Үш белгісіз токтарға ие (2.13)-ші үш теңдеулер жүйесінің шешімі I_1, I_2, I_3 тармақтар тогын анықтайды.

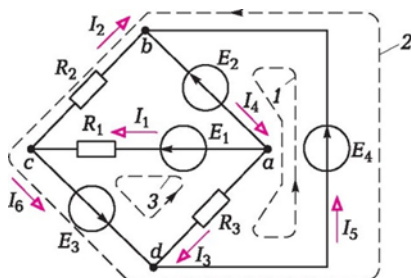
2.1-мысал. Ом мен Кирхгоф заңдарының көмегімен 2.17-суреттегі схеманың, элементтердің параметрлерінің мәні: $E_1 = 1$ В, $E_2 = 2$ В, $E_3 = 3$ В, $E_4 = 4$ В, $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 1$ Ом болған кездегі барлық тармақтарындағы токтарын анықтау.

Шешімі. Схема $B = 6$ тармақтардан, $Y = 4$ түйіндерден, $K = B - Y + 1 = 6 - 4 + 1 = 3$ тәуелсіз контурлардан тұрады.

Тармақтардағы $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ токтардың оң бағыттарын таңдаймыз және a, b, c, d түйіндерді белгілейміз.

2.17 суретте штрихты сызықтармен белгіленген 1, 2, 3 үш тәуелсіз контурды ($K = 3$) және оларды айналу бағытын таңдаймыз.

Кирхгофтың екінші заңы бойынша (1, 2, 3 контурлары үшін) үш ($K = 3$) тәуелсіз теңдеулерді, және Кирхгофтың бірінші заңы бойынша (a, b, c түйіндері үшін) үш ($Y-1 = 4 - 1 = 3$) тәуелсіз теңдеуді құраймыз, олардың шешімін тауып, тармақтар тогын анықтаймыз:



2.17-сурет

$$\left. \begin{aligned} R_3 I_3 &= E_1 - E_2 \text{ (контур 1);} \\ -R_2 I_2 &= E_3 + E_4 \text{ (контур 2);} \\ -R_3 I_3 + R_1 I_1 &= E_1 + E_3 \text{ (контур 3);} \end{aligned} \right\}$$

$$I_3 = (E_4 - E_2) / R_3 = (4 - 2) / 1 = 2 \text{ A;}$$

$$I_2 = -(E_4 + E_3) / R_2 = -(4 + 3) / 2 = -3,5 \text{ A;}$$

$$I_1 = (E_1 + E_3) / R_3 + (R_1 / R_3) / I_3 = (1 + 3) / 4 + (1 / 4) 2 = 1,5 \text{ A}$$

$$I_4 = I_1 + I_3 = 1,5 + 2 = 3,5 \text{ A (a түйіні);}$$

$$I_5 = -I_2 + I_4 = 3,5 + 3,5 = 7 \text{ A (b түйіні);}$$

$$I_6 = I_1 - I_2 = 1,5 + 3,5 = 5 \text{ A (c түйіні).}$$

d түйіні үшін Кирхгофтың бірінші заңының әділеттілігін

$$I_6 + I_3 - I_5 = 5 + 2 - 7 = 0$$

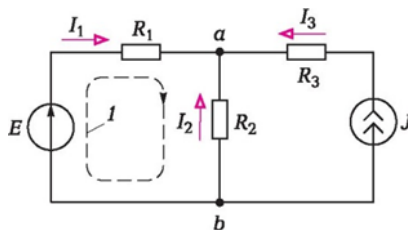
тексеру арқылы шешімнің дұрыстығына көз жеткізуге болады.

Жалпы жағдай. ЭҚК мен ток көздеріне ие схемаларды есептеу кезінде қысқартуларға жол беріледі. Шыныменде, ток көздеріне ие B_J тармақтарының токтары белгілі және ток көздерінің токтарына тең. Сондықтан да, Кирхгофтың екінші заңы бойынша теңдеу құрылуы қажет тәуелсіз контурлардың (ток көздерінсіз!) саны $K = B - B_J - Y + 1$ тең.

2.2-мысал. Ом мен Кирхгоф заңдарының көмегімен элементтердің параметрлері $E = 5 \text{ В}$, $J = 2 \text{ А}$, $R_1 = 2 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$, $R_3 = 3 \text{ Ом}$ болған кездегі, 2.18-суреттегі схеманың барлық тармақтарының токтарын анықтау.

Шешімі. Схема $B = 3$ тармақтар санынан тұрады, олардың ішінде ток көзіне ие $B_J = 1$ тармағы, $Y = 2$ (a мен b) түйіндері, $K = B - B_J - Y + 1 = 3 - 1 + 2 - 1 = 1$ (контур 1) тәуелсіз контурлары (ток көздерінсіз) бар.

Тармақтардағы токтардың оң бағытын таңдап алып, оларды I_1 , I_2 , I_3 деп белгілейміз. ток $I_3 = J = 2 \text{ А}$.



2.18-сурет

Кирхгофтың екінші заңы бойынша бір (1-контур үшін, оның айналымы бағытын таңдай отырып) тәуелсіз теңдеуді және Кирхгофтың бірінші заңы бойынша (a түйіні үшін) бір ($\sum I = 0$) тәуелсіз теңдеуді құрамыз:

$$\left. \begin{aligned} R_1 I_1 - R_2 I_2 &= E \text{ (контур 1);} \\ I_1 + I_2 + I_3 &= 0 \text{ (} a \text{ түйіні);} \end{aligned} \right\} \text{ немесе } \begin{aligned} 2I_1 - I_2 &= 5; \\ I_1 + I_2 &= -2; \end{aligned}$$

Бірінші және екінші теңдеуді мүшелеп қосу арқылы $I_1 = 1A$ тогын, содан соң екінші теңдеуден $I_2 = -3A$ екендігін анықтаймыз.

Ом мен Кирхгоф заңдарын қолдана отырып, кез-келген электрлік тізбектің жұмыс режимін есептеп шығаруға болады. Есептеулерді қысқарту үшін түрлі есептеу әдістерін: схемаларды баламалы түрлендіру, контурлық токтар, түйіндік потенциалдар, түйін аралық кернеу және т.б. қолданылады.

2.10.

СХЕМАЛАРДЫ БАЛАМАЛЫ ТҮРЛЕНДІРУ ӘДІСІ

Егер электр тізбегінің алмастыру схемасындағы резистивті элементтер тобын, резистивті элементтері өзгеше жалғанған басқа баламалы топпен алмастырса, күрделі тізбектің есептеулерін қысқартуға болады. Алмастырғаннан кейін тізбектің басқа бөліктерінің жұмыс режимі өзгермейтіндігі, өзара баламалық болып табылады.

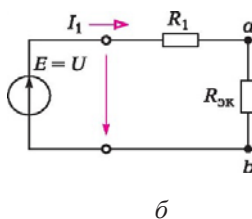
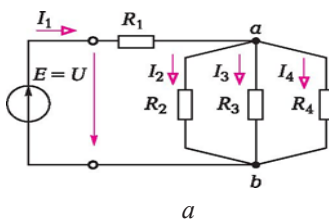
Резистивті элементтерді аралас жалғау. Схемаға қатысты сыртқы болып табылатын бір энергия көзінен тұратын схеманың бір бөлігін резистивті элементтердің аралас (тізбекті-параллель) жалғануы деп қарастыруға болады.

Есептеулер үшін мұндай схеманы резистивті элементтері тізбектей жалғанған баламалыға түрлендірген жөн. Мысалы, 2.19, a суретте a мен b түйіндері арасында кедергілері R_2, R_3 мен R_4 , яғни өткізгіштігі $G_2 = 1/R_2, G_3 = 1/R_3, G_4 = 1/R_4$, ал баламалы өткізгіштігі

$$G_{\text{бал}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \quad (2.14)$$

болатын үш резистивті элемент қосылған.

Резистивті элементтердің параллель жалғануларын, $R_{\text{бал}} = 1/G_{\text{бал}}$ кедергісіне ие баламалы резистивті элементпен алмастырып, тізбектей жалғанған R_1 және $R_{\text{бал}}$ екі резистивті элементтің баламалы схемасын (2.19-сурет, b) аламыз, ондағы ток:



2.19-сурет

$$I_1 = U / (R_1 + R_{\text{бал}}) \quad (2.15)$$

Бастапқы схемадағы параллель тармақтардағы токтар

$$I_2 = U_{ab} / R_2; \quad I_3 = U_{ab} / R_3; \quad I_4 = U_{ab} / R_4; \quad (2.16)$$

мұндағы $U_{ab} = R_{\text{бал}} I_1$.

Резистивті элементтерді жұлдыз және үшбұрыш түрінде жалғау. Резистивті элементтерден үш сәулелі жұлдыз түріндегі тізбектің алмастыру схемасын үшбұрыш түріндегі баламалы схемамен алмастыруға болады, немесе керісінше. Мұндай есептеулер, тұрақты ток пен үш фазалық (6-тарауды қараңыз) күрделі тізбектерінде қолданылады.

Үшбұрыш және жұлдыз түріндегі схемалардың баламасы (2.20-сурет), схеманың өзге бөліктерінен ажыратылып тасталған кедергі немесе өткізгіштіктің мәндерін осы схеманың біраттас түйіндерімен теңдестіру кезінде алынады.

a мен b түйіндері арасындағы кедергіні табайық. Үшбұрыштап жалғау схемасындағы (2.20-сурет, a) a мен b түйіндері арасындағы өткізгіштік:

$$\frac{1}{R_{ab}} + \frac{1}{R_{bc} + R_{ca}} = \frac{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}{R_{ab} R_{bc} + R_{ca} R_{ab}}$$

тең. a мен b түйіндері арасындағы кедергі – осы түйіндер арасындағы өткізгіштікке кері шама, яғни

$$r_{ab} = (R_{ab} R_{bc} + R_{ca} R_{ab}) / (R_{ab} + R_{bc} + R_{ca})$$

Жұлдыз түрінде жалғау схемасында (2.20-сурет, $б$), a мен b түйіндері арасындағы кедергі екі тармақтың кедергілерінің қосындысына тең: $R_a + R_b$.

$$R_a + R_b = \frac{R_{ab} R_{bc} + R_{ca} R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = \frac{R_{ab} R_{bc} + R_{ca} R_{ab}}{\sum R_{\Delta}} \quad (2.17)$$

баламалық шартының теңдеуі болып табылады, мұндағы $\sum R_{\Delta}$ — үшбұрыштап жалғау схемасындағы барлық тармақтардың кедергілерінің қосындысы.

(2.17)-де индекстерді айналып орынын ауыстыру, үшбұрыш және жұлдызды схемалардың аттас b және c түйіндері мен s және a түйіндері арасындағы кедергілер теңдігінің шарттарын анықтайды

$$R_b + R_c = \frac{R_{bc}R_{ca} + R_{ab}R_{bc}}{\sum R_{\Delta}}; \quad (2.18)$$

$$R_c + R_a = \frac{R_{ca}R_{ab} + R_{bc}R_{ca}}{\sum R_{\Delta}}. \quad (2.19)$$

(2.17) мен (2.19)-ды қосып және алынған қосындыдан (2.18)-ді алып тастасақ

$$R_a = R_{ab}R_{ca} / \sum R_{\Delta} \quad (2.20)$$

жұлдыз тармақтарының кедергілерінің өрнектерін табамыз.

(2.20)-да индекстерді айналып орынын ауыстыру жұлдыздың басқа екі тармақтарының кедергілеріне арналған өрнекті анықтайды

$$R_b = R_{bc}R_{ab} / \sum R_{\Delta} \quad (2.21)$$

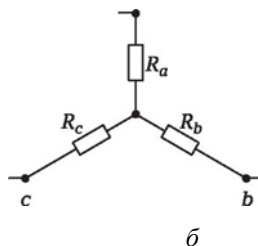
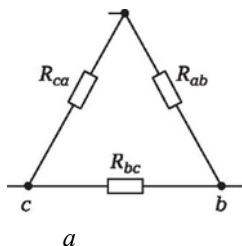
$$R_c = R_{ca}R_{bc} / \sum R_{\Delta} \quad (2.22)$$

Үшбұрыш тармақтарының кедергілерінің теңдігі кезінде ($R_{ab}=R_{bc}=R_{ca}=R_{\Delta}$), баламалы жұлдыздың тармақтарының кедергілері де бірдей:

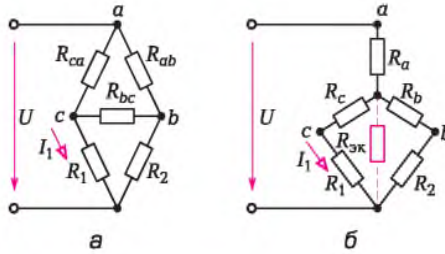
$$R_x = R_{\Delta}/3. \quad (2.23)$$

Резистивті элементтерден жасалынған жұлдыздың баламалы үшбұрышқа кері түрленуі де мүмкін. Ол үшін (2.20) — (2.22) өрнектерін қос-қостан көбейтіп, алынған көбейтінділерді қосайық:

$$R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a = R_{ab} R_{bc} R_{ca} / (R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}).$$



2.20-сурет



2.21-сурет

Бұл қатынасты (2.22)-ге бөліп, үшбұрыш тармақтарының кедергісін анықтаймыз:

$$R_{ab} = R_a + R_b + R_a R_b / R_c. \quad (2.24)$$

(2.24)-те индекстерді айналып орынын ауыстыру үшбұрыштың басқа екі тармақтарының кедергілеріне арналған өрнекті анықтайды:

$$R_{bc} = R_b + R_c + R_b R_c / R_a, \quad (2.25)$$

$$R_{cf} = R_c + R_a + R_c R_a / R_b. \quad (2.26)$$

2.3-мысал. Кедергілерінің мәндері $R_{ab} = R_{bc} = 10 \text{ Ом}$, $R_{ca} = 20 \text{ Ом}$, $R_1 = 2,5 \text{ Ом}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$ болған кездегі резистивті элементтердің жалғануының көпірлік схемасының (2.21-сурет, а) кедергісін есептеп шығару.

Шешімі. R_{ab} , R_{bc} , R_{ca} үшбұрыштап жалғанған резистивті элементтердің схемасын жұлдыз түрінде жалғаудың баламалы схемасына алмастырайық, оның тармақтарының кедергісін (2.20) – (2.22) формулалары бойынша анықтаймыз:

$$R_a = 5 \text{ Ом}, R_b = 2,5 \text{ Ом}, R_c = 5 \text{ Ом}.$$

Резистивті элементтерді аралас жалғаудың алынған схемасындағы екі параллель тармақтарды баламалы резистивті элементке ие бір тармақпен алмастырайық (2.21, б суретте штрих сызықтармен көрсетілген), оның кедергісін (2.14) бойынша анықтаймыз:

$$R_{\text{бал}} = \frac{(R_c + R_1)(R_b + R_2)}{R_c + R_1 + R_b + R_2} = 3,75 \text{ Ом}$$

Көпірлік схема мен екі резистивті элементтері тізбектеп жалғанған, алынған баламалы схеманың кедергісі $R_a + R_{\text{бал}} = 8,75 \text{ Ом}$ ға тең.

Түйіндік потенциалдар әдісі, тізбекті $Y - 1$ дейін есептеу үшін бірлесе шығарылатын тәуелсіз тендеулердің санын азайтуға мүмкіндік береді, мұндағы Y — тізбектің алмастыру схемасының түйіндер саны. Бұл әдіс Кирхгофтың бірінші заңын қолдануға негізделген және келесіден тұрады.

1. Тізбек схемасының бір түйінін нөлдік потенциалды базис ретінде қабылдаймыз. Мұндай жол беру түйіндер арасындағы потенциалдар айырымын, демек, тармақтардың кернеуі мен токтарын да өзгертпейді.

2. Қалған $Y - 1$ түйіндер үшін, ток көздері жоқ тармақтарының токтарын, олар жалғайтын түйіндердің потенциалдары арқылы өрнектей отырып, Кирхгофтың бірінші заңы бойынша тендеу құрамыз.

3. Құрылған тендеу жүйесінің шешімін табу арқылы $Y - 1$ түйіндердің потенциалдарын, содан кейін жалпыланған Ом заңы бойынша ток тармақтарын (2.12) анықтаймыз.

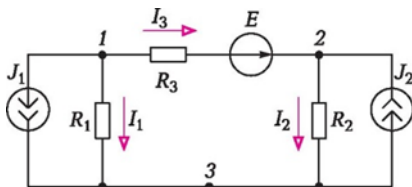
$Y = 3$ түйіннен тұратын тізбек есептелуін қарастырайық (2.22-сурет). 3-түйінді базистік деп, яғни потенциалы $V_3 = 0$ деп қабылдаймыз. Кирхгофтың бірінші заңы бойынша тендеулерден 1 мен 2-түйіндер үшін:

$$I_1 + I_3 + J_1 = 0;$$

$$I_2 - I_3 - J_2 = 0$$

түйіндер потенциалымен берілген токтардың
 $I_1 = (V_1 - V_3) / R_1 = V_1 / R_1$; $I_2 = (V_2 - V_3) / R_2 = V_2 / R_2$; $I_3 = (V_1 - V_2 + E) / R_3$
 өрнегін қойғаннан кейін алатынымыз:

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) V_1 - \frac{1}{R_3} V_2 &= -J_1 - \frac{E}{R_3}; \\ -\frac{1}{R_3} V_1 + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) V_2 &= J_2 + \frac{E}{R_3} \end{aligned} \right. \quad (2.27)$$



2.22-сурет

(2.27) теңдеулер жүйесін шешу арқылы V_1 және V_2 түйіндерінің потенциалын, демек (2.12) бойынша тармақтар тоғын анықтаймыз.

(2.27)-ші жазбасынан, *түйіндік потенциалдар әдісі бойынша теңдеу құру принципі* айқын. Теңдеудің сол жақ бөлігіндегі қарастырылып отырған түйіннің потенциалы кезіндегі коэффициенті оң және оған жинақталатын тармақтардың өткізгіштігінің қосындысына тең. Қарастырылып отырған түйінмен жалғанған түйіндердің потенциалдары кезіндегі коэффициенттер теріс және сәйкес тармақтардың өткізгіштігіне тең.

Теңдеулердің оң жақ бөлігі, ток көздеріне ие тармақтар тоғының және ЭҚК көздеріне ие тармақтардың қысқаша тұйықталу токтарының алгебралық қосындысынан тұрады, және де егер ток және ЭҚК көзінің тоғы қарастырылып отырған түйінге (түйіннен) бағытталған болса, қосылғыштар плюс (минус) таңбасымен алынады.

2.4-мысал. Түйіндік потенциалдар әдісімен, элемент параметрлерінің мәндері $J = 2$ А, $E_1 = 10$ В, $E_2 = 3,5$ В, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 1$ Ом болған кездегі, 2.23 суреттегі схеманың барлық тармақтарындағы токты анықтау.

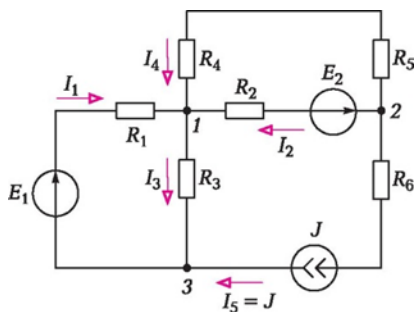
Шешімі. Схема $B = 5$ тармақтар санынан тұрады, олардың ішінде ток көзіне ие $B_J = 1$ тармақ; $Y = 3$ түйіндер бар.

Тармақтардағы токтың оң бағытын таңдаймыз және түйін 1, 2, 3 және I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 ток нөмірлерін белгілейміз. Ток $I_5 = J = 2$ А.

3-түйінді базисті деп аламыз, яғни потенциал $V_3 = 0$.

1 және 2-түйіндер үшін түйіндік потенциалдар әдісімен екі тәуелсіз теңдеуді ($Y - 1 = 3 - 1 = 2$) құрамыз:

$$V_1 \left(\frac{1}{R_4 + R_5} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - V_2 \left(\frac{1}{R_4 + R_5} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2}$$



2.23-сурет

$$-V_1 \left(\frac{1}{R_4 + R_5} + \frac{1}{R_2} \right) + V_2 \left(\frac{1}{R_4 + R_5} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{E_2}{R_2} - J$$

яғни

$$3,5V_1 - 1,5V_2 = 6,5; -1,5V_1 + 1,5V_2 = 1,5$$

Тендеуді мүшелеп қосып, $V_1 = 4$ В потенциалын анықтаймыз, содан соң $V_2 = 5$ В потенциалын екінші тендеуден анықтаймыз.

(2.12) жалпыланған Ом заңы бойынша тармақтардағы тоқты анықтаймыз:

$$I_1 = \frac{V_3 - V_1 + E_1}{R_1} = \frac{0 - 4 + 10}{1} = 6A;$$

$$I_2 = \frac{V_2 - V_1 - E_2}{R_2} = \frac{5 - 4 - 3,5}{1} = -2,5A;$$

$$I_3 = \frac{V_1 - V_3}{R_3} = \frac{4 - 0}{1} = 4A;$$

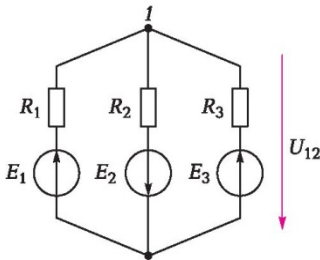
$$I_4 = \frac{V_2 - V_1}{R_4 + R_5} = \frac{5 - 4}{1 + 1} = 0,5A.$$

Бұл шешімнің дұрыстығына 3-түйін үшін Кирхгофтың бірінші заңының әділеттілігін тексеру арқылы көз жеткізуге болады.

$$I_3 + I_5 - I_1 = 4 + 2 - 6 = 0.$$

Дара жағдайда, *екі түйінді* ток көздерінсіз тізбектер схемасындағы базистік түйін 2 кезіндегі түйін 1 потенциалы, яғни $V_2 = 0$ кезінде, түйіндер арасындағы кернеуге тең:

$$U_{12} = V_1 - V_2 = \frac{\sum E/R}{\sum 1/R} = \frac{\sum GE}{\sum G} \quad (2.28)$$



2.24-сурет

(2.28) өрнегі *түйін аралық кернеу формуласы* деп аталады, ол мысалға, үш фазалық электр тізбектерін талдау кезінде қолданылады.

2.5-мысал. Элементтер параметрі $E_1 = 10$ В, $E_2 = 30$ В, $E_3 = 0,75$ В, $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 2,5$ Ом мәндері кезіндегі, 2.24 суреттегі схемадағы U_{12} түйін аралық кернеуді анықтау.

Шешімі (2.28) бойынша түйін аралық кернеу мынаған тең:

$$U_{12} = \frac{E_1 / R_1 - E_2 / R_2 + E_3 / R_3}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3} = \frac{2 - 3 + 0,3}{0,2 + 0,1 + 0,4} = -1B$$

2.12. КОНТУРЛЫҚ ТОКТАР ӘДІСІ

Контурлық токтар әдісі, тізбек схемасын есептеу үшін бірлесе шығарылатын тәуелсіз теңдеулер санын $K = B - B_J - Y + 1$ дейін азайтуға мүмкіндік береді және Кирхгофтың екінші заңын қолдануға негізделген.

Алдымен ток көздері жоқ тізбек схемасын, яғни $B_J = 0$ кезіндегі есептеулерді, содан соң жалпы жағдайды қарастырайық.

Ток көздері жоқ тізбек схемасы. ток көздері жоқ тізбек схемасын есептеу үшін контурлық токтар әдісі, келесіден тұрады.

1. $K = B - Y + 1$ тәуелсіз контурларды және әрқайсысы сәйкес контурдың барлық элементтері бойымен өтетін, контурлық токтардың оң бағыттарын таңдап аламыз.

Планарлы, яғни тармақтар қиылысуынсыз жазықтықтағы бейнесіне рұқсат ететін схемалар үшін, K тәуелсіз контурларды айрықшалаудың жеткілікті шарты – олардың әрқайсысында тек осы контурға тиесілі бір тармақтың бар болуы.

2. K тәуелсіз контурлар үшін Кирхгофтың екінші заңына сүйеніп, бірлескен шешімдері барлық контурлық токтарды анықтайтын, теңдеулерді құрамыз.

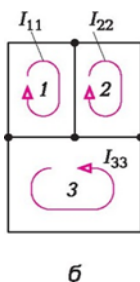
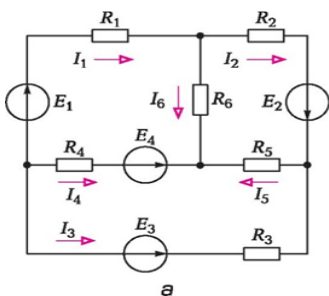
3. Әрбір тармақтың тогын, сәйкес тармақтағы контурлық токтардың алгебралық қосындысы ретінде Кирхгофтың бірінші заңы бойынша анықтаймыз.

$B = 6$ тармағы, $Y = 4$ түйін, $K = B - Y + 1 = 6 - 4 + 1 = 3$ тәуелсіз контурлар санына ие тізбек (2.25-сурет, а) есептелінуін қарастырайық. 1 – 3 тәуелсіз контурларды және олардағы I_{11} , I_{22} және I_{33} контурлық токтардың (2.25-сурет, б) оң бағытын таңдайық.

Кирхгофтың екінші заңына сүйеніп 1, 2 және 3-контурлар үшін теңдеулер жүйесін құрайық:

$$\left. \begin{aligned} (R_1 + R_4 + R_6)I_{11} - R_6I_{22} + R_4I_{33} &= E_1 - E_4; \\ -R_6I_{11} + (R_2 + R_5 + R_6)I_{22} + R_5I_{33} &= E_2; \\ R_4I_{11} + R_5I_{22} + (R_3 + R_4 + R_5)I_{33} &= E_3 - E_4 \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

оның шешімін табу арқылы I_{11} , I_{22} және I_{33} контурлық токтарды анықтаймыз.



2.25-сурет

Оң бағытын таңдап алған кездегі тармақтар тоғын (2.25, а суретін қараңыз) Кирхгофтың бірінші заңы бойынша табамыз:

$$I_1 = I_{11}; I_2 = I_{22}; I_3 = I_{33}; I_4 = -I_{11} - I_{33}; I_5 = I_{22} + I_{33}; I_6 = I_{11} - I_{22}.$$

(2.29)-дан контурлық токтар әдісі бойынша теңдеулер құру қағидасы айқын. Теңдеудің сол жақ бөлігіндегі қарастырылып отырған контурдың контурлық тогы кезіндегі оң коэффициенті оның тармақтарының кедергілерінің қосындысына тең. Қарастырылып отырған контурмен ортақ тармақтарға ие контурлардағы контурлық токтар кезіндегі коэффициенттер, егер ортақ тармақтардағы контурлық токтардың бағыттары сәйкес келетін (қарама-қарсы) болса, плюс (минус) таңбасымен алынған ортақ тармақтардың кедергілерінің қосындысына тең.

Теңдеудің оң жақ бөлігі, қарастырылып отырған контурдың тармақтарының ЭҚК алгебралық қосындысынан тұрады, бұған қоса, егер ЭҚК бағыты мен контурлық токтың оң бағыты сәйкес келетін (қарама-қарсы) болса, қосынды плюс (минус) таңбасымен жазылады.

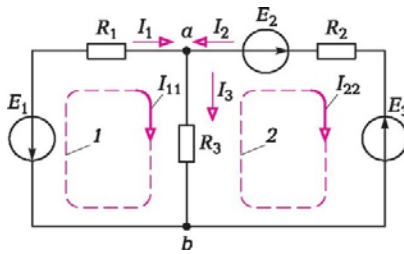
2.6-мысал. Контурлық токтар әдісімен, элементтер параметрлері: $E_1 = 50\text{В}$, $E_2 = 3\text{В}$, $E_3 = 13\text{В}$, $R_1 = R_2 = 20\text{ Ом}$, $R_3 = 10\text{ Ом}$ мәндеріне ие болғандағы, 2.26 суреттегі схемадағы барлық тармақтардағы токтарды анықтау.

Шешімі. Схема $B = 3$ тармақ, $Y = 2$ түйін (a мен b), $K = B - Y + 1 = 2$ тәуелсіз контурлар санынан тұрады.

Тармақтардағы токтардың оң бағыттарын таңдап аламыз және оларды I_1 , I_2 және I_3 деп белгілейміз.

2.26-суретте штрих сызықпен белгіленген, 1 және 2 екі ($K = 2$) тәуелсіз контурларын және ондағы I_{11} , I_{22} контурлық токтарының оң бағыттарын таңдаймыз.

Кирхгофтың екінші заңы бойынша екі ($K = 2$) тәуелсіз теңдеуді құрамыз.



2.26-сурет

$$(R_1 + R_3)I_{11} + R_3I_{22} = -E_1; -R_3I_{11} + (R_2 + R_3)I_{22} = E_2 - E_3$$

немесе

$$\left. \begin{aligned} 30I_{11} - 10I_{22} &= -50; \\ -10I_{11} + 30I_{22} &= -10 \end{aligned} \right\}$$

оларды біріктіріп шешу, контурлық токтардың $I_{11} = -2 \text{ A}$; $I_{22} = -1 \text{ A}$ мәндерін анықтайды.

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша, тармақтардағы ток таңдап алынған оң бағыттарында мынаған тең болады:

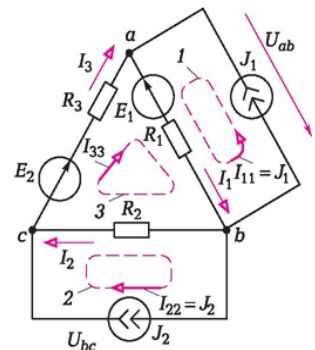
$$I_1 = I_{11} = -2 \text{ A}, I_2 = I_{22} = -1 \text{ A}, I_3 = I_{11} - I_{22} = -1 \text{ A}$$

Кирхгофтың бірінші заңының, мысалы a түйіні үшін орындалатындығын тексеру арқылы шешімнің дұрыстығына көз жеткізуге болады:

$$I_1 + I_2 - I_3 = -2 + 1 + 1 = 0$$

Жалпы жағдай. ЭҚК мен ток көзіне ие схемаларды есептеу кезінде қысқартуларға жол беріледі. ток көзіне ие тармақтарда басқа контурлық токтары жоқ болатындай етіп таңдап алынған контурлық ток бізге мәлім және ток көзінің тогына тең. Сондықтан да, B тармақтары, соның ішінде ток көздеріне ие B_J тармақ бар болатын схемаларда, ток көздері жоқ тәуелсіз контурлардың және оларға сәйкес келетін белгісіз контурлық токтардың саны және теңдеулері $K = B - B_J - Y + 1$ тең.

2.7-мысал. Элементтер параметрлері: $J_1 = 1 \text{ A}, J_2 = 1.5 \text{ A}, E_1 = 5 \text{ B}, E_2 = 15 \text{ B}, R_1 = 1 \text{ Ом}, R_2 = 2 \text{ Ом}, R_3 = 3 \text{ Ом}$ мәндеріне ие, 2.27 суреттегі схемадағы барлық тармақтардағы токтарды контурлық токтар әдісімен анықтау.



2.27-сурет

Шешімі .Схема $B = 5$ тармақтан, соның ішінде ток көздеріне ие $B_J = 2$ тармақтан, $Y = 3$ түйіннен, ток көздері жоқ $K = B - B_J - Y + 1 = 5 - 2 - 3 + 1 = 1$ (контур 3) тәуелсіз контурлардан тұрады.

Кирхгофтың екінші заңы бойынша, барлық контурлық токтардың таңдап алынған оң бағыттарындағы 3-контур үшін теңдеу құрайық:

$$R_1 I_{11} - R_2 I_{22} + (R_1 + R_2 + R_3) I_{33} = E_2 - E_1$$

оның шешімін табу арқылы контур 3-гі контурлық токтарды анықтаймыз

$$I_{33} = \frac{E_2 - E_1 + R_1 I_{11} + R_2 I_{22}}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{15 - 5 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 1,5}{1 + 2 + 3} = 2A$$

мұндағы $I_{11} = J_1$ және $I_{22} = J_2$ — 1 және 2 контурларының белгілі контурлық токтары.

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша таңдап алынған оң бағыттарындағы тармақтардағы токтар:

$$I_1 = I_{11} + I_{33} = 3A, I_2 = I_{33} - I_{22} = 0,5A, I_3 = I_{33} = 2A$$

тең болады.

Кирхгофтың бірінші заңының, мысалы а түйіні үшін орындалатындығын тексеру арқылы шешімнің дұрыстығына көз жеткізуге болады:

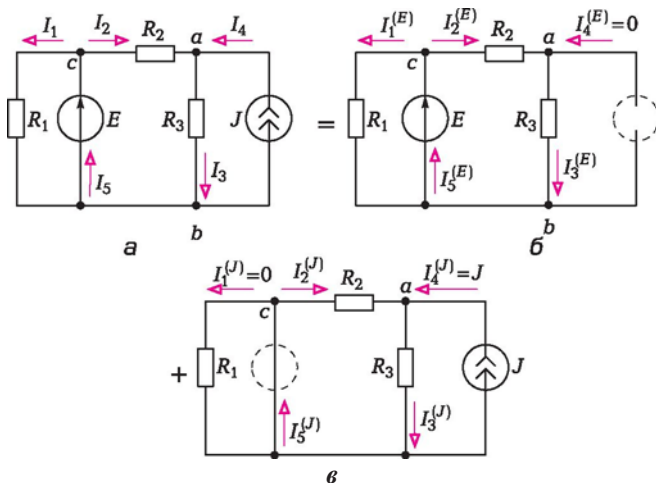
$$I_3 - I_1 + J_1 = 2 - 3 + 1 = 0$$

2.13. ҚАБАТТАСТЫРУ (СУПЕРПОЗИЦИЯ) ПРИНЦИПІ МЕН ӘДІСІ

Қабаттастыру әдісі, сызықтық электр тізбектеріндегі кез-келген тармақтарындағы токтар, егер басқа көздер, көздердің ішкі кедергілеріне тең кедергілері бар резисторлармен алмастырылатын болса, әрбір көздің жеке қызмет етуі кезіндегі, осы тармақтағы (жартылай токтардың) токтардың алгебралық қосындысына теңдігінен тұрады.

Қабаттастыру принципінің негізінде тізбектерді есептеу үшін *қабаттастыру әдісі** (суперпозиция) қолданылады. Тізбек схемасының әрбір тармақтарындағы ток, әрбір $I^{(E)}$ ЭҚК көзі және әрбір $I^{(J)}$ ток көзінің жеке әсерінен алынатын жартылай токтардың алгебралық қосындысына тең.

* Механикада қабаттастыру принципі күш әсерінің тәуелсіздігі: бірнеше күштер әсерінен дене қозғалысы оның әрбір күштің әсерінен туындайтын қозғалысы қосындысына тең принципі деп аталады.



2.28-сурет

Көздердің әсерінің болмауы, оның көздердің ішкі кедергісіне тең кедергіге ие резистивті элементпен алмасытырлғандығын білдіреді. ЭҚК көзі үшін ішкі кедергісі $R_{iuv} = 0$, ток көзі үшін - $R_{iuv} \rightarrow \infty$, яғни схеманың сәйкес бөлігі қысқартылады немесе ажыратылады.

2.8-мысал. Элементтер параметрлерінің мәні: $E = 10$ В, $J = 5$ А, $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 3$ Ом болған кезде, 2.28, а суреттегі тізбек схемасындағы барлық тармақтардағы токтарды қабаттастыру әдісімен анықтау.

Шешімі. Схема $B = 3$ тармақ санын, соның ішінде ток көздеріне ие $B_J = 1$ тармақтан, $Y = 3$ (а, б, с) түйіннен тұрады.

Тармақтардағы токтардың оң бағытын таңдаймыз және оларды I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 деп белгілейміз. Тармақтардағы токтар 2.28, б және в суреттеріндегі схемалардың біраттас тармақтарындағы жартылай токтардың қосындысына тең:

$$I_1 = I_1^{(E)} + I_1^{(J)} = \frac{E}{R_1} + 0 = \frac{10}{5} = 2A$$

$$I_2 = I_2^{(E)} + I_2^{(J)} = \frac{E}{R_2 + R_3} - \frac{R_3 J}{R_2 + R_3} = \frac{10}{2+3} - \frac{3 \cdot 5}{2+3} = -1A$$

$$I_3 = I_3^{(E)} + I_3^{(J)} = \frac{E}{R_2 + R_3} + \frac{R_2 J}{R_2 + R_3} = \frac{10}{2+3} + \frac{2 \cdot 5}{2+3} = 4A$$

$$I_4 = I_4^{(E)} + I_4^{(J)} = 0 + J = 5A$$

$$I_5 = I_5^{(E)} + I_5^{(J)} = I_1^{(E)} + I_2^{(E)} + I_2^{(J)} = 2 + 2 - 3 = 1A$$

Электр энергиясы көздері жоқ, электр тізбегінің $a—b$ тармақталмаған бөлігінің бойымен q оң заряды орын ауыстырған кезде электр өрісі атқаратын жұмыс, осы зарядтың бөліктер ұшындағы $U_{ab} = U$ кернеуге көбейтіндісіне $A = qU$ тең. t уақыт бойы зарядтың бірқалыпты қозғалысы кезінде, яғни бөлік бойымен жылжитын $I_{ab} = I$ тұрақты ток кезінде, заряд:

$$q = It,$$

тең, ал бұл кезде атқарылатын жұмыс мынаған тең болады:

$$A = UI t.$$

Қуат жұмыстың атқарылу жылдамдығына тең

$$P = UI \quad (2.30)$$

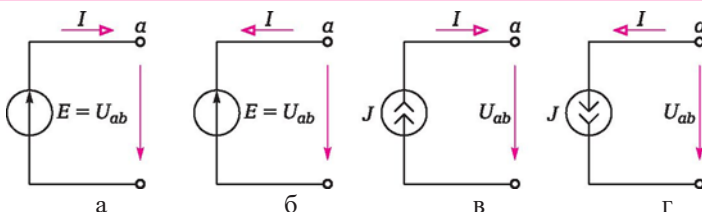
Жұмыстың СИ-дегі негізгі өлшем бірлігі — джоуль (Дж), ал қуаттың өлшем бірлігі — ватт (Вт).

Электр энергиясының негізгі өлшем бірлігі ретінде киловатт-сағ (кВт · сағ), яғни 1 сағ бойы өзгермейтін 1кВт қуат кезінде атқарылатын жұмыс. $1 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 1 \text{ Дж}$ болғандықтан, $1 \text{ кВт} \cdot \text{сағ} = 3\,600\,000 \text{ Дж} = 3,6 \text{ МДж}$ болады.

Резистивті элементтер үшін (2.30)-ды Ом заңын қолдана отырып түрлендіруге болады:

$$P_R = UI = RI^2 = GU^2 \quad (2.31)$$

Оң бағыты токтың таңдап алынған оң бағытымен сәйкес келетін, ЭҚК көзі үшін (2.29-сурет, а), сыртқы күштердің қуаты $P_E = U_{ab}I = EI$. Егер ЭҚК мен токтың бағыты қарама-қарсы болса, онда қуат $P_E = -U_{ab}I = -EI$ (2.29-сурет, б) тең болады. Осыған ұқсас, егер көздегі ток $J = I$ пен оның U_{ab} шықпалары арасындағы кернеу бағыты қарама-қарсы болса (2.29-сурет, в), ток көзінің қуаты $P_J = U_{ab}I = EJ$ тең болады. Кері жағдайда, $P_J = -U_{ab}I = -U_{ab}J$ (2.29-сурет, г).



2.29-сурет

ЭҚК мен токтың идеалды көздері шексіз үлкен қуатты өрістете алады. Әрбір көзге $R_{кс}$ кедергісіне ие қабылдағыш қосайық. Бірінші жағдайда, егер $R_{кс} \rightarrow 0$ болса, онда ток $I \rightarrow \infty$ және қуат $P_E = EI \rightarrow \infty$, екінші жағдайда, егер $R_{кс} \rightarrow \infty$ болса, онда кернеу $U \rightarrow \infty$ және қуат $P_J = UJ \rightarrow \infty$.

ЭҚК мен ток көзінің қуаты оң және теріс мәндерге ие болуы мүмкін, бұл көздің оған қатысты сыртқы тізбекке энергия жіберуіне және осы тізбектен энергия алуына сәйкес келеді.

Кез-келген электр тізбегінде, энергияның барлық көздерінің (соның ішінде ток көздері мен ЭҚК көздерінің) алгебралық қосындысы, барлық энергия қабылдағыштардың (соның ішінде резистивті элементтердің) қуаттарының арифметикалық қосындысына

$$\sum P_K = \sum P_R \quad (2.32)$$

тең болатын, энергетикалық теңгерімі – қуаттар теңгерімі ұсталынуы қажет.

2.9-мысал. 2.1-мысалда шығарылған 2.17-суреттегі тізбек схемасы үшін қуат теңгерімін құру.

Шешімі. Барлық энергия көздерінің қуаттарының алгебралық қосындысы

$$\sum P_K = E_1 I_1 - E_2 I_4 + E_3 I_6 + E_4 I_5 = 1 \cdot 1,5 - 2 \cdot 3,5 + 3 \cdot 5 + 4 \cdot 7 = 37,5 \text{ Вт}$$

тең болады.

Барлық резистивті элементтердің қуаттарының арифметикалық қосындысы

$$\sum P_R = R_1 I^2_1 + R_2 I^2_2 + R_3 I^2_3 = 4 \cdot 1,5^2 + 2 \cdot 3,5^2 + 1 \cdot 2^2 = 37,5 \text{ Вт}$$

тең.

(2.32) бойынша қуаттар теңгерімі қанағаттандырылды.

2.10-мысал. 2.7-мысалда есептелген, 2.27 суреттегі тізбек схемасы үшін қуат теңгерімін құру.

Шешімі. Барлық энергия көздерінің қуаттарының алгебралық қосындысы

$$\sum P_K = E_2 I_3 - E_1 I_1 + U_{ab} J_1 - U_{bc} J_2 = 5 \cdot 2 - 5 \cdot 3 + 8 \cdot 1 - 1 \cdot 1,5 = 21,5 \text{ Вт}$$

тең, (2.12) бойынша мұндағы ток көздеріндегі кернеу $U_{ab} = R_1 I_1 + E_1 = 1 \cdot 3 + 5 = 8 \text{ В}$, $U_{bc} = R_2 I_2 = 2 \cdot 0,5 = 1 \text{ В}$ тең болады.

Барлық резистивті элементтердің қуаттарының арифметикалық қосындысы

$$\sum P_R = R_1 I^2_1 + R_2 I^2_2 + R_3 I^2_3 = 1 \cdot 3,5^2 + 2 \cdot 0,5^2 + 3 \cdot 2^2 = 21,5 \text{ Вт}$$

(2.32) бойынша қуаттар теңгерімі қанағаттандырылады.

2.15. ТҰРАҚТЫ ТОҚТЫҢ СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЭЛЕКТР ТІЗБЕКТЕРІ

Жалпы жағдайда, электротехникалық құрылғылардың алмастыру схемалары, сызықтық резистивті элементтерден басқа сызықтық емес резистивті элементтерден тұрады (2.6-суретті қараңыз).

Сызықтық емес резистивті элемент (түзеткіш диодтар, стабилитрондар, варисторлар және т.б.) тізбекке екі шықпа арқылы қосылады. Оның қасиеттерін $I(U)$ вольт-амперлік сипаттамасы анықтайды (2.30-сурет). ВАС әрбір нүктесі сызықтық емес резистивті элементтің *статистикалық*

$$R_{cm} = U / I$$

және *дифференциалдық*

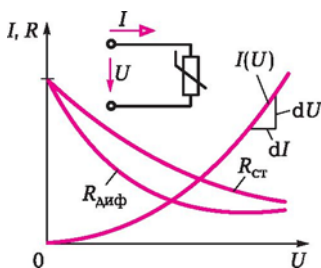
$$R_{diff} = dU / dI$$

кедергісін анықтайды.

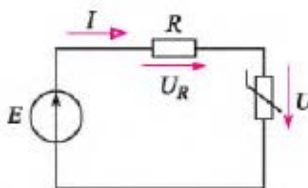
Резистивті элементтердің сызықтық емес қасиеттері түзеткіштер, кернеу стабилизаторлары, күшейткіштер және тағы сол сияқты құралдардың жұмыс істеу негізінде жатыр.

Сызықтық емес тізбектер үшін қабаттастыру қағидасын қолдануға келмейді. Бұл аналитикалық әдістердің, олар негізделген: контурлық токтар, қабаттастыру және тағы басқаларын, тізбекті есептеуде қолданылуын шектейді.

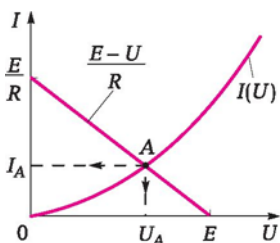
Сызықтық емес резистивті элементтерге ие тізбектерді есептеу графикалық әдістермен жүзеге асырылады.



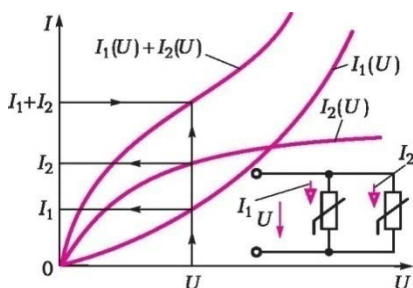
2.30-сурет



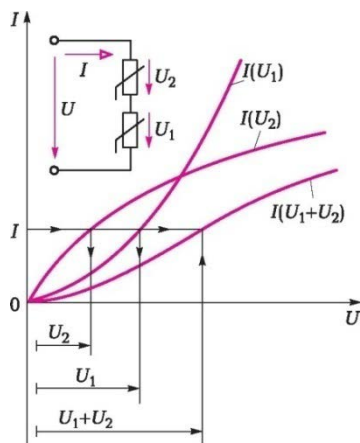
2.31-сурет



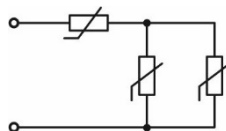
2.32-сурет



2.34-сурет



2.33-сурет



2.35-сурет

ЭҚК көзі, сызықтық R мен сызықтық емес резистивті элементтердің тізбектей жалғанғандағы схемасын қарастырайық (2.31-сурет).

Кирхгофтың екінші заңы бойынша сызықтық резистивті элементтегі кернеу:

$$U_R = E - U \quad (2.33)$$

тең болады, ал Ом заңы бойынша, ток (2.33) ескерсек:

$$I = U_R / R = \frac{E - U}{R} \quad (2.34)$$

(2.34) теңдеуіне *жүктемелік сипаттамасы* деп аталатын, ордината остерінде $U = 0, I = E/R$ және абсцисс остерінде $I = 0, U = E$ токтары арқылы өтетін түзу сызық сәйкес келеді. Сызықтық емес резистивті элементтің *жүктемелік сипаттамасы* мен $I(U)$ ВАС қиылысатын нүктесі, тізбектің жұмыс режимін анықтайды (2.32-сурет): I_A тогы және U_A кернеуі. Жүктемелік сипаттама көмегімен сызықтық емес тізбекті графикалық есептеу әдісін *жүктемелік сипаттама әдісі* деп атайды.

Жүктемелік әдіс сипаттамасы, тізбек ВАС белгілі тізбектей немесе параллелді жалғанған сызықтық емес резистивті элементтерден тұратын жағдайда да жарамды. Ол үшін, бірінші жағдайда сызықтық емес резистивті элементтердің ВАС кернеулері бойынша (2.33-сурет), ал екінші жағдайда – тогы бойынша (2.34-сурет) қосу қажет. Жүктемелік сипаттама әдісімен қорытқы ВАС-да жұмыс нүктесін анықтап алып, ары қарай әрбір сызықтық емес резистивті элементтің тогы мен кернеуін табамыз.

Сызықтық емес резистивті элементері аралас жалғанған тізбек те осыған ұқсас есептелінеді (2.35-сурет).

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Электр тізбегінде ток пен кернеудің шартты оң бағыты деп нені түсінеміз?
2. Кернеу көзі мен ток көзінің қасиеттерін тізіңіз.
3. Электр тізбегінің принципіалды схемасы мен алмастыру схемасының міндегі қандай?
4. Электр тізбегінің: тармақ, түйін, контур алмастыру схемаларына геометриялық түсініктеме беріңіз.
5. Неліктен сызықтық емес электр тізбегін есептеу үшін кабаттасу принципін қолдануға келмейді?

ӨЗІНДІК ШЕШУГЕ АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. Егер 60°C температурада техникалық мыстың (мәліметтерді 2.1-кестеден қараңыз) кедергісі 5 Ом -ға тең болса, температурасы 10°C болғандағы оның кедергісін анықтаңыз.
Жауабы: 4 Ом .
2. 2.6-шы мысалда есептелген, 2.26-суреттегі схеманың қуат теңгерімін анықтаңыз.
Жауабы: $\sum P_{\kappa} = \sum P_R = 110\text{Вт}$.
3. Түйіндік потенциалдар әдісімен, 2.16-суреттегі элементтер параметрінің мәндері $E_1 = 10\text{ В}$, $E_2 = 0,75\text{ В}$, $E_3 = 30\text{ В}$, $R_1 = 5\text{ Ом}$, $R_2 = 2,5\text{ Ом}$, $R_3 = 10\text{ Ом}$ болған кездегі, схемадағы U_{ab} кернеуді анықтаңыз.
Жауабы: -1 В .
4. 2.3-да мысалда есептелген, 2.21, а суреттегі схемадағы $U = 70\text{ В}$ кернеу кезіндегі I_1 токты анықтаңыз
Жауабы: 4 А .

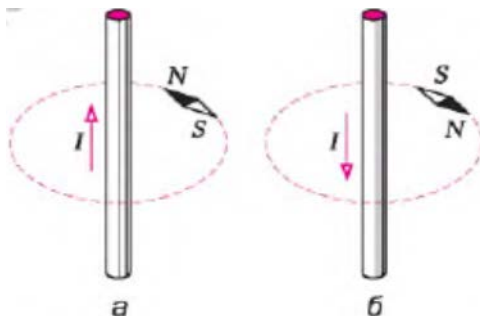
3.1. МАГНИТ ӨРІСІНІҢ НЕГІЗГІ ҚАСИЕТТЕРІ МЕН СИПАТТАМАЛАРЫ

Тоғы бар кез-келген өткізгіш айналасында магнит өрісі бар болады. Бұны тәжірибе жүзінде оңай дәлелдеуге болады.

Егер I тұрақты токқа ие түзу сызықтық өткізгішке магниттік тілшені жақындатсақ, онда тілше өткізгіш осының айналасындағы шеңберге жанама бағыт бойынша орнатылады (3.1-сурет, *а*).

Егер 3.1, *а* суретінде бейнеленген тәжірибеде өткізгіштегі токтың бағытын өзгертсек, онда магниттік тілшенің орналасуы қарама-қарсы бағытқа өзгереді (3.1-сурет, *б*).

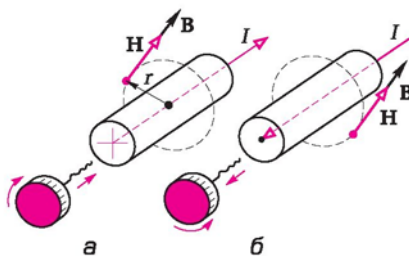
Белгілі бір бағыттағы магниттік тілшенің бағдарлануы, магнит өрісінде ***H*** магниттік кернеулік векторымен анықталатын магниттік күштер әсер ететіндігін білдіреді. Жоғары көрнекілік үшін, өрістің магниттік күштерінің әсерінің кеңістіктік таралымы мен бағыты - тұйықталған *магниттік*, немесе *күш* сызықтары жиынтығымен көрсетіледі. Олардың бағытын магниттік тілшенің *N* солтүстік полюсі көрсетеді.



3.1-сурет



3.2-сурет



3.3-сурет

Тоғы бар түзу сызықтық өткізгіштер үшін магниттік сызықтары концентрлік шеңберлердің жиынтығынан тұрады. Бұған қарапайым тәжірибемен көз жеткізуге болады. Темір үгінділері магнит өрісінде магниттеліп, тоғы бар түзу сызықтық өткізгіштің осыне перпендикулярлы жазықтықта, өткізгіш айналасындағы концентрлік шеңберлер бойынша орналасады (3.2-сурет).

Тоғы бар түзу сызықтық өткізгіштің магнит өрісінің күш сызықтарының бағыттарын бұрғы ережесі бойынша анықтайды. Өткізгіштің көлденең қимасын шеңбермен, ал өткізгіштегі ток бағытын – айкасқан сызықтармен немесе нүктемен (3.3-сурет, а және б), яғни ток бағытымен сәйкес келетін бағыттауыш түзудің ұшы немесе соңымен бейнелейік.

Бұрғы ережесі. Бұрғының ток бағытымен ілгерілемелі қозғалысы кезінде оның сабының айналу бағыты токтың магнит өрісінің күш сызықтарың бағытымен сәйкес келеді.

Магнит өрісінің кернеулігі, тоғы бар өткізгіш орналасқан заттың магниттік күйін өзгертеді. Магнит өрісінің элементар көздері (зат атомдары мен молекулалары тоғы) магниттік тілше секілді **H** кернеулік векторының бағыты бойынша бағдарланады. Зат *магниттеледі*, ал ондағы магнит өрісі, **H** магниттік кернеулік векторынан өзге, *магниттік индукция* векторы

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} = \mu_a \mathbf{H} \quad (3.1)$$

ретінде де анықталады, мұндағы $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ — магнит тұрақтысы; μ_0 — заттың салытырмалы магниттік өткізгіштігі (өлшемсіз шама); $\mu_0 = \mu_r \mu_0$ — абсолютті магниттік өткізгіштік. Вакуум үшін $\mu_0 = 1$.

Диаманитті ($\mu_0 < 1$), параманитті ($\mu_0 > 1$) және ферромагнитті ($\mu_0 \gg 1$) заттар деп бөлінеді. Соңғыларының салыстырмалы магниттік өткізгіштігі бірден айтарлықтай көп, және де магнит өрісінің кернеулігіне байланысты болады.

Кейбір ферромагнетиктер (темір, никель, кобальт пен басқа да элементтер) тұрақты ток жоқ болған кезде де өздерінің магниттілігін сақтап қалады. Олардан тұрақты магниттерді жасайды.

Тұйықталған контурмен шектелген бет арқылы өтетін **B** магниттік индукция векторының магниттік сызықтарының жиынтығы **F** магниттік ағын деп аталады.

Магнит өрісінің кернеулігінің СИ-дегі негізгі өлшем бірлігі— *ампердіметрге бөлу* (А/м); индукцияның өлшем бірлігі — *тесла* (Тл): $1 \text{ Тл} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}/\text{м}^2$; ағын өлшем бірлігі — *вебер* (Вб): $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$.

Тоғы бар өткізгіш түрлі пішіндерге мысалы дөңгелек (орам) түріне ие бола алады. Бірнеше тізбектей жалғанған орамдар *катушканы* түзеді. тоғы бар орам мен катушка айналасында, мысалға электромагниттерде қолданылатын магнит өрісі қоздырылады.

3.2.

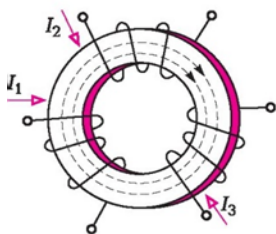
МАГНИТТІК ТІЗБЕК ЭЛЕМЕНТТЕРІ

Магниттік тізбек (магнит өткізгіш) деп электротехникалық құрылғылардың түрлі ферромагниттік және ферромагниттік емес бөліктерінің қажетті конфигурациялардағы және жиіліктегі магнит өрістерін туындатуға арналған жиынтығы. Электротехникалық құрылғылардың жұмыс істеу принципіне байланысты магнит өрісі, тұрақты магнитпен, немесе магниттік тізбектің қандайда бір бөлігінде орналасқан тоғы бар катушкамен қоздырылуы мүмкін.

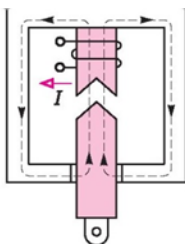
Қарапайым магниттік тізбектерге біртекті ферромагниттік материалдан жасалынған тороид жатады (3.4-сурет). Мұндай магнит өткізгіштер көпорамды трансформаторларда қолданылады.

3.5-суретте электромехникалық құрылғының күрделірек магниттік тізбегі көрсетілген, оның қозғалмалы бөлігі катушкадағы тұрақты (немесе айнымалы) ток кезінде электромагнитке тартылады. Тартылыс күші магнит өткізгіштің қозғалмалы бөлігінің орналасуына байланысты болады.

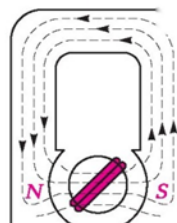
3.6-суретте магнит өрісі тұрақты магнитпен қоздырылатын магниттік тізбек бейнеленген. Егер ферромагнитті цилиндрде орналасқан қозғалмалы катушка тұрақты ток тізбегіне енгізілген болса, онда оған айналу моменті әсер етеді. Тоғы бар катушканы бұру арқылы магниттік тізбектің магнит өрісіне ешқандай әсер етпейміз.



3.4-сурет



3.5-сурет



3.6-сурет

Мұндай магниттік тізбек, мысалға магнит-электрлік жүйені өлшеу құралдарында бар болады.

Шектелген көлемдегі магнит өрісінің шоғырлануы құрылғылардың жұмыс сипаттамаларын жақсартуға: катушкалардың магниттік әсерлесуін арттыруға (3.4-суретті қараңыз), тарту күшін көбейтуге (3.5-суретті қараңыз), бос ауа кеңістігінде магнит өрісінің біртектігін арттыруға (3.6-суретті қараңыз) мүмкіндік береді.

Қарастырылған магниттік тізбектер, басқа да мүмкін құрылымдарды секілді, тізбектің кез-елген қимасындағы магнит ағыны бірдей болатын, *тармақталмаған магниттік тізбектерге* (3.4 және 3.6-суреттерді қараңыз) және тізбектің әртүрлі қималарындағы магнит ағындары түрлі болатын *тармақталған магниттік тізбектерге* (3.5-суретті қараңыз) бөлуге болады. Жалпы жағдайда тармақталған магниттік тізбектер, мысалға электр қозғалтқыштарында, генераторларда және басқа да құрылғыларда күрделі конфигурациялы болуы мүмкін.

Электр тізбегіне (2.2-бөлімшені қараңыз) ұқсас магниттік тізбектер үшін «тармақ», «түйін», «контур» түсініктері қолданылады.

Көп жағдайларда магниттік тізбекті сызықтық емес деп, тек белгілі бір рұқсаттарда және белгілі жұмыс режимінде ғана – сызықтық деп есептеген жөн.

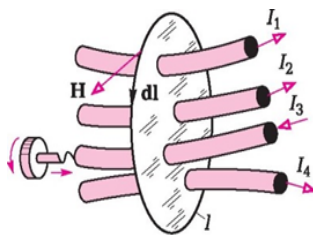
3.3. ТОЛЫҚ ТОК ЗАҢЫ. МАГНИТТІК ТІЗБЕК КҮЙІНІҢ ТЕҢДЕУІ

Толық ток заңы. *Кез-келген тұйықталған контур (вектор циркуляциясы) бойынша магнит өріс кернеулігінен алынған интеграл, осы контурмен ілістірілген токтардың алгебралық қосындысына тең:*

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum I = F$$

(3.2)

сонымен қатар, егер бұрғы сабының айналымы сағат тілінің бағыты бойынша контурды айналу бағытына сәйкес, бұрғының ілгерілемелі қозғалысымен бағыты сәйкес келетін (бұрғы ережесі), токтарды оң деп санауға болады. Дара жағдайда 3.7-суреттегі контур үшін толық ток заңы бойынша:



3.7-сурет

$$\oint H dl = I_1 + I_2 - I_3 + I_4.$$

(3.2)-гі $\sum I$ шамасы l тұйықталған контурдағы *магниттік қозғаушы күш* (МҚК) деп аталады.

МҚК-ң СИ-дегі негізгі өлшем бірлігі — *ампер* (А).

Егер ұзындығы l тұйықталған контурдағы әрбір нүктеде H магнит өрісінің кернеулігі контурға қатысты жанама бағытталған және тұрақты болса, онда толық ток заңы келесі түрді қабылдайды:

$$HI = \sum I \quad (3.3)$$

3.1-мысал. $I = 3$ А тұрақты токқа ие түзу сызықтық өткізгіштен $r = 1$ м арақашықтықтағы магнит өріс кернеулігін анықтаңыз (3.3, a суретін қараңыз).

Шешімі. Шеңбердің осынен $r = 1$ м қашықтықтағы әрбір нүктесіндегі магнит өрісінің кернеулігі тұрақты және (3.3) бойынша:

$$H = I/l = 3/6,28 = 0,477 \text{ А/м},$$

тең, мұндағы $l = 2\pi r = 2 \cdot 3,14 \cdot 1 = 6,28$ м — шеңбер ұзындығы.

Көптеген электротехникалық құралдардың магниттік тізбегін, әрқайсысының шегінде магнит өрісін біртекті, яғни тұрақты кернеулікке ие деп санауға болатын, ұзындығы l_k бөлігінің орта сызығының бойындағы H_k магнит өрісіне тең, бөліктер жиынтығынан тұрады деп қарауға болады.

Егер бұл ретте магнит өрісі, w орамы бар I тогына ие катушкамен қоздырылатын болса, онда орамдарға тіркестірілген және n бөліктерден тұратын магниттік тізбек контуры үшін (3.2) орнына:

$$\sum_{k=1}^n H_k I_k = Iw$$

деп жазуға болады. Егер контур тогы бар катушканың m орамымен тіркестірілген болса, онда:

$$\sum_{k=1}^n H_k I_k = \sum_{p=1}^m I_p w_p \quad \text{немесе} \quad \sum_{k=1}^n U_{mk} = \sum_{p=1}^m F_p \quad (3.4)$$

мұндағы $F_p = I_p w_p$ — МҚК; $U_{mk} = H_k l_k$ — магниттік тізбек бөлігінің *магниттік кернеуі*.

Осылайша, толық ток заңы бойынша, *магниттік тізбектің кез-келген контурының МҚК алгебралық қосындысы оның бөліктерінің магниттік кернеулерінің алгебралық қосындысына тең*, бұл тұрақты токты электр тізбектеріне арналған Кирхгофтың екінші заңы (2.11) шамаларының белгіленуіне ұқсас.

Тұрақты токтың электрлік тізбегімен салыстырылуын жалғастыра отырып, оның магниттік кернеуінің ондағы магниттік ағынға қатынасы түріндегі

$$U_M = R_M \Phi \quad (3.5)$$

магниттік тізбек бөлігінің *магниттік кедергісі* түсінігін енгіземіз, бұл Ом заңының (2.1) шамаларының белгіленуіне дейін тура ұқсас болып келеді.

Сонымен, магниттік сызықтардың үздіксіздігі есебінен, *магниттік тізбек түйініндегі магниттік ағындардың алгебралық қосындысы нөлге тең*:

$$\sum_{k=1}^n \Phi = 0 \quad (3.6)$$

мұндағы n — түйіндерде жалғанатын тармақтар саны, бұл тұрақты токты электр тізбектеріне арналған Кирхгофтың бірінші заңы (2.9) шамаларының белгіленуіне тура ұқсас.

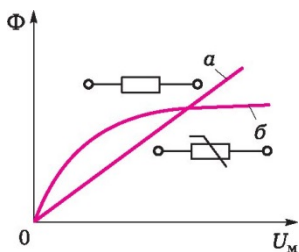
Магниттік тізбек күйлерінің теңдеуі (3.4) — (3.6), оны тұрақты ЭҚК мен сызықтық және сызықтық емес магниттік резистивті элементтер көзінің жиынтығынан тұратын, алмастыру схемасымен бейнелеуге мүмкіндік береді.

Сызықтық магниттік резистивті элемент, магниттік ағыны магниттік кернеуге пропорционалды болатын, магниттік тізбек бөліктерінің алмастыру схемасы болып табылады. Оның параметрі ретінде магниттік кедергі $R_M = \text{const}$ қызмет атқарады.

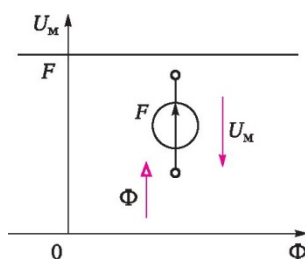
Сызықтық емес магниттік резистивті элемент, магниттік ағынның магниттік кернеуден тәуелділігі сызықтық емес болатын және сызықтық емес $\Phi(U_M)$ вебер-амперлік сипаттамасымен берілетін магниттік тізбек бөлігінің алмастыру схемасы болып табылады.

Магниттік кедергінің СИ-дегі негізгі өлшем бірлігі — *ампердің веберге қатынасы* (А/Вб): $1 \text{ А/Вб} = 1 \text{ А}/(\text{В} \cdot \text{с}) = 1 (\text{Ом} \cdot \text{с})^{-1}$.

3.8-суретте алмастыру схемаларындағы сызықтық (a сызығы) және



3.8-сурет



3.9-сурет

сызықтық емес (*б* сызығы) магниттік резистивті элементтердің, ал 3.9-суретте – тұрақты МҚК көзінің шартты белгілері мен вебер-амперлік сипаттамалары келтірілген.

3.4. ФЕРРОМАГНИТТІК МАТЕРИАЛДАРДЫҢ МАГНИТТІК ҚАСИЕТТЕРІ

Ферромагниттік материалдардың магниттік қасиеттерін тәжірибелік зерттеу үшін, барлық өлшеу жұмыстарын магнит өрісі біртекті үлгіде жүргізу қажет. Осындай үлгі ретінде тороидты қарастыруға болады (3.10-сурет), ондағы магниттік сызықтар ұзындығы оның көлденең өлшемдерінен айтарлықтай көп және w орамдар санына ие орамалар бірқалыпты оралған.

Жұқа қабырғалы тороидтағы магнит өріс кернеулігін және магнит өрісінің индукциясын есептеу кезінде, барлық магниттік сызықтар, ортаңғы сызықтың $2\pi r$ ұзындығына тең, бірдей ұзындыққа ие. 3.10 суретте оның бір нүктелеріндегі орташа магниттік сызық пен $\mathbf{H}$ кернеулік және $\mathbf{B}$ индукция векторы көрсетілген.

Жұқа қабырғалы тороидтың ферромагниттік материалы толығымен магнитсізделген жөн орамада ток жоқ ($B = 0$ және $H = 0$) деп болжайық. Егер орамадағы I тұрақты токты ақырындап арттыратын болсақ, онда ферромагниттік материалда толық ток заңы (3.3) бойынша кернеулікке ие магнит өрісі туындайды:

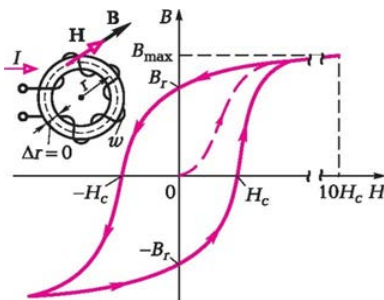
$$H = Iw/2\pi r. \quad (3.7)$$

Жұқа қабырғалы тороидтың магнит өрісінің әрбір H кернеулік мәніне ферромагниттік материалдың белгілі бір магниттелуі, демек, B магниттік индукцияның сәйкес мәндері сәйкес келеді.

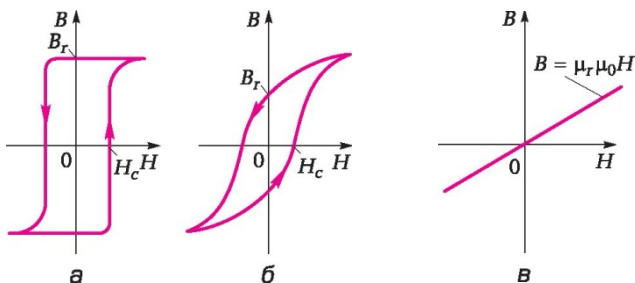
Егер жұқа қабырғалы тороидтың материалының бастапқы магниттік күйі $H = 0$, $B = 0$ мәндерімен сипатталатын болса, онда токтың бірсарынды өсуі кезінде, *бірінші ретті магниттелу қисығы* (3.10-суретті қараңыз, штрих сызық) деп аталатын $B(H)$ сызықтық емес тәуелділігін аламыз. Магнит өрісінің H кернеулігінің қандайда бір мәндерінен бастап, жұқа қабырғалы ферромагниттік тороидтағы B индукциясы тіптен өсуін тоқтатып, $B_{\max}$ тең болып қалады. Бұл $B(H)$ тәуелділік аумағы *техникалық қанығу аумағы* деп аталады.

Егер қанығуға қол жеткізіп, орамадағы тұрақты токты бірсарынды азайта бастасақ, яғни өрістің кернеулігін азайтсақ (3.7), онда индукция да азая бастайды. Алайда, $B(H)$ тәуелділігі енді бірінші ретті магниттелу қисығымен сәйкес келмейді. Орамадағы ток бағытын өзгертіп және оның мәнін арттырып, жаңа $B(H)$ тәуелділік аумағын аламыз. Магнит өрісінің айтарлықтай теріс мәндерінде ферромагниттік материалдың техникалық қанығуы қайта орын алады. Егер тәжірибені жалғастыратын болсақ: алдымен кері бағыт тоғын азайтып, содан кейін тура бағыттағы токты қанығуға дейін арттырсақ және т.с.с., онда қайта магниттелудің бірнеше циклінен кейін $B(H)$ тәуелділігі үшін симметриялы қисықты аламыз (3.10-суретті қараңыз, тұтас сызық) Бұл тұйықталған $B(H)$ циклі ферромагниттік материалдың *шектік статикалық гистерезис ілмегі* (немесе шектік статикалық гистерезис циклі) деп аталады. Егер симметриялық қайта магниттеу кезінде техникалық қанығу аумағына қол жеткізілмейтін болса, онда $B(H)$ симметриялық қисығы ферромагниттік материалдың *симметриялы дарагистерезис ілмегі* деп аталады.

Ферромагниттік материалдардың шектік статикалық гистерезис циклы: H_c – *коэрцитивті күш*; B_r – *қалдық индукциясы* және $k = B_r/B_{H=10H_c}$ – *тікбұрыштық коэффициенті* параметрлерімен сипатталады (3.10-суретті қараңыз).



3.10-сурет



3.11-сурет

H_c коэрцитивті күштерінің мәндері бойынша ферромагниттік материалдар екі топқа бөлінеді:

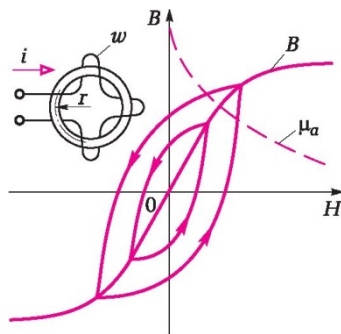
- *магнитті-жұмсақ* — коэрцитивті күштерінің мәндері өте аз магниттік материалдар ($H_c < 50—100$ А/м);
- *магнитті-қатты* — коэрцитивті күштерінің мәндері өте үлкен магниттік материалдар ($H_c > 20—30$ кА/м).

Магнитті-қатты материалдар тұрақты магниттерді дайындауға, ал магнитті-жұмсақ — шектік немесе дара циклдер бойынша қайта магниттелу тәртібінде жұмыс жасайтын электротехникалық құралдарды даярлау үшін қолданылады.

Магнитті-жұмсақ материалдар үш типке бөлінеді

- тікбұрышты шектік статикалық гистерезис ілмегімен (ТШГ, тікбұрыштық коэффициенті $k \sim > 0,95$) (3.11-сурет, а);
- тікбұрышты емес шектік статикалық гистерезис ілмегімен (ТШГ, $0,4 < k \sim < 0,7$) (3.11-сурет, б);
- $B(H)$ тәуелділігі сызықтық дерлік болатын, сызықтық қасиеттерге ие: $B = \mu_r \mu_0 H$ (3.11-сурет, в).

Магнитті-жұмсақ магниттік сипаттамаларының барлық типтері, ферромагнитті қорытпалардан немесе ферромагнитті керамикадан (ферритерден) жасалынған үлгілерде алынуы мүмкін. Ферромагниттік қорытпаларға қарағанда ферритердің ең құнды қасиеті — олардың жоғары меншікті электрлік кедергісі.



3.12-сурет



Литая сталь – құйылған болат; Чугун – шойын; Листовая сталь – табак болат
3.13-сурет

ТШГ ие ферромагниттік материалдардан жасалынған магниттік өткізгіштер автоматака құралдарында, ал ТЕШГ ие – электрлік машиналарда және аппараттарда қолданылады, олардың магниттік өткізгіштері көбінесе симметриялы дара циклдер бойынша қайта магниттелу тәртібінде жұмыс атқарады.

Осындай магниттік өткізгіштерді есептеу кезінде, жұқа қабырғалы ферромагниттік тороидтардың, орамадағы төменгі жиілікті синусоидалық ток кезіндегі симметриялық дара циклдерінің шындырының геометриялық орынын бейнелейтін (3.12-сурет), ферромагниттік материалдың *магниттелуінің негізгі қисығын* қолданады.

Ферромагниттік материалды магниттеудің негізгі қисығы бойынша абсолютті магниттік өткізгіштің магнит өрісінің H кернеулігінен тәуелділігін анықтайды (3.12-суретті қараңыз, штрих сызық):

$$\mu_a = B / H \quad (3.8)$$

3.13-суретте, электр машиналарда, трансформаторларда және басқа да құрылғыларда қолданылатын кейбір электротехникалық болаттардың, шойынның және пермаллойдың магниттелуінің негізгі қисықтары келтірілген.

Сызықтық қасиеттері бар ферромагниттік материалдардан жоғары төзімділікке ие тербелмелі контурлардың индуктивтілік катушкаларының магниттік өткізгіштері даярланады. Мұндай контурларды, мысалы, радиотезникалық құрылғыларды (қабылдағыштарда, таратқыштарда) қолданады.

Тармақталмаған магниттік тізбекті есептеудің міндеті, көп жағдайда, магниттік өткізгіштің (көбінесе бос ауа кеңістігінде) қандайда бір бөлігіндегі магниттік ағынның немесе магниттік индукциясының берілген мәндерін алу үшін қажет болатын, $F = Iw$ МҚК анықтау болып табылады.

3.14-суретте тармақталмаған магниттік тізбектің – бос ауа кеңістігіне ие магниттік өткізгіш мысалы келтірілген және көлденең қимасының ауданы S_1 ферромагниттік материалдан жасалынған орташа магниттік сызықтың ұзындығы l_1 мен көлденең қимасының ауданы S_2 бос ауа кеңістігінің ұзындығы l_2 (3.14-суретте көрсетілмеген) берілген. Ферромагниттік материалдың магниттік қасиеттері $B(H)$ магниттеудің негізгі қисығы (3.12-суретті қараңыз) және сонымен (3.8) бойынша $\mu_a(H)$ тәуелділігі арқылы берілген.

(3.4)-ші толық ток заңы бойынша:

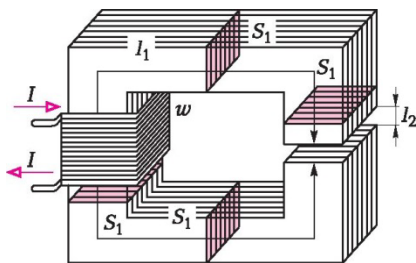
$$\sum_{k=1}^2 H_k I_k = H_1 I_1 + H_2 I_2 = U_{M1} + U_{M2} = Iw = F \quad (3.9)$$

тармақталмаған магниттік өткізгіштің кез-келген көлденең қимасындағы магниттік ағынның тұрақтылығынан шығатыны

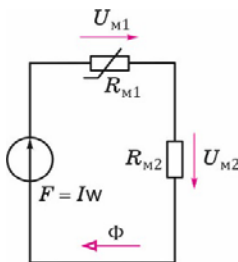
$$\Phi = B_1 S_1 = B_2 S_2, \quad (3.10)$$

мұндағы H_1 , B_1 мен H_2 , B_2 — ферромагнитті материал мен бос ауа кеңістігінен тұратын магнит өрісі кернеулігі мен магниттік индукциясы.

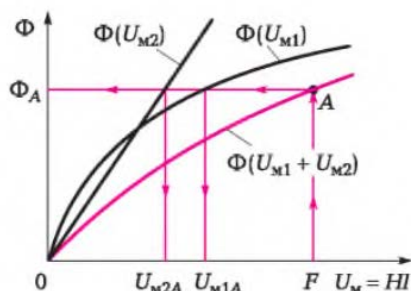
Сызықтық және сызықтық емес резистивті магнит элементтерге (3.8-суретті қараңыз) сызықтық емес $\Phi(U_{M1})$ және сызықтық $\Phi(U_{M2})$ вебер-амперлік сипаттама (3.16-сурет) сәйкес келетін тармақталма-



3.14-сурет



3.15-сурет



3.16-сурет

$$R_{M1} = \frac{U_{M1}}{\Phi} = \frac{H_1 L_1}{B_1 S_1} = \frac{I_1}{\mu_a(U_{M1}) S_1};$$

$$R_{M2} = \frac{U_{M2}}{\Phi} = \frac{H_2 L_2}{B_2 S_2} = \frac{I_2}{\mu_0 S_2} = \text{const.}$$

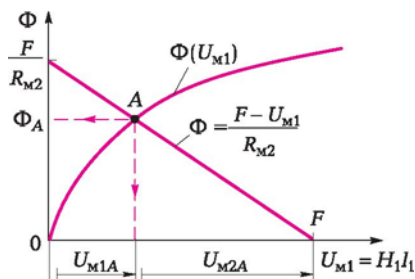
ған магниттік тізбекке (3.14-суретті қараңыз) алмастыру схемасы (3.15-сурет) (3.9) және (3.5) теңдеулеріне сәйкес келеді.

3.15-суреттегі тармақталмаған магниттік тізбектің алмастыру схемасы, элементтері тізбектей жалғанған тұрақты токты сызықтық емес электр тізбегінің алмастыру схемасының элементтерінің параметрлерін белгілеуге дейін ұқсас (2.31-суретті қараңыз).

Демек, тұрақты МҚК ие тармақталмаған магниттік тізбектерді (сонымен қатар, тармақталған магниттік тізбектерді де) талдау үшін тұрақты токты сызықтық емес электр тізбегін есептеудің барлық графикалық әдістерін қолдануға болады (2.15-бөлімшені қараңыз).

Тармақталмаған магниттік тізбекті есептеу үшін (3.14-суретті және 3.15-суреттегі алмастыру схемасын қараңыз) вебер-амперлік сипаттамаларды және жүктемелік сипаттамаларды қосу әдістерін қолданайық.

Бірінші әдіске сәйкес, бүкіл тармақталмаған магниттік тізбектің $\Phi(U_{M1} + U_{M2})$ вебер-амперлік сипаттамасын, оның екі бөлігінің вебер-амперлік сипаттамасын магниттік кернеуі бойынша графикалық қосу арқылы тұрғызайық (3.16-суретті қараңыз). Белгілі МҚК кезінде $F = I\omega$ бүкіл магниттік тізбектің вебер-амперлік сипаттамасы бойынша А жұмыс нүктесін, яғни Φ_A магниттік ағынын, ал магниттік өткізгіштің бөліктерінің вебер-амперлік сипаттамасы бойынша – олардың әрқайсысындағы магниттік кернеуді анықтайық.



3.17-сурет

Екінші әдіске сәйкес,

$$\Phi = U_{M2} / R_{M2} = (F - U_{M1}) / R_{M2},$$

тендеуі бойынша жүктемелік сипаттаманы (3.17-сурет), яғни абсцисс осында F нүктесі және ординат осында F/R_{M2} нүктесі арқылы өтетін түзуді тұрғызайық. Жүктемелік сипаттаманың $\Phi(U_{M1})$ тізбектің ферромагниттік бөлігінің веббер-амперлік сипаттамасымен A қиылысу нүктесі тізбектегі Φ_A магниттік ағынын және U_{M1A} ферромагниттік бөліктегі және U_{M2A} бос ауа кеңістігіндегі магниттік кернеуді анықтайды. Бос ауа кеңістігіндегі индукцияның мәні $B_{2A} = \Phi_A/S_2$.

3.6.

ЭЛЕКТРМАГНИТТІК КҮШТЕР

Магнит өрісіне орнатылған тогы бар өткізгішке, бағытын: алақанды магнит өрісіндер бағытына қарсы орналастырып, ток бағытында өткізгіш бойымен төрт саусақты шығару қажет, сонда бас бармақ өткізгішке әсер ететін күштің бағытын көрсететін, *сол қол ережесімен* (3.18-сурет) анықтайтын күш әсер етеді. Бұл күш ток пен магнит өрісінің өзара әсерлерінің салдары болып табылатындықтан, оны *электрмагниттік күш* деп атайды.

Электрмагниттік күш I токтың, B магнит индукциясының және магнит өрісінде орналасқан өткізгіштің l ұзындығының көбейтіндісіне тең. Ол сонымен қатар, B магниттік индукция векторының бағытына қатысты тогы бар өткізгіштің бағытына да тәуелді.

Егер ұзындығы l түзу сызықтық өткізгіш I тогы бағытында, өзі орналасқан біртекті магнит өрісінің магниттік сызықтарымен α бұрыш түзетін болса, онда өткізгішке әсер ететін электрмагниттік күш:

$$F = BIl \sin \alpha \quad (3.11)$$

тең болады.

Егер өткізгіш өрістің магниттік сызықтарының бағытына перпендикуляр орналасса, яғни. $\sin \alpha = 1$ (3.18-сурет) болса, бұл көптеген электр машиналары мен аппараттарда орын алатын жағдай, онда

$$F = BIl \quad (3.12)$$

СИ-де электрмагниттік күшті магниттік индукцияның бірлігін — тесла (Тл) анықтау үшін қолдануға болады. 1Тл, 1 м ұзындыққа және 1 А токқа ие түзу сызықтық өткізгішке 1Н күш әсер ететін, біртекті магнит өрісінің индукциясына тең. Бұл ретте өткізгіштің бағыты магниттік сызықтар бағытымен $\alpha = \pi / 2$ бұрышын түзеді.

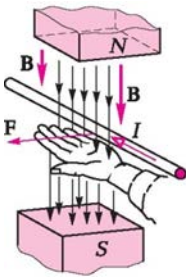
Электрмагниттік күштер айналу моментін түзу үшін барлық электрқозғалтқыштарында қолданылады. Олар генераторларда, бірінші ретті қозғалтқыш өте алатын тежеуіш моментін тудырады. Сонымен қатар электрмагниттік күштер тогы бар әртүрлі өткізгіштер арасында, мысалы екі өткізгішті желінің 1-ші және 2-ші өткізгіштері арасында да туындайды (3.19-сурет).

Толық ток заңы (3.3) бойынша, 1-ші өткізгіштің осынен a арақашықтықта, осы өткізгіштің сымы тудыратын магнит өрісінің кернеулігі:

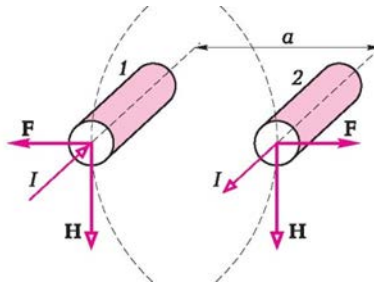
$$H = I / 2\pi a$$

магниттік индукциясы —

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$



3.18-сурет



3.19-сурет

1-өткізгіш өрісінің магниттік сызықтары 2-өткізгіштің бағытына перпендикуляр. Демек, 2-ші өткізгішке

$$F = BIl = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi a}$$

электрмагниттік күші әсер етеді.

Осындай, бірақ қарама-қарсы бағыттағы күш 2-өткізгіштегі токтың магнит өрісінің 1-өткізгішке әсерінен туындайды. Екі күштің де әсер ету бағыты сол қол ережесімен анықталады (3.18-суретті қараңыз). Токтардың қарама-қарсы бағытталуы кезінде өткізгіштер бірін-бірі тебеді, келісілген кезде – тартылады.

Электротехникалық құрылғылардың қалыпты жұмыс жағдайында электрмагниттік күштер салыстырмалы түрде аз. Алайда, тізбектегі қысқаша тұйықталу кезінде токтар жүз есе, ал ток квадратына пропорционалды электрмагниттік күштер – он мыңдаған есе артады. Бұл құрылғылардың бұзылуына әкелуі мүмкін.

3.7.

ЭЛЕКТРМАГНИТТІК ИНДУКЦИЯ

Электрмагниттік индукция заңы көптеген тәжірибелер негізінде шығарылған.

Біртекті магнит өрісінде **B** магниттік индукция векторына перпендикуляр ұзындығы *l* өткізгіш орналасқан деп алайық. Вольтметрге қосылған, қозғалмайтын бағыттауыштар бойымен тұрақты *v* жылдамдықпен өткізгіштің алдымен бір (3.20-сурет, *a*), содан кейін қарама-қарсы (3.20-сурет, *б*) бағытта жылжуы кезінде, вольтметрдің көрсеткіші тепе-теңдік күйінен алдымен бір, содан кейін қарама-қарсы жаққа қарай ығысады.

Демек, магнит өрісінде қозғалатын өткізгіш, *индукцияланған* деп аталатын ЭҚК көзі болып табылады.

Электрмагниттік индукция заңы. *Біртекті магнит өрісінде орналасқан, B магниттік индукция векторына перпендикуляр және v жылдамдығымен қозғалып келе жатқан, ұзындығы l түзу сызықтық өткізгіште ЭҚК индукцияланады, оның мәні мынаған тең:*

$$E = Blv \quad (3.13)$$

Бұл ретте ЭҚК бағыты: алақанды магниттік сызықтар бағытына қарсы қойып, бас бармақты өткізгіш қозғалысының бағытымен бағыттау қажет, сонда созылған төрт саусақ өткізгіште индукцияланған ЭҚК бағытын көрсететін *оң қол ережесімен* (3.21-сурет) анықталады.

Егер ұзындығы l түзу сызықтық өткізгіш, өзі v жылдамдықпен қозғалып келе жатқан, біртекті магнит өрісінің B магниттік индукциясы бағытымен α бұрышын түзсе, ендеше ондағы индукцияланған ЭҚК

$$F = Blv \sin \alpha \quad (3.14)$$

тең болады.

Электрмагниттік индукция заңын басқа формуламен де өрнектеуге болады. Φ магниттік ағынымен тіркестірілген тұйықталған контурда ЭҚК индукцияланады, оның мәні

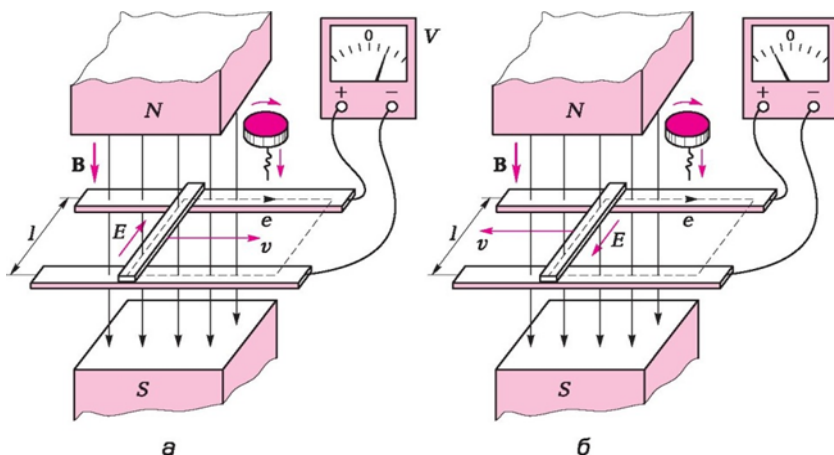
$$e = -d\Phi / dt \quad (3.15)$$

тең.

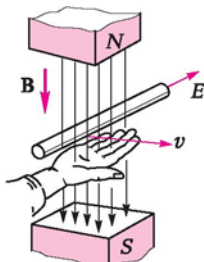
Бұл ретте ЭҚК бағыты бұрғы ережесімен анықталады: бұрғының магниттік сызықтар бойымен ілгерілемелі қозғалысы кезінде оның сабының айналу бағыты индукцияланған ЭҚК бағытын анықтайды.

Мысалы, 3.20, *a* және *б* суреттеріндегі тәжірибелерде, штрихты сызықтармен белгіленген контурлармен тіркестірілген магниттік ағындардың жылдамдығы $d\Phi/dt = -Blv$ (ағын азаяды) және $d\Phi/dt = Blv$ (ағын артады) тең, ал индукцияланған e ЭҚК бағыттары бұрғы ережесі бойынша осы контурларда бағыттауыш сызықтармен берілген.

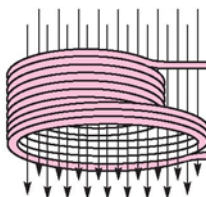
Электрмагниттік индукциясының заңының екі тұжырымы да бірдей сандық нәтиже береді. Алайда, (3.13) формуласы өткізгіштегі E ЭҚК индукцияланатын бөлігін анықтайды, ал (3.15) формуласы – анықтамайды.



3.20-сурет



3.21-сурет



3.22-сурет

3.2-мысал. 3.20, б суреттегі, $l = 1$ м, $v = 2$ м/с, $B = 0,5$ Тл параметрлері кезіндегі, қозғалып келе жатқан E өткізгіште және e тұйықталған контурда индукцияланған ЭҚК мәні мен әсерінің бағытын салыстырыңыз.

Шешімі. Қозғалып келе жатқан өткізгіште, оң қол ережесі бойынша әсер етуді бағыттау кезінде ЭҚК-і:

$$E = Blv = 0,5 \cdot 1 \cdot 2 = 1В$$

мәніне ие.

Тұйықталған контурда ЭҚК-і әсері бұрғы ережесі бойынша бағыттаған кезде (3.15):

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -Blv = -0,5 \cdot 1 \cdot 2 = -1В$$

мәніне ие болады.

E мен e ЭҚК-і бірдей абсолюттік мәнге 1В, әртүрлі таңбаға және қарама-қарсы әсер ету бағыттарына ие, яғни өзара тең.

Трансформаторлар, электрлік машиналар, өлшеу механизмдері мен басқа да электрлік құралдар, орамдарымен түрлі магниттік ағындар тіркесуі мүмкін катушкадан тұрады (3.22-сурет). егер магниттік ағындар уақыт барысында өзгертін болса, онда (3.15) бойынша катушканың әр орамында e_0 ЭҚК-і индукцияланады. Катушка орамдары тізбектей жалғанғандықтан, онда w оралымдар санына ие катушкда индукцияланатын ЭҚК, жеке орамдарда индукцияланатын ЭҚК-нің қосындысына тең,

$$e_K = \sum_{k=1}^w e_{ok} = -\left(\frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{d\Phi_2}{dt} + \dots + \frac{d\Phi_w}{dt}\right) = \frac{d\Psi}{dt}, \quad (3.16)$$

мұндағы k — орамның реттік саны;

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w \quad (3.17)$$

— катушканың ағындық ілінісі.

e_K ЭҚК-нің бағыты бұрғы ережесі бойынша анықталады.

Егер катушканың барлық орамдарын Φ магниттік ағыны тесіп өтетін болса, онда катушканың ағындық ілінісі:

$$\Psi = w\Phi$$

болады, ал оның ішінде индукцияланған ЭҚК:

$$e_k = -\frac{d\Phi}{dt} = -w d\Phi / dt \quad (3.18)$$

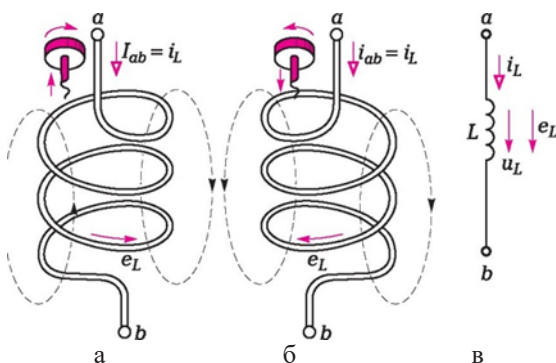
тең.

3.8. ӨЗІНДІК ИНДУКЦИЯ, ИНДУКТИВТІЛІК ЖӘНЕ ИНДУКТИВТІ ЭЛЕМЕНТ

ЭҚК-і катушкада тек сыртқы көздің өзеріп тұратын магнит өрісімен ғана емес, катушканың өзінің тогының өзгермелі магнит өрісімен де индукцияланады.

Әртүрлі бағытта оралынған катушканы қарастырайық және оралымның сымдарының кедергісін ескермейміз (3.23-сурет, а және б). Егер катушкадағы $i_{ab} = i_L$ ток тұрақты болса, онда 3.23, а мен б суреттерінде штрихты сызықтармен көрсетілген, **В** индукция векторының үздіксіз магниттік сызықтарының жиынтығымен сипаттауға болатын, магнит өрісі де орам айналасындағы кеңістікте тұрақты.

Орамдар айналасындағы магнит өрісінің конфигурациясы күрделі пішінге ие. Алайда катушканы электр тізбегінің элементі ретінде сипаттау үшін, көбінесе катушка ішіндегі және оны қоршап тұрған кеңістіктегі өрістің магниттік сызықтарының таралымын біліп қажет емес. Барлық w орамдарымен қоса Ψ ағын ілінстерін есептеу жеткілікті:



3.23-сурет

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_k + \dots + \Phi_w = \sum_{k=1}^w \Phi_k$$

мұндағы Φ_k — k -шы ораммен тіркестірілген магниттік ағын.

Қарастырылып отырған жағдайда катушканың орамдарымен ағындық ілініс осы катушкадағы токқа байланысты болғандықтан, ол *өзіндік ағындық ілініс* деп аталады.

Катушканың өзіндік ағындық ілінісінің катушканың $i_{ab} = i_L$ тогына қатынасы *өзіндік индуктивтілік* немесе *индуктивтілік* деп аталады:

$$L = \Psi / i_L \quad (3.19)$$

СИ-дегі индуктивтіліктің негізгі өлшем бірлігі — *генри* (Гн): $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А} = 1 \text{ В} \cdot \text{с/А}$.

Егер өзіндік ағындық ілініс токқа пропорционалды болса, онда индуктивтілік $L = \text{const}$. Кері жағдайда, индуктивтілік $L(i_L)$ токқа тәуелді болады. Индуктивтіліктің токқа тәуелділігі, мысалы, ферромагнитті материалдан жасалынған магниттік өткізгішке (білікке) ие катушкаларда байқалады.

Индуктивтілік катушкаларының шартты графикалық белгілері 3.1-кестеде келтірілген.

Егер катушка орамындағы ток өзгертін (артатын немесе кемитін) болса, өзіндік ағындық ілініс де өзгереді. Катушка орамларындағы ағындық іліністің өзгерісі кезінде, *электрмагниттік индукция заңына* сәйкес e_L өзіндік индукциясының ЭҚК индукцияланады.

Өзіндік индукцияның ЭҚК-нің оң бағыты магниттік сызықтар бағыты бойынша бұралатын, бұрғы сабының айналу бағытымен, яғни токтың таңдап алынған оң бағытымен сәйкес келеді (3.23-сурет, *а, б*). Бұл ЭҚК анықтамасы бойынша мынаған тең:

$$e_L = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (3.20)$$

3.1-кесте. Индуктивтілік катушкаларының шартты графикалық белгілері

Атауы	Шартты белгісі
Индуктивтілік катушкасы (реактор):	
магниттік өткізгішсіз	
магниттік өткізгішпен	
Сызықтық емес өздігінен реттелетін, мысалы П параметріне байланысты	

немесе (3.19) ескергенде:

$$e_L = -L di_L / dt.$$

(3.20)-дан, уақыт қазіргі моментіндегі өзіндік индукцияның ЭҚК-нің нақты бағыты таңдап алынған оң бағыттан өзгеше болуы мүмкін және токтың уақы бойынша туындысы белгісімен анықталатындығы шығады. Өзіндік индукцияның ЭҚК токтың өзгерісіне әрқашан кедергі келтіретінін (*Ленц ережесі*) оңай көруге болады. Индуктивтілік катушкасында шығынсыз айнымалы ток болуы үшін, оның шықпаларының арасында абсолюттік мәні бойынша тең және уақыттың әрбір моментінде өзіндік индукция ЭҚК-нің бағыты бойынша қарама-қарсы болатын кернеу болуы қажет (3.23-сурет, в):

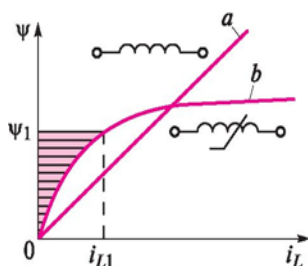
$$u_{ab} = u_L = -e_L = -L di_L / dt = d\Psi / dt. \quad (3.21)$$

Электр тогына әрқашан да магнит өрісі ілесіе жүретіндіктен, тогы бар электротехникалық құрылғының әрбір бөлігінің параметрі индуктивтілік болуы керек.

Сызықтық индуктивті элементі, өзіндік ағындық ілінісі токқа пропорционалды болатын электротехникалық құрылғының кез-келген бөлігінің алмастыру схемасы болып табылады. Оның параметрі ретінде $L = \text{const}$ индуктивтілігі қызмет атқарады.

Егер өзіндік ағындық іліністің токқа тәуелділігі сызықтық емес болса, онда алмастыру схемасы сызықтық емес индуктивті элементтен тұрады, ол сызықтық емес $\Psi(i_L)$ вебер-амперлік сипаттамамен беріледі. 3.24-суретте сызықтық (*a* сызығы) және сызықтық емес (*b* сызығы) индуктивті элементтердің вебер-амперлік сипаттамалары, сондай-ақ осындай элементтердің алмастыру схемаларындағы шартты белгісі келтірілген.

Егер t_1 уақыты аралығында индуктивті элементтегі ток нөлден i_{L1} дейін өзгереді болса, онда элементтің магнит өрісінде (3.23, в суретін қараңыз):



$$W_{m1} = \int_0^{t_1} i_L u_L dt$$

энергия жинақталады не (3.21) ескерсек:

$$W_{m1} = \int_0^{\Psi_1} i_L d\Psi = \int_0^{i_{L1}} i_L L(i_L) di_L \quad (3.22)$$

болады, мұндағы Ψ_1 — $i_L = i_{L1}$ мөк кезіндегі өзіндік ағындық іліністің мәні.

3.24-сурет

(3.22) бойынша $i_{L \text{ ток}}$ кезіндегі индуктивті элементтің магнит өрісінің энергиясы, вебер-амперлік сипаттама мен ординат осы арасына бекітілген ($i_{L \text{ ток}}$ кезінде сызықтық емес индуктивті элементтің магнит өрісіне пропорционал 3.24-суретте штрихталған аудан) сәйкес ауданға пропорционалды.

$i_{L \text{ ток}}$ кезіндегі сызықтық индуктивті элементтің магнит өрісінің энергиясы (3.19) ескергенде (3.22)-ден

$$W_M = Li_L^2 / 2 = \Psi i_L / 2 \quad (3.23)$$

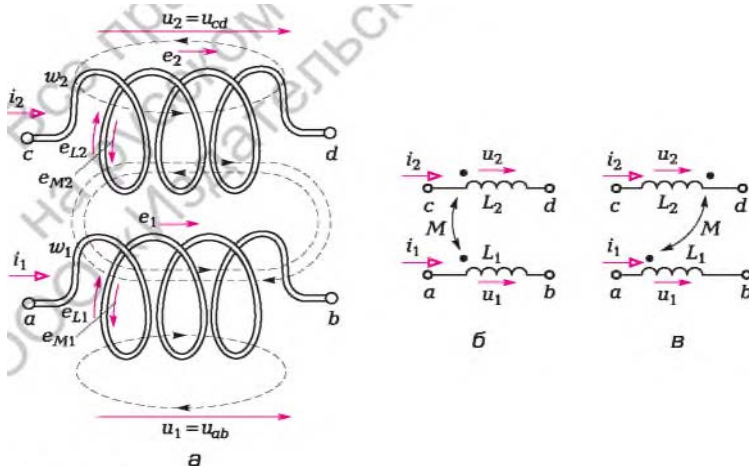
тең. Токты арттырған (азайтқан) кезде индуктивті элементтердің магнит өрісінің энергиясы артады (кемиді). Демек, индуктивті элементтерді энергия аккумуляторлары реінде қарастыруға болады.

3.8. ӨЗАРА ИНДУКЦИЯ МЕН ӨЗАРА ИНДУКТИВТІЛІК

Орамдар саны w_1 мен w_2 және токтары i_1 мен i_2 болатын, бір-біріне қатысты бір катушка өрісінің магниттік сызықтарының бір бөлігі екіншісінің орамдарымен тіркесетіндей жақын орналасқан, екі индуктивтілік катушкаларын қарастырайық (3.25-сурет, а). Сондықтан да, Ψ_{11} және Ψ_{22} өзіндік ағындық іліністен басқа

$$\Psi_{12} = \sum_{k=1}^{w_1} \Phi_{k12}$$

осындай тізбектерді есептеу кезінде бірінші және



3.25-сурет

$$\Psi_{21} = \sum_{k=1}^{w_2} \Phi_{k21}$$

екінші катушкалардың орамдарының қосымша ағындық іліністерін ескерген жөн, мұндағы Φ_{k12} — бірінші катушка — ның k -ші орамы арқылы екінші катушканың тогының ағыны, Φ_{k21} — екінші катушканың k -ші орамы арқылы бірінші катушканың тогының ағыны.

Бірінші және екінші катушкалардың *өзара индуктивтілігі* деп, Ψ_{12} бірінші катушканың қосымша ағындық ілінісінің екінші катушканың i_2 тогына қатынасын айтамыз

$$M_{12} = \Psi_{12} / i_2.$$

Осыған ұқсас екінші және бірінші катушкалардың өзара индуктивтілігі анықталады:

$$M_{21} = \Psi_{21} / i_1.$$

Тәжірибелер көрсеткендей:

$$M_{21} = M_{12} = M = k_{\kappa\delta} \sqrt{L_1 L_2},$$

мұндағы L_1 мен L_2 — бірінші және екінші катушкалардың индуктивтілігі; $0 \leq k_{\kappa\delta} \leq 1$ — катушкалардың байланыс коэффициенті.

Өзара индуктивтілік токтардың бағыты мен мәндеріне тәуелсіз, ол тек катушкалары құрылысымен және олардың өзара орналасуы арқылы анықталалы.

Әрбір индуктивті байланысқан катушкалардың Ψ *толық ағындық ілінісі*, катушкалардағы токтардың бағытына және олардың өзара орналасуына қатысты қосылатын немесе алына алатын екі құраушыдан тұрады. Бірінші жағдайда индуктивті байланысқан катушкаларды қосу, *келісілген*, екінші жағдайда — *қарама-қарсы* деп аталады. Индуктивті байланысқан катушкалардың үлгілік бейнесі (3.25, *а* суретін қараңыз) күрделі болғандықтан, индуктивті байланыстың сипатын суреттеу үшін шартты белгілерді қолданады.

Тізбектердің алмастыру схемасында (3.25, *б* және *в* суреттерін қараңыз) әрбір катушканың аттас шықпаларын («басын») нүктемен белгілейді. Әрбір катушкадағы өзіндік және қосымша ағындық ілініс қосылады, яғни бірінші және екінші катушкалардың толық ағындық ілінісі мынаған тең болады:

$$\Psi_1 = \Psi_{11} + \Psi_{12}; \quad \Psi_2 = \Psi_{22} + \Psi_{21}$$

Егер токтар аттас шықпаларға қатысты әртүрлі бағытталған болса (3.25, *в* суретін қараңыз), онда катушкалар қарама-қарсы

қосылған, яғни:

$$\Psi_1 = \Psi_{11} - \Psi_{12}; \quad \Psi_2 = \Psi_{22} - \Psi_{21}$$

Бұл жерде, осыған дейін қарастырылғандай, ток бағыты деп олардың таңдап алынған оң бағытын түсіну қажет.

(3.18) формулаға сәйкес, бірінші және екінші катушкаларда

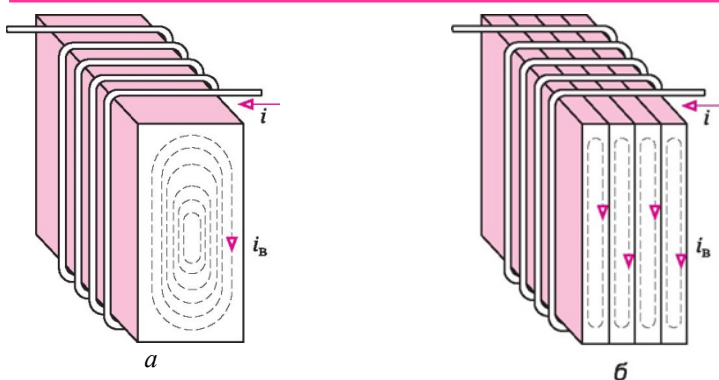
$$\begin{aligned} e_1 &= -\frac{d\Psi_1}{dt} = -\frac{d(\Psi_{11} \pm \Psi_{12})}{dt} = e_{L1} \pm e_{M1}; \\ e_2 &= -\frac{d\Psi_2}{dt} = -\frac{d(\Psi_{22} \pm \Psi_{21})}{dt} = e_{L2} \pm e_{M2} \end{aligned} \quad (3.24)$$

ЭҚК индукцияланатын болады, мұндағы $e_{L1} = -d\Psi_{11}/dt = -L_1 di_1/dt$ және $e_{L2} = -d\Psi_{22}/dt = -L_2 di_2/dt$ – бірінші және екінші катушкалардың өзіндік индукциясының ЭҚК; $e_{M1} = -d\Psi_{12}/dt = -M di_2/dt$ және $e_{M2} = -d\Psi_{21}/dt = -M di_1/dt$ – бірінші және екінші катушкалардың өзара индукциясының ЭҚК-і.

3.25, а суретінде катушканың ішіндегі өзіндік магниттік ағын мен басқа катушканың тогы тудырған магниттік ағын бір-біріне қарама-қарсы бағытталғандығы көрсетілген, бұл (3.24)-гі төменгі белгіге және 3.25, в суретіндегі шартты белгіге сәйкес келеді.

3.10. ҚҰЙЫНДЫ ТОКТАР

Электр машиналарының және аппаратарының айнымалы магнит өрісінде орналасқан массивті бөліктерінде, индукцияланған ЭҚК әсерінен (3.15) i_k құйынды токтар туындайды (3.26-сурет, а).



3.26-сурет

3.2-кесте. Индукцияның әртүрлі мәндеріндегі электротехникалық болат табағындағы шығынның меншікті қуаты

B_m , Тл	Болат маркасы, Вт/кг		B_m , Тл	Болат маркасы, Вт/кг	
	1511-0,35	1511-0,50		1511-0,35	1511-0,50
0,6	0,585	0,685	1,1	1,61	1,92
0,7	0,685	0,890	1,2	1,94	2,24
0,8	0,855	1,130	1,3	2,31	2,58
0,9	1,050	1,380	1,4	2,66	2,95
1,0	1,300	1,640	1,5	3,00	3,40

Олар энергияның қосымша шығынын және магниттік өткізгішінің қыздырылуын тудырады. Одан өзге, құйынды токтар магниттік өткізгішіне магнитсіздейтін әсер көрсетеді. Сондықтан да, құйынды токтарды ескерген кезде, магниттік ағын мен индукцияның бұрынғы мәндері өте үлкен магниттеуші ток және магнит өрісінің жоғары кернеулігінде алынады.

Магниттік өткізгіштердегі құйынды токтарды азайту үшін, біріншіден, құйынды токтар қамтитын контурлар ауданын азайтуға, екіншіден, материалдың өзінің меншікті электрлік кедергісін арттыруға болады.

Құйынды токтардың контурларының ауданын 20 кГц жиіліктерінде азайту үшін магниттік өткізгіштерді сырланып оқшауланған электротехникалық болаттың жұқа табағынан жинайды (3.26-сурет, б). Токтың 50 Гц өндірістік жиілігі кезінде, табақтардың қалыңдығы 0,35-0,50 мм тең. Одан да жоғары жиіліктерде табақтардың қалыңдығы 0,02-0,05 мм дейін кішірейтіледі.

Магнит өткізгіш материалының меншікті электр кедергісін арттыру үшін, оған 0,5-4,5% (Si) кремний қосады. Мұндай қоспа материалдың меншікті электр кедергісін айтарлықтай арттырып, оның магниттік қасиеттеріне шамалы әсер етеді.

Алайда құйынды токтар қолданыс табуда. Мысалы, металл балқыту үшін. Металл салынған тигелді, металлды балқытатын, металлдағы құйынды токтарды индукциялайтын айнымалы магнит өрісіне қояды.

Магниттік өткізгішті қайта магниттеу, құйынды токтарға

кететін шығыннан басқа, гистерезис ілмегі ауданына пропорционал магнитті гистерезиске кететін энергия шығынымен қоса жүреді.

Электротехникалық құрылғыларды, электротехникалық болаттан жасалынған, магниттік өткізгіштердегі шығындардың қуатын анықтау үшін есептеу кезінде анықтама кестелері қолданылады, онда қосынды шығынның меншікті қуатының B_m магниттік индукция амплитудасына тәуелділігі (3.2-кесте) берілген.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Магнитті-жұмсақ және магнитті-қатты материалдардың айырмашылығы неде?
2. Катушканың өзіндік индуктивтілігінің анықтамасын беріңіз.
3. (3.15) және (3.18) формулаларда өзіндік индукцияның ЭҚК-нің оң бағыты қалай таңдалынады? Ленц ережесімен байланысын түсіндіріңіз.
4. Электр машиналар мен аппараттардағы магнит өткізгіштерде құйынды токтардың пайда болуының себебі неде?
5. Электр машиналар мен аппараттардағы магнит өткізгіштердің жұмысына құйынды токтар қандай кері әсерін тигізеді?

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. Егер катушкалардың байланыс коэффициенті $k_{кб}=0,5$ болса, индуктивтілігі $L_1=0,12$ Гн және $L_2=3$ Гн тең, екі катушканың өзара индуктивтілігін анықтаңыз.
Жауабы: 0,3 Гн.
2. Параметрлерінің мәні: $l=1$ м, $v=2$ м/с, $B=0,5$ Тл кезінде, 3.20, а суреттегі тәжірибедегі e тұйықталған контурда және E қозғалып келе жатқан өткізгіште индукцияланған ЭҚК-нің мәні мен әсерінің бағытын салыстырыңыз.
3. Параметрлерінің мәні: $a=1$ см, $I=100$ А болатын, тұрақты токтың екі өткізгішті желісінің $l=1$ м ұзындықты сымына әсер ететін F күші (3.19-суретті қараңыз) неге тең?
Жауабы: 0,2 Н.
4. Егер өзіндік ағындық іліністері Ψ , 0,1 с уақыт аралығында 0,3 Вб-ден 0,1 Вб-ге дейін бір уақытта бірқалыпты азаятын болса, 3.23 а мен б суреттегі катушкаларда индукцияланатын ЭҚК неге тең?
Жауабы: 2 В.

СИНУСОИДАЛЫҚ ТОКТЫҢ ЭЛЕКТР ТІЗБЕКТЕРІ

4.1. ЖАЛПЫ МАҒЛҰМАТТАР

XIX ғасырдың соңында өндірістің, көлік тасымалының және қызмет көрсету салаларының дамуында электр энергиясының үдемелі рөлі, электр энергиясын өндіру, тарату және тұтыну жөніндегі технологиялық тізбекте тиімді электротехникалық құрылғыларды жасап шығару бойынша теориялық және эксперименттік жұмыстарды ынталандырды. Қазіргі уақытта өндірістік мақсаттарда электр энергиясы Ресейде және көптеген өзге елдерде (АҚШ-да 60Гц) токтың стандартты 50 Гц жиіліктегі синусоидалық токтың электромеханикалық генераторларымен өндіріледі. Жылу және атом электр станцияларындағы бу құбырларынан келетін жетекті электрмеханикалық генераторлардың қуаты 100-1200 МВт болады. Электр генераторлардың синусоидалық токтарының параметрлерінің мәндерін трансформаторлармен түрлендіру электр энергиясын жоғары кернеулі (750 кВт-қа дейін) желілер бойынша электр энергиясын барынша аз шығынмен алыс қашықтықтарға (500 км-ге дейін) таратуға мүмкіндік береді.

Өндірістік жиілікті синусоидалық токтардың асинхронды және синхронды қозғалтқыштары, көтергіш-көліктік машиналардың, станоктардың, өңдеуші аспаптардың және т.б. электр жетегінің түрлі жүйелерінде электр энергиясын түрлендіру үшін тиімді қолданылады.

Өндірістік емес жиіліктегі синусоидалық токты түрліше қолданады. Өрең балқитын және ерекше таза металлдарды балқытуға арналған электр пештерінде синусоидалық токтың жиілігі 500Гц-50кГц құрайды. Электр-акустикалық қондырғылардағы синусоидалық токтың жиілігі бірнеше герцті құрауы мүмкін.

Радиотехниканың дамуы жоғары жиілікті (100МГц-қа дейінгі) құрылғыларды: антенналарды, генераторларды, түрлендіргіштерді және т.с.с. жасауға әкелді.

Синусоидалық токтың электр тізбегі, тағайындалымы тұрақты ток тізбегінің функционалды ұқсас құрылғыларының (энергия көздері, өлшеу құралдары, коммутациялық аппараттар және т.б.) міндетімен сәйкес келетін, электротехникалық құрылғылардан өзге, тек синусоидалық ток тізбектеріне ғана тән құрылғылардан: трансформаторлардан, конденсаторлардан, индуктивтілік катушкаларынан және басқаларынан тұрады. Синусоидалық ток тізбегіндегі электротехникалық құралдардың жиынтығы олардың арасындағы байланысты көрнекі және шағын бейнелеу үшін 2.2-суретте келтірілгенге ұқсас принциптік схемамен ұсынылады.

Электротехникалық құрылғылардың жұмыс режимін есептеу үшін тізбектің принциптік схемасынан оның алмастыру схемасына өту қажет. Синусоидалық ток тізбегінің алмастыру схемасының элементтері, синусоидалық ток пен ЭҚК көздері, резистивті, индуктивті және сыйымдылық элементтері болып табылады.

Егер элементтердің параметрлері ондағы токқа және салынған кернеуге тәуелді болмаса, онда олар сызықтық элементтер. Кері жағдайда элементтерді сызықтық емес деп санаған жөн.

Бу және гидравликалық құбырлардың механикалық энергиясын электр энергиясына түрлендіретін электрмеханикалық генераторлар синусоидалық токтың электр энергиясының өндірістік көздері болып табылады.

Қысқартуларға жол бере отырып, осындай генератордың жұмысын талдайық. Екі полюсті электрмеханикалық генератордың принциптік құрылысы 4.1, *a* суретінде бейнеленген. Ол *a* мен *b* шықпаларына ие жылжымайтын жазық ажыратылған орамдардан және орам ішінде тұрақты f жиілікпен, яғни $\Omega = 2\pi f$ рад/с тұрақты бұрыштық жылдамдықпен айналатын магнит өрісінен тұрады.

СИ-дегі f жиіліктің негізгі өлшем бірлігі — герц (Гц): $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$. Жиілікке кері шама *период* деп аталады: $T = 1/f$, с.

Тұрақты магниттің магниттік ағыны Φ_m тең болсын. Магниттік ағынды кеңістіктік үлестіруден (4.1, *b* суретін қараңыз), орамды тесіп өтетін, яғни x осы бойымен бағытталған магнит ағыны

құраушысының лездік мәні:

$$\Phi_x = \Phi_m \cos(\Omega t + \alpha) = \Phi_m \sin(\omega t + \psi_\Phi), \quad (4.1)$$

тең болады, мұндағы Φ_m — орамды тесіп өтетін магнит ағынының максималды мәні (амплитудасы); α — x осыне қатысты тұрақты магниттің кеңістіктік орналасуының бастапқы (яғни уақыт санағының басы ретінде қабылданған $t = 0$ моментіндегі) бұрышы; ω — тұрақты магниттің Ω бұрыштық айналу жылдамдығының мәнімен және өлшемділігімен сәйкес келетін, магниттік ағынның синусоидалық функциясының бұрыштық жиілігі; $\psi_A = \pi/2 + a$ — магнит ағынының бастапқы фазасы; $\omega t + \psi_\Phi$ — магниттік ағынның фазасы. Осы жерде және ары қарай, *бастапқы фаза* $t = 0$ уақыт мезетіндегі *синусоидалық* функцияның мәнін анықтайды.

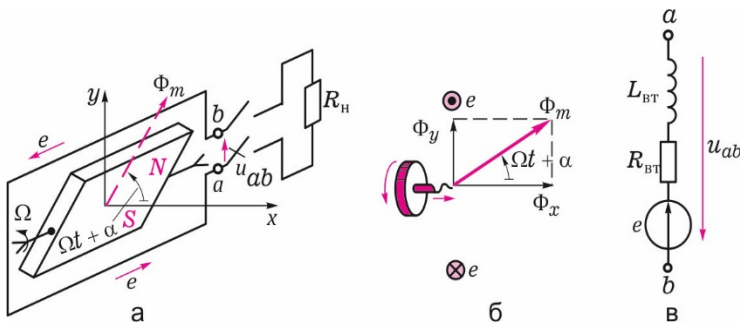
Электрмагниттік индукция заңна сәйкес, орамның ағындық ілінісі өзгерген кезде онда, оң бағытын (4.1, a суретін қараңыз) Φ_x ағынының оң бағытымен бұрғы ережесі арқылы байланыстыратын, ЭҚК индукцияланады.

ЭҚК-ң оң бағыты Φ_x магниттік ағынның бағыты бойынша бұралатын бұрғы сабының айналу бағытымен сәйкес келеді:

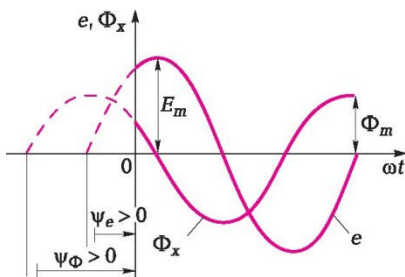
$$e = -d\Phi_x / dt = -\Phi_m \omega \cos(\omega t + \psi_\Phi) = E_m \sin(\omega t + \psi_e) \quad (4.2)$$

мұндағы $E_m = \omega \Phi_m$ — ЭҚК амплитудасы; $\psi_e = \psi_\Phi - \pi/2 = a$ — ЭҚК-ң бастапқы фазасы.

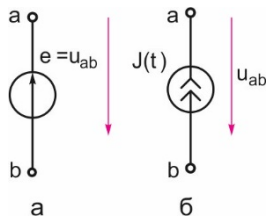
4.2-суретте $\Phi_x = \Phi_m \cos(\omega t)$ магниттік ағынының және $e = e(\omega t)$ ЭҚК-ң ωt фазасына, яғни t уақытына тәуелділігі бейнеленген.



4.1-сурет



4.2-сурет



4.3-сурет

Синусоидалық шамаларды ωt тәуелділік секілді графиктер түрінде бейнелеу қабылданғанын айта кетейік. Сондықтан да бастапқы фаза, синусоидалық шаманың координаттар басына, яғни $\omega t = 0$ қатысты ығысуын анықтайды. Бастапқы фаза, абсцисс осы бойымен координаттар басына ең жақын нөлдік мәнге ие синусоидалық шаманың теріс мәндерінен координаттар басчна дейінгі оң мәндерге қарай есептелінеді.

Егер бастапқы фазасы нөлден үлкен (аз) болса, онда синусоидалық шаманың басы солға қарай – 4.2-суреттегідей – координаттар басынан (оңға) қарай ығысқан.

Егер генератордың a мен b шықпаларына $R_{ж}$ жүктеме кедергілеріне ие резисторды жалғасақ (4.1, a суретін қараңыз), онда алынған тізбекте i синусоидалық ток болады.

4.1, b суретінде, $R_{iш}$ резистивті және $L_{iш}$ индуктивті элементтері генератордың ішкі параметрлерін: өткізгіш кедергісін және орамның өзіндік индуктивтілігін бейнелейтін, электрмеханикалық генератордың алмастыру схемасы келтірілген. Егер генератордың алмастыру схемасындағы резистивті және индуктивті элементтердің параметрлерін елемеуге болатын болса, онда e синусоидалық ЭҚК көзі немесе синусоидалық кернеу көзі оның идеал алмастыру схемасы болып табылады (4.3-сурет, a). Егер генератор тізбегіндегі ток сыртқы тізбектің параметрлеріне тәуелді болмаса, онда генератордың алмастыру схемасы ретінде идеал $J(t)$ синусоидалық ток көзі болады, мұндағы $J(t)=i_k$ – генератордың a және b шықпаларының қысқаша тұйықталуы кезіндегі ондағы ток.

ЭҚК мен ток көздерін алмастыру схемасының активті элементтері деп, ал резистивті, индуктивті және сыйымдылық элементтері – пассивті элементтері деп атайды.

4.4. СИНУСОИДАЛЫҚ ШАМАЛАРДЫҢ МАКСИМАЛДЫ, ОРТАША ЖӘНЕ ӘСЕРЛІК МӘНДЕРІ

Синусоидалық өзгертін ЭКК-ң әсер етуі кезінде сызықтық тізбектегі токтар да синусоидалық болады:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

мұндағы ω — бұрыштық жиілік; ψ_i — токтың бастапқы фазасы; I_m — токтың максималды мәні (амплитудасы).

Синусоидалық токтың *орташа мәні* деп:

$$I_{op} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2I_m}{\pi} \quad (4.3)$$

модулі бойынша орташа мәнімен сәйкес келетін, оның оң период ішіндегі орташа мәнін санайды.

Егер R кедергісіне ие резистивті элементте тұрақты синусодиты токтарда уақыттың бірдей интервалында бірдей энергия бөлінетін болса, онда тұрақты токтың мұндай мәні сәйкес синусодиты токтың *әсерлік мәні* деп атайды.

Кедергісі R резистивті элементтегі бір T период уақыты интервалында синусоидалық ток кезінде:

$$W_- = \int_0^T Ri^2 dt$$

ал тұрақты ток кезінде:

$$W_+ = RI^2T$$

энергиясы бөлінеді.

$$RI^2T = \int_0^T Ri^2 dt$$

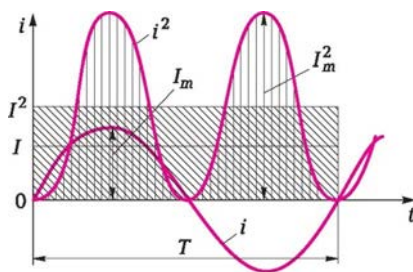
энергияларының тепе-теңдігі синусоидалық токтың әсерлік мәнін, период арасындағы *орташа квадратты* түрінде анықтайды:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (4.4)$$

4.4-суретте i синусоидалық токтың, $i^2_{\text{ток}}$ квадратының уақытынан

$$I^2T = \int_0^T i^2 dt$$

тәуелділігі және I^2 мәнінің графикалық анықтамасы (аудандарының теңдігінен), сол арқылы токтың әсерлік мәні көрсетілген.



4.4-сурет

Синусоидальдық ток үшін әсерлік мәнді амплитудалық арқылы анықтау қиынға соқпайды:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt}$$

және де $\int_0^T dt = T$, ал $\int_0^T \cos 2\omega t dt = 0$ болғандықтан:

$$I = I_m / \sqrt{2} \quad (4.5)$$

Осыған ұқсас кез-келген басқа да синусоидальдық шамалар (ЭҚК, кернеу, магнит ағыны және т.б.) үшін $a = A_m \sin(\omega t + \psi_a)$ орташа және әсерлік мәндері:

$$\left. \begin{aligned} A_{op} &= 2A_m / \pi \approx 0,637 A_m; \\ A &= A_m / \sqrt{2} \approx 0,707 A_m \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

4.5. СИНУСОИДАЛЫҚ ШАМАЛАРДЫ ӨРНЕКТЕУ ӘДІСТЕРІ

Синусоидальдық өзгеретін шамаларды: тригонометриялық функциялар (4.2), графиктер (4.2-суретті қараңыз), айналмалы векторлар мен кешенді сандар түрінде өрнектеудің бірнеше әдістері мәлім.

Синусоидальдық өзгеретін шамаларды айналмалы векторлар мен кешенді сандар түрінде өрнектеуді қарастырайық.

Синусоидальдық шамаларды айналмалы векторлармен өрнектеу. Синусоидальдық өзгеретін шаманы ψ_a бастапқы фазасымен айналмалы вектормен өрнектеу үшін

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi_a)$$

осы шаманың, ұзындығы (тұрғызу масштабында) A_m амплитудасына тең және көлденең оське ψ_a бұрышымен орналасқан, A_m радиус-векторын (4.5-сурет, а) құрастырайық. Бұл оның $t = 0$ уақыт санағы басталған мезеттегі бастапқы орыны болады.

Егер, a синусоидалық шаманың ω бұрыштық жылдамдығына сандық жағынан тең болатын, тұрақты Ω бұрыштық жылдамдыққа ие радиус-векторді сағат тілінің қозғалыс бағытына кері бағытта айналдырсақ, онда оның тік оське проекциясы $A_m \sin(\omega t + \psi_a)$ тең болады. Осы шамалардың мәндері бойынша синусоидалық шаманың ωt фазасынан немесе t уақытына тәуелділік графигін тұрғызуға болады. Мұндай құрастыру t -ң кейбір мәндері үшін 4.5, б суретінде келтірілген.

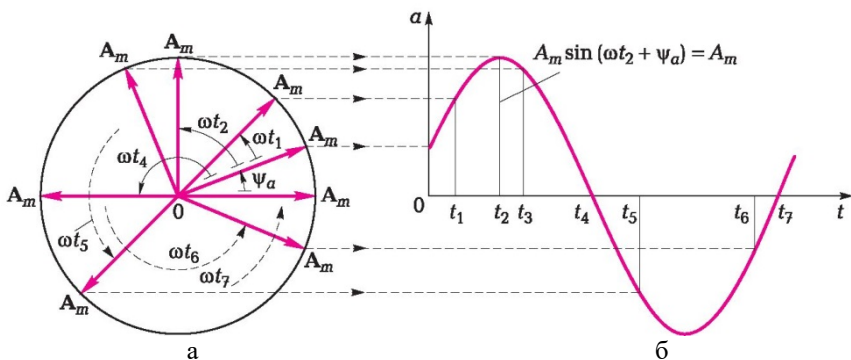
Айналмалы векторларды қолдану бір суретте бірдей жиілікті түрлі синусоидалық өзгергіш шамалардың жиынтығын шағындап көрсетуге мүмкіндік береді.

Синусоидалық шамаларды кешенді сандармен өрнектеу. Синусоидалық шамаларды айналмалы радиус-векторлармен өрнектеуден синусоидалық шамаларды кешенді сандармен өрнектеуге өту қиын емес.

ψ_a бастапқы фазалық синусоидалық шаманы кешенді санмен өрнектеу үшін

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi_a) \quad (4.7)$$

егер бұрыш мәні $\psi_a > 0 (\psi_a < 0)$ болса, кешенді жазықтықта (4.6-сурет) координаттар басынан ψ_a бұрышымен нақты шамалар осыне сағат тіліне қарсы (сағат тілімен) ұзындығы кеңістік масштабында синусоидалық шаманың A_m амплитудасына тең вектор жүргізейік.



4.5-сурет

Осы вектордың соңы, синусоидалық шаманың *кешенді амплитудасы* – кешенді саны сәйкес келетін нүктеде орналасқан:

$$\dot{A}_m = A_m e^{j\psi_a} = A_m \angle \psi_a.$$

Осылайша, кешенді амплитудаға сәйкес келетін вектор кешенді жазықтықта белгіленеді.

$\omega t + \psi_a$ синусоидалық шаманың фазасын уақыт бойында арттырған кезде осы мен вектор арасындағы бұрыш өседі, ал вектордың өзі айналмалы вектор болады

$$A_m e^{j(\omega t + \psi_a)} = A_m \cos(\omega t + \psi_a) + j A_m \sin(\omega t + \psi_a)$$

Айналмалы вектордың жалған бөлігі берілген синусоидалық шамаға (4.7) тең екендігін оңай көруге болады. Синусоидалық шаманы $\dot{A}_m$ кешенді амплитудасымен және оған сәйкес келетін кешенді кеңістіктегі векормен өрнектеу, сол синусоидалық шаманы айналмалы A_m радиус-векторымен $t = 0$ уақыт мезетінде өрнектеуге геометриялық ұқсайды (4.5, *a* суретін қараңыз). Сондықтан да, синусоидалық шаманың екі өрнегі де бір-біріне ұқсас деген пікір туындауы мүмкін. Шындығында келгенде олай емес. Синусоидалық шамаларды кешенді сандармен өрнектеу кезінде синусоидалық тогы бар электр тізбектерін талдаудың тиімді кешенді әдістерін қолдануға болады, ол қазіргі уақытта барлығын мойындатты.

Кешенді жазықтықтағы, тұрғызылу масштабындағы ұзындығы синусоидалық шаманың әсерлік мәніне тең вектор және сәйкес кешенді сан *синусоидалық шаманың кешенді әсерлік мәні* деп аталады:

$$\dot{A} = \dot{A}_m / \sqrt{2} = A e^{j\psi_a} = A \angle \psi_a \quad (4.8)$$

Кешенді жазықтықтағы вектордың өзі де белгіленеді (4.6-суретті қараңыз).

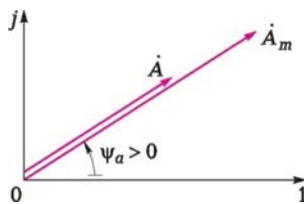
Синусоидалық шаманың кешенді әсерлік мәнін жазудың үш түрі қолданылады:

■ *көрсеткіштік түрі*

$$\dot{A} = A e^{j\psi_a} = A \angle \psi_a \quad (4.9)$$

■ *тригонометриялық түрі*

$$\dot{A} = A \cos \psi_a + j A \sin \psi_a; \quad (4.10)$$



4.6-сурет

■ алгебралық түрі

$$\dot{A} = \operatorname{Re} \dot{A} + j \operatorname{Im} \dot{A}; \quad (4.11)$$

мұндағы $\operatorname{Re} \dot{A} = A \cos \psi_a$ және $\operatorname{Im} \dot{A} = A \sin \psi_a$ — синусоидалық шаманың кешенді әсерлік мәнінің нақты және жалған құраушылары

$$A = \sqrt{(\operatorname{Re} \dot{A})^2 + (\operatorname{Im} \dot{A})^2}; \psi_a = \arctg \frac{\operatorname{Im} \dot{A}}{\operatorname{Re} \dot{A}}.$$

Көрсеткіштік түрден тригонометриялық түрге өту Эйлер формуласының көмегімен орындалады:

$$e^{\pm j\psi_a} = \cos \psi_a \pm j \sin \psi_a; \quad (4.12)$$

Бұрыштарының мәні $\psi_a = \pi/2$ және $\psi_a = -\pi/2$ болған кезде (4.12)-ден

$$e^{j\pi/2} = j \text{ және } e^{-j\pi/2} = 1/j \quad (4.13)$$

шығады, мұндағы $j = \sqrt{-1}$ — жалған бірлік.

Синусоидалық тоқтты тізбекті талдау кезінде синусоидалық шамалардың кешенді әсерлік мәндерін қолданады. Оларды қысқаша *кешенді мәндер* деп, ал кешенді жазықтықтағы сәйкес векторларды — *кешенді мәндер* векторлары деп атайды.

Бір жиілікті синусоидалық шамалардың кешенді мәндерінің векторларының жиынтығы *векторлық диаграмма* деп аталады. Векторлық диаграмманы қолдана отырып, кешенді мәндерді қосып-алууды сәйкес векторларды қосып-алумен алмастыруға болады. Бұл есептеулерді қысқартып, көрнекі етеді.

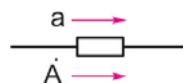
Егер барлық кешенді мәндердің ψ_a бастапқы фазасын бір шамаға кемітсек (арттырсақ), кешенді мәндер векторларының векторлық диаграммадағы бір-біріне қатысты орналасуы өзгермейді. Бұл барлық векторлардың бір уақытта бірдей бұрышқа бұрылуын білдіреді. Көбінесе тізбектерді сараптау кезінде векторлық диаграмманы, бір кешенді мәnnң векторы нақты шамалар осының бойымен бағытталған болатындай етіп тұрғызады. Мұндай вектор *бастапқы вектор* деп аталады. Оның бастапқы фазасы $\psi_a = 0$.

Синусоидалық шамалардың ток, кернеу және басқалары) тізбектегі бағыттары периодты түрде өзгереді, алайда екі бағыттың бірі оң деп алынады. Бұл бағыт дербес тандап алынады және тізбектің сәйкес бөлігіндегі схемада бағыттауыш сызығымен көрсетіледі. Тандап алынған оң бағытта синусоидалық шама

$a = A_m \sin(\omega t + \psi_a)$ лездік мәнімен және сәйкес

• $A = A \angle \psi_a$ (4.8) кешенді мәнімен өрнектеледі.

Демек, синусоидалық шаманы (токтар, кернеу мен т.б.) лездік және кешендік мәндер түрінде өзара-бірмәнді өрнектеуге олардың бірдей оң бағыттары сәйкес келеді (4.7-сурет).



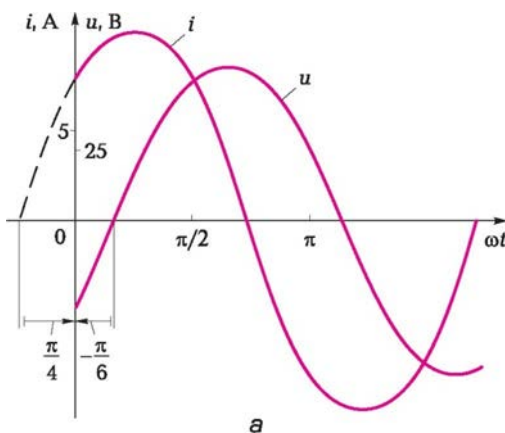
4.7-сурет

Синусоидалық шаманың лездік мәніне қарағанда оларға сәйкес келетін кешенді мәндер өлшемділігі жоқ екендігін айта кетейік.

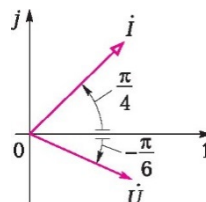
Мысал 4.1. $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = 10 \sin(\omega t + \pi/4)$ А синусоидалық ток пен $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = 50 \sin(\omega t - \pi/6)$ В (4.8-сурет, а) кернеу үшін оларға сәйкес келетін $\dot{I}$ ток пен $\dot{U}$ кернеу мәнін жазу және олардың кешенді жазықтықтағы векторын тұрғызу.

Шешімі. $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = 10 \sin(\omega t + \pi/4)$ А синусоидалық тогына токтың $\dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_i} = \frac{10}{\sqrt{2}} e^{j\pi/4} = \frac{10}{\sqrt{2}} \angle \pi/4$ кешенді мәні және кешенді жазықтықтағы вектор (4.8-сурет, б) сәйкес келеді.

$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = 50 \sin(\omega t - \pi/6)$ В синусоидалық кернеуіне, кернеудің $\dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_u} = \frac{50}{\sqrt{2}} e^{-j\pi/6} = \frac{50}{\sqrt{2}} \angle (-\frac{\pi}{6})$ кешенді мәні мен кешенді жазықтықтағы вектор (4.8-сурет, б) сәйкес келеді.



а



б

4.8-сурет

4.6. РЕЗИСТИВТІ, ИНДУКТИВТІ ЖӘНЕ СЫЙЫМДЫЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕРІ ҮШІН КЕШЕНДІ ТҮРДЕГІ ОМ ЗАҢЫ

Резистивті, индуктивті және сыйымдылық элементтерінің токтар мен кернеулер арасындағы тәуелділік оларды жүріп жатқан физикалық құбылыстармен анықталады. Осы элементтердің әрбіреуіндегі физикалық процестердің математикалық сипаттамасы синусоидалық шамаларды өрнектеу әдісіне байланысты.

Резистивті элемент. Егер резистивті элементтегі ток синусоидалық болса:

$$i_R = I_{Rm} \sin(\omega t + \psi_i)$$

онда Ом заңы бойынша (2.1) резистивті элементтегі кернеу:

$$u_R = Ri_R = RI_{Rm} \sin(\omega t + \psi_i) = U_{Rm} \sin(\omega t + \psi_u)$$

болады, мұндағы ток пен кернеу амплитудасы және олардың бастапқы фазалары

$$\left. \begin{aligned} U_{Rm} &= RI_{Rm}; \\ \psi_u &= \psi_i \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

қатынасымен байланысқан.

(4.14)-гі бірінші қатынастың оң және сол бөліктерін $\sqrt{2}$ -ге бөліп резистивті элементтің кернеуі мен тогының әсерлік мәндерін аламыз:

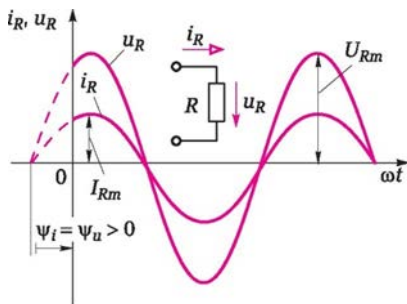
$$U_R = RI_R. \quad (4.15)$$

4.9-суретте резистивті элементтің синусоидалық тогының және кернеуінің лездік мәндерінің графигі көрсетілген ($\psi_u = \psi_i > 0$ кезінде тұрғызылған), одан i_R синусоидалық токтары мен u_R кернеуі фазасы бойынша сәйкес келетіндігі көрініп тұр.

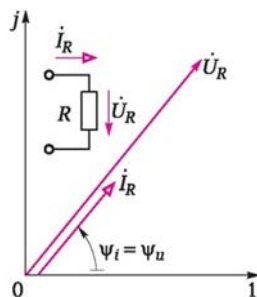
Резистивті элементтің i_R синусоидалық токтары мен u_R кернеуін сәйкес кешенді мәндермен (4.9) өрнектейік:

$$\dot{I} = I_R e^{j\psi_i} \text{ және } \dot{U}_R = U_R e^{j\psi_u}.$$

(4.15)-ті ескере отырып, *резистивті элемент үшін кешенді түрдегі Ом заңын* аламыз:



4.9-сурет



4.10-сурет

$$\dot{U}_R = RI_R e^{j\psi_u} = RI_R e^{j\psi_i} \quad (4.16)$$

немесе

$$\dot{U}_R = R \dot{I}_R.$$

4.10 суретте резистивті элементтің векторлық диаграммасы келтірілген, және де $\dot{I}_R$ тогы мен $\dot{U}_R$ кешенді мәндерінің векторлары фазасы бойынша сәйкес келетіндігі көрсетілген.

Индуктивті элемент. Егер индуктивті элементтегі ток синусоидалық болса

$$i_L = I_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i)$$

онда электрмагниттік индукция заңы бойынша (3.21) резистивті элементтегі кернеу

$$\begin{aligned} u_L = -e_L &= L di_L / dt = \omega L I_{Lm} \cos(\omega t + \psi_i) = \\ &= U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i + \pi / 2) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_u) \end{aligned}$$

болады, мұндағы кернеу мен ток амплитудасы және олардың бастапқы фазалары:

$$\left. \begin{aligned} U_{Lm} &= \omega L I_{Lm}; \\ \psi_u &= \psi_i + \pi / 2 \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

қатынасымен байланысқан.

(4.17)-гі бірінші қатынастың оң және сол бөліктерін $\sqrt{2}$ -ге бөліп индуктивті элементтің кернеуі мен тогының әсерлік мәндеріне арналған қатынасты аламыз:

$$\dot{U}_R = \omega L \dot{I}_L = X_L \dot{I}_L. \quad (4.18)$$

Өлшем бірлігі Ом болып табылатын (4.18)-ші өрнектегі $X_L = \omega L$

шамасы индуктивті кедергі деп, ал өлшем бірлігі $\text{Ом}^{-1} = \text{См}$ болатын оған кері шама $B_L = 1/\omega L$ – индуктивтілік өткізгіш деп аталады. X_L және B_L шамалары – синусоидалық токтар тізбегінің индуктивті элементтерінің параметрлері.

4.11-суретте индуктивті элементтің синусоидалық тогы мен кернеуінің лездік мәндерінің графигі берілген ($\psi_i > 0$ кезінде тұрғызылған), одан i_L тогының u_L кернеуінен фазасы бойынша ауытқу деп аталатын:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi / 2$$

бұрышқа артта қалып жатқандығын көреміз.

Индуктивті элементтің синусоидалық i_L тогын және u_L кернеуін сәйкес кешенді мәндермен өрнектейік:

$$\dot{I}_L = I_L e^{j\psi_i} \quad \text{және} \quad \dot{U}_L = U_L e^{j\psi_u}.$$

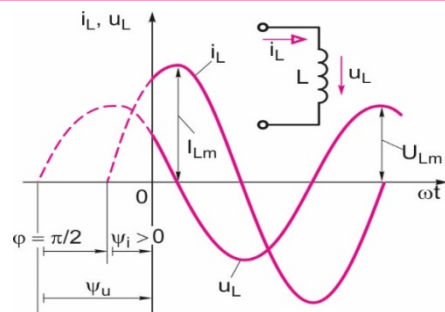
4.12-суретте индуктивті элементтің векторлық диаграммасы келтірілген және $\dot{I}_L$ тогының кешенді мәнінің векторы $\dot{U}_L$ кернеуінің кешенді мәнінің векторынан $\pi/2$ бұрышына артта қалып жатқандығы көрсетілген. (4.18) және (4.13) қатынастарын қолдана отырып, индуктивті элементке арналған кешенді түрдегі OM заңын аламыз:

$$\dot{U}_L = \omega L I_L e^{j\psi_u} = \omega L I_L e^{j(\psi_i + \pi/2)}$$

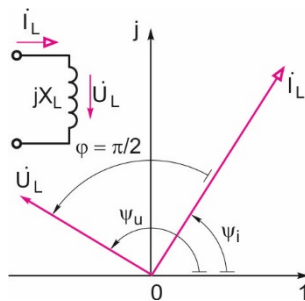
немесе

$$\dot{U}_L = j\omega L \dot{I}_L = jX_L \dot{I}_L. \quad (4.19)$$

(4.19) өрнегіндегі $j\omega L = jX_L$ шамасы индуктивті элементтің кешенді кедергісі деп, ал оған кері $1/j\omega L = -jB_L$ шамасы – индуктивті элементтің кешенді өткізгіштігі деп аталады.



4.11-сурет



4.12-сурет

Сыйымдылық элементі. Егер сыйымдылық элементтерінің арасындағы кернеу синусоидалық өзгертін болса:

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u)$$

онда (1.13) бойынша сыйымдылық элементіндегі ток

$$\begin{aligned} i_C &= C di_C / dt = \omega C I_{Cm} \cos(\omega t + \psi_u) = \\ &= I_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u + \pi / 2) = I_{Cm} \sin(\omega t + \psi_i) \end{aligned}$$

мұндағы кернеу мен ток амплитудасы және олардың бастапқы фазалары:

$$\left. \begin{aligned} I_{Cm} &= \omega C U_{Cm}; \\ \psi_i &= \psi_u + \pi / 2 \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

қатынасымен байланысқан.

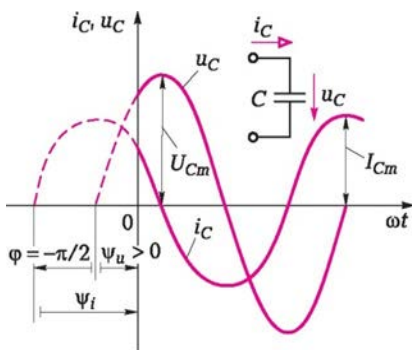
(4.20)-дағы теңдеудегі бірінші қатынастың оң және сол бөліктерін $\sqrt{2}$ -ге бөліп сыйымдылық элементтің кернеуі мен тогының әсерлік мәндеріне арналған қатынасты аламыз:

$$U_C = \frac{1}{\omega C} I_C = X_C I_C \quad (4.21)$$

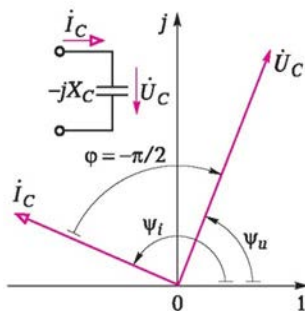
Өлшем бірлігі Ом болып табылатын (4.21)-ші өрнектегі $X_C = 1/\omega C$ шамасы *сыйымдылық кедергісі* деп, ал өлшем бірлігі $\text{Ом}^{-1} = \text{См}$ болатын оған кері шама $B_C = \omega C$ – *сыйымдылық өткізгіштігі* деп аталады. X_C және B_C шамалары – синусоидалық токтар тізбегінің сыйымдылық элементтерінің параметрлері.

Индуктивті кедергіге кері сыйымдылық кедергісі синусоидалық ток жиілігі артқан сайын азаяып, тұрақты кернеу кезінде өте үлкен мәнге ие болады.

4.13-суретте сыйымдылық элементтің синусоидалық тогы мен



4.13-сурет



4.14-сурет

кернеуінің лездік мәндерінің графигі берілген ($\psi_u > 0$ кезінде тұрғызылған), одан u_C кернеуінің i_C тогынан $\psi_i - \psi_u = \pi/2$ бұрышына артта қалатыны көрсетілген, яғни кернеу мен ток арасындағы *фаза бойынша ауытқу* мынаған тең болады:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi / 2$$

Сыйымдылық элементтің синусоидалық i_C тогын және u_C кернеуін сәйкес кешенді мәндермен өрнектейік:

$$\dot{I}_C = I_C e^{j\psi_i} \quad \text{және} \quad \dot{U}_C = U_C e^{j\psi_u}.$$

4.14-суретте сыйымдылық элементінің векторлық диаграммасы келтірілген және $\dot{U}_C$ кернеуінің кешенді мәнінің векторы $\dot{I}_C$ тогының кешенді мәнінің векторынан $\pi/2$ бұрышына артта қалып жатқандығы көрсетілген.

(4.21) және (4.13) өрнектерін ескере отырып, *сыйымдылық элементіне арналған кешенді түрдегі ОМ заңын* аламыз:

$$\dot{U}_C = \frac{1}{\omega C} I_C e^{j\psi_u} = \frac{1}{\omega C} I_C e^{j(\psi_i - \pi/2)}$$

немесе

$$\dot{U}_C = \frac{1}{j\omega C} \dot{I}_C = -jX_C \dot{I}_C. \quad (4.22)$$

(4.22)-гі өрнектегі $1/j\omega C = -jX_C$ шамасы *сыйымдылық элементінің кешенді кедергісі* деп, ал оған кері $j\omega C = -jB_C$ шамасы – *сыйымдылық элементінің кешенді өткізгіштігі* деп аталады.

4.2-мысал. Индуктивті және сыйымдылық элементтеріндегі синусоидалық кернеу, $f = 10^4$ Гц жиілігінде $U_C = 10$ В және $U_C = 20$ В әсерлік мәніне ие. Параметрлерінің мәндері $L = 10^{-4}$ Гн және $C = 10^{-6}$ Ф кезіндегі индуктивті және сыйымдылық элементтеріндегі токтардың әсерлік мәндерін табыңыз.

Шешімі. Синусоидалық ток тізбегіндегі индуктивті және сыйымдылық элементтеріндегі кедергі (4.18) бен (4.21) бойынша

$$X_L = \omega L = 2\pi f L = 2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4} = 6,28 \text{ Ом}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = 1/(2\pi f C) = 1/(2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}) = 15,9 \text{ Ом}$$

тең.

Индуктивті және сыйымдылық элементтеріндегі синусоидалық токтардың әсерлік мәндері (4.18) бен (4.21) бойынша мынаған тең:

$$I_L = U_L / X_L = 10 / 6,28 = 1,59 \text{ А};$$

$$I_C = U_C / X_C = 20 / 15,9 = 1,26 \text{ А}.$$

Синусоидалық токтардың тізбектеріне арналған Кирхгоф заңдарының математикалық тұжырымдамасы синусоидалық шамаларды өрнектеудің таңдап алынған әдісіне байланысты болады.

Кирхгофтың бірінші заңы. Кирхгофтың бірінші заңы бойынша уақыттың әрбір моментіндегі жәлектр тізбегінің кез-келген түйініндегі токтардың алгебралық қосындысы нөлге тең:

$$\sum_{k=1}^n i_k = \sum_{k=1}^n I_{mk} \sin(\omega t + \psi_{ik}) = 0 \quad (4.23)$$

мұндағы n – түйінде тоғысатын тармақтар саны; k – тармақтың реттік нөмірі.

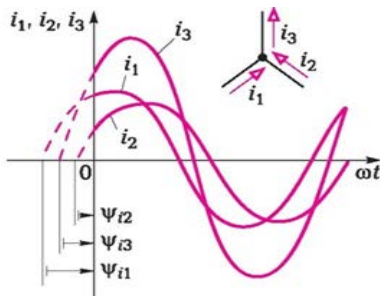
Оң бағыттары түйінге қарай (түйіннен) алынған синусоидалық токтардың барлығын ары қарай минус (плюс) таңбасымен жазатын боламыз. Мысалы, 4.15-суреттегі түйін мен синусоидалық токтардың лездік мәндері үшін:

$$i_1 = I_{m1} \sin(\omega t + \psi_{i1}); i_2 = I_{m2} \sin(\omega t + \psi_{i2}); i_3 = I_{m3} \sin(\omega t + \psi_{i3});$$

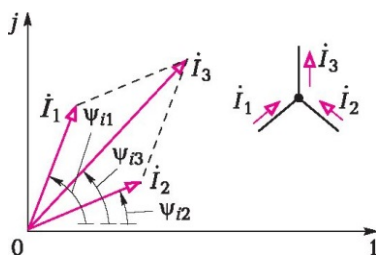
Кирхгофтың бірінші заңы бойынша кез келген уақыт моментінде:

$$\sum_{k=1}^3 i_k = -i_1 - i_2 + i_3 = 0$$

(4.23)-тегі барлық синусоидалық токтарды (4.8) бойынша оларға сәйкес келетін $\dot{I}_k = I_k \angle \psi_{ik}$ кешенді мәндерімен өрнектейік, кешенді түдегі Кирхгофтың бірінші заңын аламыз:



4.15-сурет



4.16-сурет

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = 0 \quad (4.24)$$

яғни, синусоидалық ток тізбегінің кез-келген түйініндегі токтардың кешенді мәндерінің алгебралық қосындысы нөлге тең. Мұнда оң бағыттары түйінге қарай (түйіннен) алынған токтардың кешенді мәндері «минус» («плюс») таңбасымен жазылады.

Мысалы, 4.16-суреттегі түйін мен токтардың кешенді мәндері үшін:

$$\dot{I}_1 = I_1 \angle \psi_{i1}; \dot{I}_2 = I_2 \angle \psi_{i2}; \dot{I}_3 = I_3 \angle \psi_{i3}$$

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = -\dot{I}_1 - \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0$$

Кирхгофтың екінші заңы. Кирхгофтың екінші заңы бойынша әрбір уақыт мезетіндегі электр тізбегінің кез-келген контурының барлық бөліктеріндегі кернеулердің алгебралық қосындысы нөлге тең:

$$\sum_{k=1}^m u_k = \sum_{k=1}^m U_{mk} \sin(\omega t + \psi_{uk}) = 0 \quad (4.25)$$

мұндағы оң бағыттары контур айналымының еркін таңдап алынған бағытымен сәйкес келетін (қарама-қарсы) кернеулер «плюс» («минус») таңбасымен жазылады; m – бөліктер саны; k – бөліктің реттік нөмірі.

Тек қана пассивті (резистивті, индуктивті, сыйымдылық) элементтерінен және ЭҚК көзінен тұратын тізбек схемасының контуры үшін, әрбір уақыт мезетіндегі контурдың пассивті элементтеріндегі кернеулерінің алгебралық қосындысы ЭҚК алгебралық қосындысына тең, яғни Кирхгофтың екінші заңы:

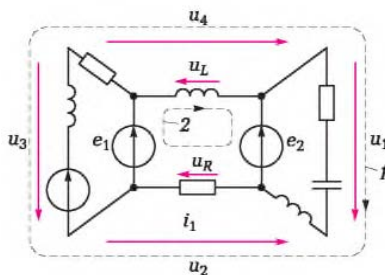
$$\sum_{k=1}^n u_k = \sum_{k=1}^m e_k \quad (4.26)$$

түрінде болады, немесе:

$$\sum_{k=1}^n U_{mk} \sin(\omega t + \psi_{uk}) = \sum_{k=1}^m E_{mk} \sin(\omega t + \psi_{ek})$$

мұндағы n және m – контурдағы пассивті элементтердің және ЭҚК-ң саны.

(4.26)-шы өрнектегі, оң бағыттары контур айналымының еркін таңдап алынған бағытымен сәйкес келетін (қарама-қарсы) u_k кернеуі мен e_k ЭҚК-і «плюс» («минус») таңбасымен жазылады.



4.17-сурет

Мысалы, 1-ші контур үшін тізбек схемасында (4.25) бойынша (4.17-сурет):

$$u_1 - u_2 - u_3 + u_4 = 0,$$

2-контур үшін (4.26) бойынша

$$u_R - u_L = e_1 - e_2.$$

Барлық синусоидалық шамаларды (4.25) пен (4.26)-да оларға сәйкес кешенді мәндерімен (4.8) бойынша өрнектеп:

$$\dot{U}_k = U_k \angle \psi_{uk}; \text{ және } \dot{E}_k = E_k \angle \psi_{ek};$$

Кирхгофтың екінші заңын кешенді түрінде аламыз:

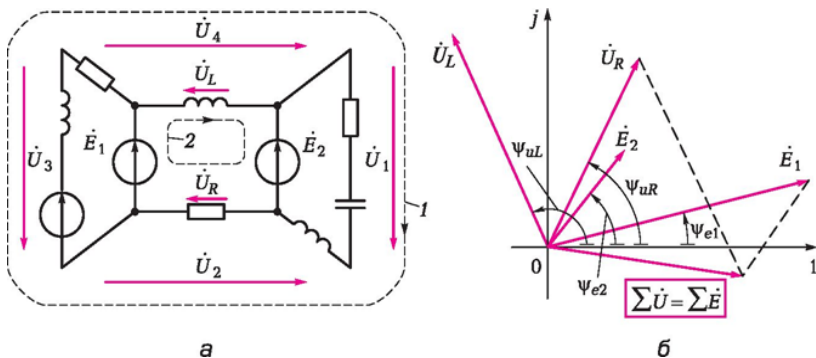
$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=1}^m \dot{U}_k &= 0; \\ \sum_{k=1}^n \dot{U}_k &= \sum_{k=1}^m \dot{E}_k \end{aligned} \right\} \quad (4.27)$$

(4.27)-ші теңдеулерде «плюс» («минус») таңбасымен, оң бағыттары контур айналымының еркін таңдап алынған бағытымен сәйкес келетін (қарама-қарсы) кернеу мен ЭҚК-нің кешенді мәндері жазылады. Мысалы, 1 және 2-контурлар үшін таңдап алынған тізбек схемасында (4.18-сурет, а), (4.27) бойынша:

$$\dot{U}_1 - \dot{U}_2 - \dot{U}_3 + \dot{U}_4 = 0;$$

$$\dot{U}_K - \dot{U}_L = \dot{E}_1 - \dot{E}_2.$$

Сонымен қатар, 1 және 2-контурлар синусоидалық шамалары бар тізбек схемасында көрсетілген.



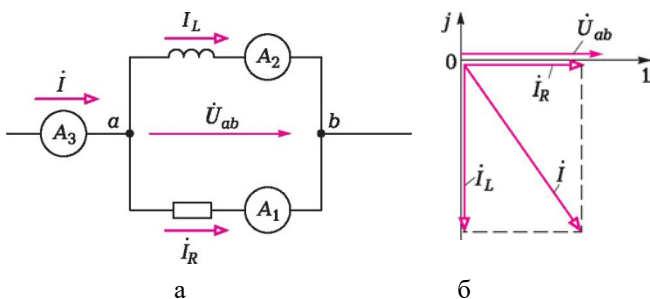
4.18-сурет

4.18, б суретінде, Кирхгофтың екінші заңын кешенді түрде көрнекілеп бейнелейтін, 2-контурдың ЭҚК-і мен кернеуінің векторлық диаграммасы құрылған.

4.3-мысал. 4.19, а суретіндегі синусоидалық ток тізбегіндегі схемада амперметрлер көмегімен тармақтардағы токтардың әсерлік мәндері қолданылады. Егер A_1 және A_2 амперметрлерінің көрсеткіштері 3 А мен 4 А-ға тең болатын болса, A_3 амперметріндегі көрсеткішті анықтаңыз.

Шешімі. Кернеу $\dot{U}_{ab}$ резистивті элементтегі $\dot{I}_R$ тогымен фазасы бойынша сәйкес келеді және $\pi/2$ бұрышқа индуктивті элементтегі $\dot{I}_L$ тогынан асып түседі (4.19-сурет, б). $\dot{I}_R$ мен $\dot{I}_L$ токтарының кешенді мәндерінің векторларының қосындылары Кирхгофтың бірінші заңы бойынша а түйіні үшін (4.24) токтың кешенді мәнінің векторын анықтайды $\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L$. Пифагор теоремасы бойынша I векторының модулі A_3 амперметрінің көрсеткіштерін анықтайды:

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5A$$



4.19-сурет

4.8.

СИНУСОИДАЛЫҚ ТОК ТІЗБЕГІН ЕСЕПТЕУДІҢ КЕШЕНДІ ӘДІСІ

Синусоидалық ток тізбегін есептеудің кешенді әдісі келесіден тұрады.

1. Тізбектің барлық элементтерінің параметрлері туралы бастапқы мәліметтерін кешенді түрде, яғни синусоидалық кернеу ЭҚК көздерін және лездік мәндермен берілген ток көздерінің токтары (тригонометриялық формада), индуктивті және сыйымдылық элементтерін оған сәйкес кешенді мәндермен (4.1-кесте) және кешенді кедергілермен немесе өткізгіштіктермен (4.2-кесте) өрнектейміз.

4.1-кесте. Синусоидалық ЭҚК-н және ток көздері токтарын кешенді мәндермен өрнектеу

Көзі	Лездік мәні	Кешендік мәні	Шартты белгісі
ЭҚК	$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$	$\dot{E} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_e}$	
Ток	$J(t) = J_m \sin(\omega t + \psi_J)$	$\dot{J} = \frac{J_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_J}$	

4.2-кесте. Пассивті элементтердің кешенді кедергілері мен өткізгіштіктері

Элемент	Параметрлер	Кешенді кедергі	Кешенді өткізгіштік
Резистивті	R	R	$1/R = G$
Индуктивті	L	$j\omega L = jX_L$	$1/j\omega L = -jB_L$
Сыйымдылық	C	$\frac{1}{j\omega C} = -jX_C$	$j\omega C = jB_C$

1. Барлық тармақтардағы кешенді токтардың оң бағыттарын таңдаймыз және оларды тізбек схемасында бағыттауыш сызықтарымен көрсетеміз.

2. Ом мен Кирхгоф заңы бойынша кешенді түрде тізбектің жұмыс режимін анықтайтын теңдеулер жүйесін құрамыз.

3. Алынған теңдеулер жүйесін шығарып, тізбек тармақтарындағы ток мәндерін және оның элементтеріндегі кернеулерді анықтаймыз.

4. Ток пен кернеулердің анықталған кешенді мәндері бойынша оларға сәйкес келетін синусоидалық токтар мен кернеулердің лездік мәндерін анықтаймыз.

Тұрақты токтың сызықтық тізбектері секілді синусоидалық токтың сызықтық тізбектерін есептеу кезінде есептемелерді қысқарту үшін, схемаларды түрлендіру (2.10-бөлімшені қараңыз), түйіндік потенциалдар (2.11-бөлімшені қараңыз), контурлық токтар (2.12-бөлімшені қараңыз), қабаттастыру (2.13-бөлімшені қараңыз) түрлі есептеу әдістерін қолдануға болады.

Бұл ретте тұрақты токтың тізбектерін есептеу әдістерінің математикалық тұжырымдамасы синусоидалық токтар тізбегін есептеу үшін де жарамды болып табылады. Тек барлық ЭҚК-н, кернеу мен токтарды сәйкес синусоидалық шамалардың кешенді мәндерімен, ал элементтер кедергісін – кешенді кедергілермен алмастыру қажет.

Бұдан әрі *ЭҚК, кернеу, ток және басқаларының кешенді мәндері*, және де оларға сәйкес келетін кешенді мәндер векторы түсінігі үшін қысқартылған терминдерді қолданатын боламыз, мысалы, *кешенді ток*, немесе *ток*.

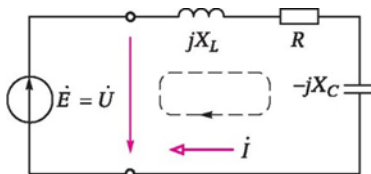
4.9.

ЭЛЕМЕНТТЕРІ ТІЗБЕКТЕЙ ЖАЛҒАНҒАН ЭЛЕКТР ТІЗБЕГІ

Элементтері тізбектей жалғанған тізбектердің, яғни тармақталмаған тізбектердің дара жағдайларын қарастырайық.

R , L және C элементтері тізбектей жалғанған тізбек (4.20-сурет). Элементтері тізбектей жалғанған тізбекте, $e = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$ синусоидалық ЭҚК көзі әсер еткен кезінде, ток та $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ синусоидалық болады, ал резистивті, индуктивті және сыйымдылық элементтеріндегі кернеу мынаған тең болады:

$$u_R = U_{Rm} \sin(\omega t + \psi_{uR}); u_L = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_{uL}); u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_{uC});$$



4.20-сурет

Тізбек жұмысының режимін кешенді әдіспен есептеу үшін барлық синусоидалық шамаларды (4.8) бойынша сәйкес кешенділер деп бейнелейік:

$$\dot{E} = E \angle \psi_e; \dot{I} = I \angle \psi_i; \dot{U}_R = U_R \angle \psi_{uR}; \dot{U}_L = U_L \angle \psi_{uL}; \dot{U}_C = U_C \angle \psi_{uC}.$$

4.20-суретте токтың, ЭҚК-нің және кернеудің оң бағыттары бағыттауыш сызығымен көрсетілген. Контур айналымы бағытын таңдап, Кирхгофтың екінші заңы бойыншы (4.27:)

$$\dot{U}_L + \dot{U}_R + \dot{U}_C = j\omega L \dot{I} + R \dot{I} - j \frac{1}{\omega C} \dot{I} = \dot{E}. \quad (4.28)$$

тендеуін жазайық.

Бұл жерде резистивті (4.16), индуктивті (4.19) және сыйымдылық (4.22) элементтері үшін Ом заңы ескерілген.

(4.28)-ден тізбектегі кешенді токты табамыз:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{R + j(\omega L - 1/\omega C)},$$

немесе

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + j(\omega L - 1/\omega C)}, \quad (4.29)$$

мұндағы $\dot{U} = U e^{j\psi_u} = \dot{E} = E e^{j\psi_e}$ – көзі шықпасы мен пассивті бөліктер арасындағы кернеу.

Кешенді токқа арналған өрнектің бөлімінде орналасқан шама (4.29), тізбектің тармақталмаған бөлігінің кешенді кедергісі деп аталады:

$$\underline{Z} = R + j(\omega L - 1/\omega C) = R + j(X_L - X_C). \quad (4.30)$$

Кешенді кедергіге кері шама кешенді өткізгіштік деп аталады:

$$\underline{Y} = 1/\underline{Z}.$$

Кешенді кедергі мен өткізгіштіктің белгіленуі токтың және кернеудің кешенді мәндерінің белгілерінен ерекшеленеді, себебі екіншісіне уақыт бойынша өзгеретін шамалар сәйкес келеді, ал біріншісіне – келмейді.

$\underline{Z}$ кешенді кедергінің әрбір мәніне кешенді сан ретінде кешенді жазықтықтағы нүкте сәйкес келеді. Оның орыны кешенді жазықтықтағы вектормен анықталады (4.21-сурет). Бұл вектор кешенді кедергінің геометриялық интерпретациясы болып табылады және де тура сондай $\underline{Z}$ белгіленуіне ие. Кешенді кедергінің қосылғыштары 4.21-суретте екі жағдайға: $X_L > X_C$ (4.21-сурет, а) және $X_L < X_C$ (4.21-сурет, б) арналған векторлар түрінде бейнеленген. Кешенді кедергінің геометриялық интерпретациясы кешенді кедергінің алгебралық жазу түрінен (4.30)

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z} &= Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi \\ \underline{Z} &= Ze^{j\varphi} = Z \angle \varphi \end{aligned} \right\} \quad (4.31)$$

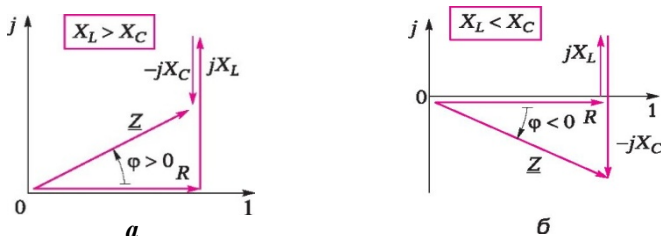
тригонометриялық және көрсеткіштік түрлерге жеңіл өтуіне

мүмкіндік береді, мұндағы $\underline{Z} = |\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ - кешенді кедергі модулі немесе өлшем бірлігі Ом болып табылатын, *толық*

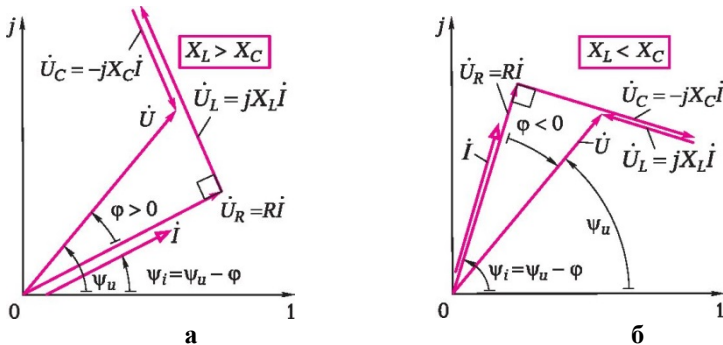
$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$ - кешенді кедергі аргументі.

$X_L - X_C$ шамасының таңбасына қарай кешенді кедергі аргументі оң ($\varphi > 0$ – 4.21, а суретіндегідей, кешенді кедергінің индуктивті сипаты) немесе теріс ($\varphi < 0$ – 4.21, б суретіндегідей, кешенді кедергінің сыйымдылық сипаты) болуы мүмкін, алайда ол әрқашан $|\varphi| \leq \pi/2$.

Кешенді кедергінің мәнін көрсеткіштік түрде (4.29)-ға қойып, *тармақталмаған тізбекке арналған Ом заңының* өрнегін аламыз:



4.21-сурет



4.22-сурет

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{\underline{Z}} = \frac{E}{Z} e^{j(\psi_e - \varphi)},$$

немесе

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{U}{Z} e^{j(\psi_u - \varphi)}, \quad (4.32)$$

мұндағы $I = U/Z$ — токтың әсерлік мәні; $\psi_i = \psi_u - \varphi$ — токтың бастапқы фазасы.

Тізбектегі кешенді ток белгілі болған жағдайда, резистивті, индуктивті және сыйымдылық элементтеріндегі кернеулер сәйкесінше (4.16), (4.19) және (4.22) формулалар бойынша есептелінеді.

4.22-суретте, бірдей $\dot{U} = U \angle \psi_u$ кернеуі кезіндегі тармақталмаған тізбектің (4.20 суретті қараңыз) тогы мен кернеуінің екі жағдайдағы: $X_L > X_C$ (4.22-сурет, а) және $X_L < X_C$ (4.22-сурет, б) векторлық диаграммалары келтірілген.

Егер тізбектің кешенді кедергісі индуктивті сипатқа ие болса, онда тізбектегі ток кернеуден фазасы бойынша артта қалады, себебі $\varphi > 0$ (4.21, а суретін қараңыз) және (4.32) бойынша $\psi_i < \psi_u$. Векторлық диаграммада φ бұрышының оң (теріс) мәні сағат тілінің қозғалыс бағытына қарама-қарсы (бағытымен) $\dot{I}$ тогының кешенді мәнінен бері қарай есептелінеді.

R және L элементтері тізбектей жалғанған тізбек (4.23-сурет) Резистивті және индуктивті элементтері тізбектей жалғанған тізбекте (4.2-сурет, а), (4.28) және (4.30)-шы өрнектер, векторлық диаграммаларда кернеулер мен кедергілердің тікбұрышты үшбұрыштары сәйкес келетін (4.23-сурет, а және б):

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_R + \dot{U}_L &= R\dot{I} + jX_L \dot{I} = \dot{U} = \dot{E}; \\ \underline{Z} &= R + jX_L, \end{aligned} \right\} \quad (4.33)$$

түрін қабылдайды.

Кедергілер мен кернеулердің тікбұрышты үшбұрыштарынан, тізбектің толық кедергісі

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2},$$

тең екендігі шығады, , ал тізбектегі оған салынған кернеу мен ток

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = I\sqrt{R^2 + X_L^2};$$

$$I = U / Z$$

болады.

R және C элементтері тізбектей жалғанған тізбек (4.24-сурет). Резистивті және сыйымдылық элементтері тізбектей жалғанған тізбекте (4.24-сурет, а), (4.28) және (4.30)-шы өрнектер, векторлық диаграммада кернеу мен кедергінің тікбұрышты үшбұрыштары сәйкес келетін (4.24-сурет, б және в)

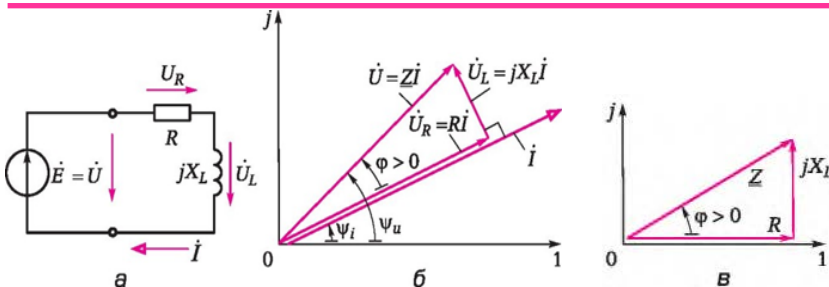
$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_R + \dot{U}_C &= R\dot{I} - jX_C \dot{I} = \dot{U} = \dot{E}; \\ \underline{Z} &= R - jX_C, \end{aligned} \right\} \quad (4.34)$$

түрін қабылдайды.

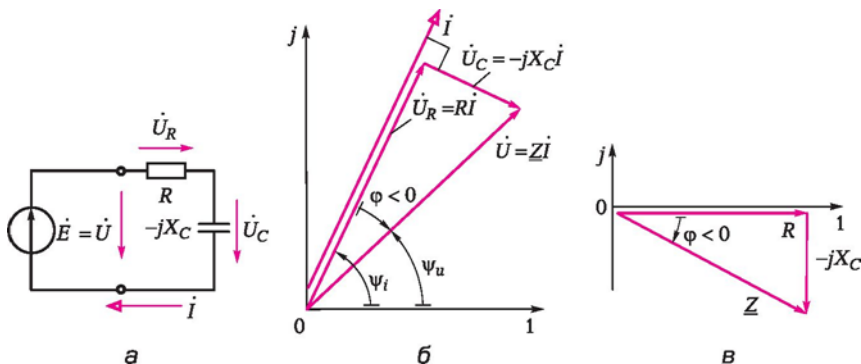
Кедергі мен кернеудің тікбұрышты үшбұрыштарынан, тізбектің толық кедергісі

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2},$$

болатындығы шығады,



4.23-сурет



4.24-сурет

ал тізбектегі салынған кернеу мен ток

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = I \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$I = U / Z$$

тең болады.

4.10. КЕРНЕУЛЕР РЕЗОНАНСЫ

Кернеулер резонансы, схемасы L индуктивті, C сыйымдылық және R резонансты элементтерден тұратын тізбектің тармақталмаған бөлігінде, яғни *тізбекті тербелмелі контурда* орын алуы мүмкін (4.25-сурет).

Ом заңы бойынша контурдағы токтың кешенді мәні:

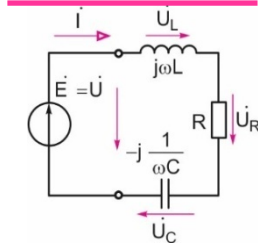
$$\dot{I} = I e^{j\psi_i} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{U e^{j\psi_u}}{Z e^{j\varphi}} \quad (4.35)$$

өрнегіне тең болады, мұндағы $\underline{Z} = R + j\omega L - j1/\omega C$ және

$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$ - контурдың кешенді және толық кедергісі;

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \arctg \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}$$

— кернеу мен ток арасындағы ығысу бұрышы, яғни кешенді кедергі аргументі;



4.25-сурет

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}$$

— токтың әсерлік мәні.

Резонансты кедергі деп индуктивті, тізбектік контурдың индуктивті, сыйымдылық және резистивті элементтерінен тұратын тізбектің тармақталмаған бөлігінің жұмыс істеу тәртібін атаймыз, бұл ретте оның тогы мен кернеуі фазасы бойынша сәйкес келеді

$$\psi_i = \psi_u \quad (4.36)$$

«Кернеулер резонансы» атауы қарама-қарсы фазалардағы сыйымдылық және индуктивті элементтердегі кернеулердің әрекеттегі мәндерінің теңдігін бейнелейді, бұл кернеудің $\psi_u = 0$ бастапқы фазасы таңдап алынған, 4.26-суреттегі векторлық диаграммадан көрініп тұр.

Кернеу мен ток арасындағы фазалардың ығысуы қатынасынан және (4.36)-шы шарттан, кернеулер резонансы байқалатын бұрыштық жиілік

$$\omega_{рез} L = 1/(\omega_{рез} C),$$

яғни

$$\omega_{рез} = 1/\sqrt{LC},$$

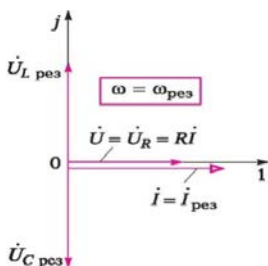
теңдігімен анықталатындығы шығады және резонансты деп аталады.

Кернеу резонансы кезінде тізбектегі ток $I_{рез} = U/R$ ең үлкен мәніне жетеді, ал сыйымдылық және индуктивті элементтердегі кернеу, егер

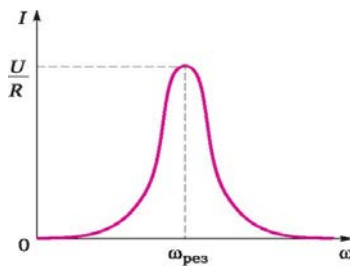
$$\omega_{рез} L = 1/(\omega_{рез} C) = \sqrt{L/C} > R$$

болса,

$$U_{Lрез} = U_{Cрез} = \omega_{рез} L I_{рез} = U \omega_{рез} L / R$$



4.26-сурет



4.27-сурет

көздегі кернеуінен (бірнеше есе) асып түсуі мүмкін.

$\rho = \sqrt{L/C} = \omega_{\text{рез}} L = 1/(\omega_{\text{рез}} C)$ шамасы Ом өлшемділігіне ие және тербелмелі контурдың *сипаттамалық кедергісі* деп аталады. Сипаттамалық кедергінің резистивті элементтің кедергісіне қатынасына тең, резонанс кезіндегі индуктивті немесе сыйымдылық элементтеріндегі кернеудің контур шықпалары арасындағы U кернеуге қатынасы, тербелмелі контурдың резонанстық қасиеттерін анықтайды (4.27-сурет) және *контур төзімділігі* деп аталады:

$$Q = \frac{U_{L_{\text{рез}}}}{U} = \frac{U_{C_{\text{рез}}}}{U} = \frac{\rho I_{L_{\text{рез}}}}{R I_{\text{рез}}} = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$$

Егер резонанс кезінде индуктивті және сыйымдылық кедергілерін бірдей санға n рет арттырсақ, онда тізбектегі ток өзгермейді, ал индуктивті және сыйымдылық элементтеріндегі кернеу сол санға n рет артады. Өзгермейтін $I = I_{\text{рез}} = U/R$ ток көзі кезінде индуктивті және сыйымдылық элементтеріндегі кернеуді шексіз ұлғайта беруге болады. Бұл құбылыстың физикалық себебі, сыйымдылық элементтерінің электр өрісінде, индуктивті элементтердің магнит өрісінде айналмалы жиналатын елеулі энергиясының тербелісі болып табылады.

Кернеулер резонансы кезінде энергия көзінен келетін және активті кедергідегі энергия шығынының орынын толтыратын энергияның аз мөлшері, тізбектегі өшпейтін тербелістерді магнитті және электр өрісі энергияларының үлкен мәндеріне қатысты ұстап тұруға жеткілікті.

Электрэнергетикалық қондырғылардағы кернеулер резонансы – жағымсыз құбылыс, себебі бұл жағдайда қондырғылардың кернеуі олардың жұмыс кернеуінен бірнеше есе асып түсуі мүмкін. Алайда, мысалға, радиотехникада, телефонияда, автоматикада кернеулер резонансы тізбектерді берілген жиілікке күйге келтіруіне пайдаланылады.

4.11. ТАРМАҚТАРЫ ПАРАЛЛЕЛЬЖАЛҒАНҒАН ЭЛЕКТР ТІЗБЕГІ

Екі параллель қосылған катушкалары бар синусоидалық ток тізбегін қарастырайық. Әрбір катушканы резистивті және индуктивті элементтері тізбектей жалғанған алмастыру схемасымен көрсетейік (4.28-сурет).

Тізбектің веткорлық диаграммасын тұрғызайық (4.29-сурет). Екі тармаққа да ортақ, $\dot{U}$ кернеу векторын нақты сандар осының бойымен тандап алынған масштабта қояйық. Екі тармақ та индуктивті сипатқа ие болғандықтан, екі тармақтағы $\dot{I}_1$ және $\dot{I}_2$ токтарының векторлары кернеуден фазасы бойынша сәйкесінше φ_1 және φ_2 бұрышқа артта қалуда. $\dot{I}_1$ және $\dot{I}_2$ векторларын қосып, тізбектің $\dot{I}$ жалпы тогы векторын аламыз. $\dot{I}_1, \dot{I}_2$ және $\dot{I}$ ток векторларын құраушыларға жіктейік. Кернеу векторымен сәйкес келетін құраушылар, *активтілер* деп аталады және мынаған тең болады:

$$I_{\delta} = I \cos \varphi;$$

$$I_{\delta 1} = I_1 \cos \varphi_1;$$

$$I_{\delta 2} = I_2 \cos \varphi_2,$$

Кернеу векторына перпендикуляр құраушылар реактивті деп аталады және ол мынаған тең:

$$I_p = I \sin \varphi;$$

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1;$$

$$I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2,$$

Тармақтардың толық кедергісін

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}; Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2};$$

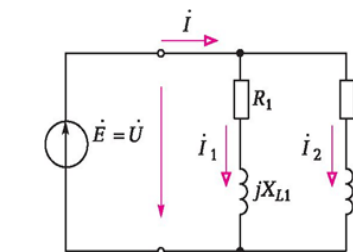
формулалары бойынша анықтайды, мұндағы R_1, R_2 және X_{L1}, X_{L2} - бірінші және екінші катушкалардың резистивті және индуктивті кедергілері.

Тармақтардағы токтардың әсерлік мәндері мынаған тең:

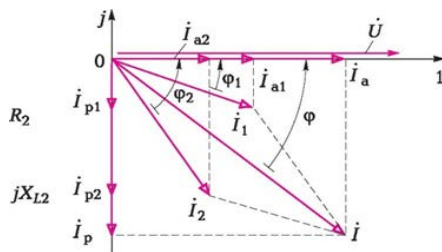
$$I_1 = U / Z_1; I_2 = U / Z_2$$

Тармақтардағы кернеу мен ток арасындағы фазалардың ығысу бұрыштары мына өрнекпен анықталады:

$$\cos \varphi_1 = R_1 / Z_1; \cos \varphi_2 = R_2 / Z_2$$



4.28-сурет



4.29-сурет

Тізбектің векторлық диаграммасынан (4.29-суретті қараңыз), I жалпы тогының активті және реактивті құраушылары

$$I_{\phi} = I_{\phi 1} + I_{\phi 2};$$

$$I_p = I_{p1} + I_{p2},$$

тең екендігі, ал ортақ ток

$$I = \sqrt{I_{\phi}^2 + I_p^2}$$

болатындығы көрініп тұр.

4.12. ТОКТАР РЕЗОНАНСЫ

Токтар резонансы, схемасында параллелді жалғанған индуктивті, сыйымдылық және резистивті элементтері бар, яғни параллелді тербелмелі контурдағы тізбекте орын алуы мүмкін (4.30-сурет).

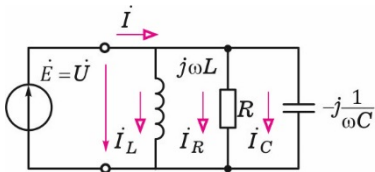
Мұндай тізбекте, резистивті элементтегі ток фазасы бойынша сәйкес келетін (4.10-суретті қараңыз), индуктивті элементтегі ток $\pi/2$ бұрышына артта қалатын (4.12-суретті қараңыз), сыйымдылық элементтегі ток $\pi/2$ бұрышына асып түсетін (4.18-суретті қараңыз), барлық элементтердегі кернеу бірдей. Бұл ретте сыйымдылық элементіндегі $I_C = \omega CU$ тогы бұрыштық жиілікке пропорционал өседі, индуктивті элементтегі $I_L = U/(\omega L)$ ток бұрыштық жиілікке кері пропорционалды, резистивті элементтегі $I_R = U/R$ тогы бұрыштық жиілікке тәуелсіз (4.31-сурет). Графиктердің қиылысу нүктесі, резонансты деп аталатын

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

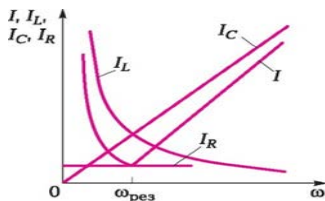
бұрыштық жиілігінде, жалпы ток

$$I = I_R = I_{\text{рез}}$$

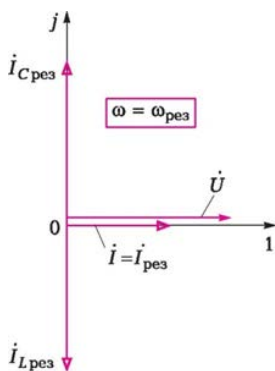
болатын, токтар резонансына сәйкес келеді.



4.30-сурет



4.31-сурет



4.32-сурет

«Токтар резонансы» атауы индуктивті және сыйымдылық элементтеріндегі $I_{L\text{рез}} = U / (\omega_{\text{рез}} L) = I_{C\text{рез}} = \omega_{\text{рез}} C U$ токтардың әсерлік мәндерінің, қарама-қарсы фазалардағы теңдігін бейнелейді, бұл кернеудің $\psi_u = 0$ бастапқы фазасы таңдап алынған, 4.32-суреттегі векторлық диаграммада көрініп тұр.

Егер токтар резонансы кезінде бірдей n сан рет индуктивті және сыйымдылық кедергілерін азайтатын болсақ, онда I_L және I_C токтары осындай сан рет артады. Өзгер-

мейтін $I = I_{\text{рез}} = U / R$ ток көзі кезінде осы токтарды шексіз арттыра беруге болады.

Кернеулер резонансына қарағанда токтар резонансы — электроэнергетикалық қондырғылар үшін қауіпсіз құбылыс. Токтар резонансы, кернеулер резонансы секілді радиотехникалық құрылғыларда қолданылады.

4.13. РЕЗИСТИВТІ, ИНДУКТИВТІ ЖӘНЕ СЫЙЫМДЫЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕРІНДЕГІ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕР

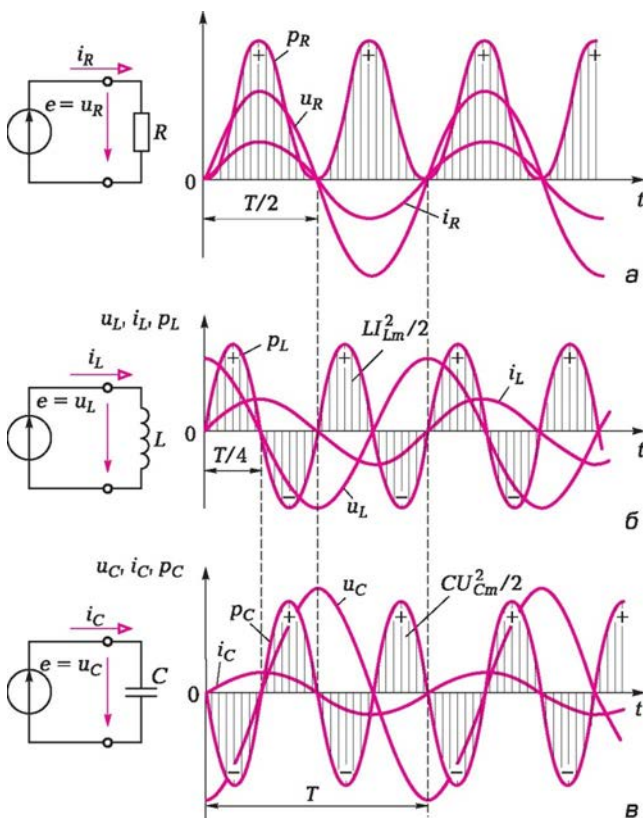
Синусоидалық ток тізбегіндегі энергетикалық процестер өте күрделі, себебі олардың түрлі элементтеріндегі физикалық процестер бірдей емес

Резистивті элемент. Резистивті элементте R кедергісімен $u_R = U_{Rm} \sin \omega t$ кернеуі кезінде $i_R = u_R / R = I_{Rm} \sin \omega t$ тогы, кернеумен фазасы бойынша сәйкес келеді. Кез-келген уақыт мезетінде резистивті элементтің қуаты (қуаттың лездік мәні)

$$p_R = u_R i_R = U_{Rm} I_{Rm} \sin^2 \omega t = \frac{U_{Rm} I_{Rm}}{2} (1 - \cos 2\omega t)$$

тең болады.

4.33, а суретінде резистивті элементтің i_R тогының, u_R кернеуінің және p_R қуатының лездік мәндері көрсетілген. Уақыттың кез-келген мезетіндегі резистивті элементтегі лездік қуаты оң, яғни уақыттың кез-келген интервалы арасында резистивті элементке энергия келіп түседі және көздің электр энергиясының оның басқа түрлеріне қайтымсыз түрленуі жүреді.



4.33-сурет

Период аралығындағы орташа қуат, яғни резистивті элементтің *активті қуаты*

$$P_R = \frac{1}{T} \int_0^T p_R dt = U_R I_R = R I_R^2 = I_R^2 / G = G U_R^2 = U_R^2 / R \quad (4.37)$$

тең болады, мұндағы $U_R = U_{Rm} / \sqrt{2}$ және $I_R = I_{Rm} / \sqrt{2}$ — кернеу мен тоқтың әсерлік мәндері.

Индуктивті элемент. Индуктивті элементтегі L кернеу (4.33-сурет, б)

$$u_L = L di_L / dt = U_{Lm} \sin(\omega t + \pi/2) = U_{Lm} \cos \omega t$$

фазасы бойынша $i_L = I_{Lm} \sin \omega t$ тоғын (тоқта нөлдік бастапқы фазасы таңдап алынған) $\pi/2$ бұрышына асып түседі. Индуктивті элементтің лездік қуаты:

$$p_L = u_L i_L = U_{Lm} I_{Lm} \sin \omega t \cos \omega t = \frac{U_{Lm} I_{Lm}}{2} \sin 2\omega t = U_L I_L \sin 2\omega t$$

өрнегіне тең болады, және ток жиілігінен екі есе көп жиілікпен синусоидалық өзгереді. Лездік қуат, индуктивті элементтегі токтың абсолюттік мәні бойынша (токтың бағытына қарамастан) өсуі кезінде оң; бұл уақытта индуктивті элементтің магнит өрісінде энергия жинақталады.

Периодтың келесі ширегіндегі p_L лездік қуаты теріс, яғни индуктивті элемент көзден энергия алмайды, керісінше көз индуктивті элементтен энергия алады.

Индуктивті элементтің период ішіндегі орташа мәні нөлге тең. Индуктивті элементтегі синусоидалық ток жұмыс атқармайды. Сондықтан да резистивті элементке қарағанда индуктивті элементтің энергетикалық режимін активті емес, лездік қуаттың максималды оң мәніне тең *реактивті индуктивті қуатпен*

$$Q_L = U_L I_L = X_L I_L^2 = U_L^2 / X_L = B_L U_L^2 = I_L^2 / B_L \quad (4.38)$$

анықтау қабылданған.

Сыйымдылық элементі. Сыйымдылық элементіндегі C кернеуі (4.33-сурет, в)

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt = U_{Cm} \sin(\omega t - \pi/2) = -U_{Cm} \cos \omega t ,$$

$i_C = I_{Cm} \sin \omega t$ тогынан $\pi/2$ бұрышқа фазасы бойынша артта қалуда. Сыйымдылық элементінің лездік қуаты

$$p_C = u_C i_C = -U_{Cm} I_{Cm} \sin \omega t \cos \omega t = -\frac{U_{Cm} I_{Cm}}{2} \sin 2\omega t = -U_C I_C \sin 2\omega t .$$

Индуктивті элементтегі секілді, сыйымдылық элементіндегі лездік қуат – жиілігі ток жиілігінен екі есе көп болатын, синусоидалық шама. Сыйымдылық элементіндегі лездік қуат, абсолюттік мәні бойынша кернеу ұлғаятын (кемитін) уақыт аралығында оң (теріс). Осы уақыт аралығы барысында сыйымдылық элементінің зарядталуы (зарядының бітуі) жүреді және оның электр өрісінде энергия жиналады (электр өрісінде жинақталған энергия көзге қайтып оралады)

Сыйымдылық элементінде индуктивті элементтегідей синусоидалық ток жұмыс атқармайды.

Сыйымдылық элементінің энергетикалық режимін, лездік қуаттың максималды теріс мәніне:

$$Q_C = -U_C I_C = -X_C I_C^2 = -I_C^2 / B_C = -U_C^2 / X_C = -B_C U_L^2 \quad (4.39)$$

тең *реактивті сыйымдылық қуатымен* анықтау қабылданған.

Егер индуктивті және сыйымдылық элементтері тізбектей жалғанған болса, яғни $i_L = i_C = i$, онда 4.33, б және в суреттеріндегі сәйкестендіруден көрініп тұрғандай, индуктивті элементтің магнит өрісінің энергиясы ұлғайған уақыт мезетінде, сыйымдылық элементінің электр өрісінің энергиясы азаяды, және керісінше. Демек, бұл элементтер тек көздермен ғана энергия алмасып қоймай, өзара да алмаса алады.

4.14. СИНУСОИДАЛЫҚ ТОК ТІЗБЕГІНДЕГІ АКТИВТІ, РЕАКТИВТІ, КЕШЕНДІ ЖӘНЕ ТОЛЫҚ ҚУАТЫ

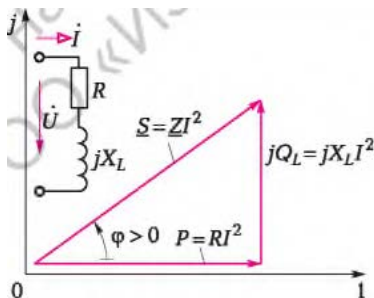
Егер R және L элементтері (4.23, в суретін қараңыз) және R мен C (4.24, в суретін қараңыз) элементтері тізбектей жалғанған тізбектер кедергілерінің үшбұрышының жақтарын I^2 -қа көбейтсек, 4.34 және 4.35-суреттерде көрсетілген, активті, реактивті және кешенді қуаттары құраушылары болып табылатын, *қуаттар үшбұрышын* аламыз.

Тізбектің активті қуаты резистивті элементте энергияның қайтымсыз түрленуінің орташа жылдамдығына тең:

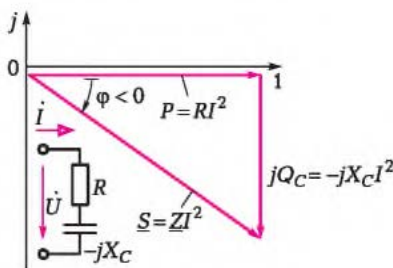
$$P = RI^2 = U_R I \quad (4.40)$$

Кедергі мен кернеу үшбұрыштарынан шығатыны, (4.23, б және в суреттерін және 4.24, б және в суреттерін қараңыз):

$$\cos \varphi = R / Z = U_R / U$$



4.34-сурет



4.35-сурет

Осы қатынастарды (4.40)-қа қойып, активті қуат үшін басқа өрнектерді аламыз

$$P = UI \cos \varphi \quad (4.41)$$

СИ-дегі активті қуаттың негізгі бірлігі— *ватт* (Вт).

Активті қуат ваттметр көмегімен өлшенеді (4.36-сурет). Ваттметр екі өлшеу тізбегіне ие, олардың бірі жүктеме тізбегімен бірге тізбекті қосылады, яғни ондағы ток жүктеме тогына тең, ал екіншісі – жүктеме тізбегіне параллель, яғни ондағы кернеу жүктемедегі кернеуге тең.

Кернеу мен ток арасындағы ығысу фазалары таңбасын ескеру үшін, өлшеу тізбектері ток пен кернеудің оң бағыттарына қатысты ұқсас етіп қосылуы қажет, сондықтан да әрбір өлшеу тізбегінің шықпаларының бірі ерекше белгіленуге ие (4.36-суреттегі жұлдызша).

Реактивті қуат көз бен тізбек арасындағы энергия алмасудың қайтарымды процесін анықтайды және

$$Q = UI \sin \varphi \quad (4.42)$$

тең болады.

Кедергілер үшбұрышынан R және L элементтерін тізбектей жалғау кезінде

$$\sin \varphi = X_L / Z$$

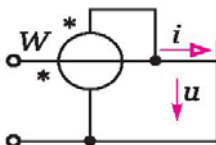
және R мен C тізбектей жалғау кезінде

$$\sin \varphi = -X_C / Z$$

Осы қатынастарды ескере отырып, тізбектің индуктивті сипатында ($\varphi > 0$), реактивті қуат оң, ал сыйымдылық кезінде ($\varphi < 0$) - теріс мәнге ие:

$$Q = Q_L = UI \sin \varphi = X_L I^2;$$

$$Q = Q_C = UI \sin \varphi = -X_C I^2$$



4.36-сурет

Толық қуат $\underline{S} = \underline{Z} I^2$ кешенді қуаттың модуліне тең және (4.32)-ні ескере отырып, тізбекке салынған кернеудің және токтың әрекеттегі мәндерінің көбейтіндісіне тең:

$$S = |\underline{S}| = \underline{Z} I^2 = UI \quad (4.43)$$

(4.41) — (4.43) формулаларын салыстыру арқылы, активті, реактивті және толық қуат арасындағы байланысты орнату қиынға соқпайды

$$S^2 = U^2 I^2 = (UI \cos \varphi)^2 + (UI \sin \varphi)^2$$

немесе

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4.44)$$

Активті, реактивті және толық қуаттар өлшемділігі сәйкес келеді, алайда соңғыларды өлшеу үшін өз бірліктері тандап алынған: реактивті вольт-ампер (вар) және вольт-ампери (В•А)

Активті қуаттың толық қуатқа қатынасы *қуаттылық коэффициенті* деп аталады, ол (4.41) мен (4.43)-тен

$$\cos \varphi = P / S \quad (4.45)$$

тең.

Толық қуат, көптеген электротехникалық құрылғылардың (генераторлар, трансформаторлар, электр машиналары және басқа да) қолдану мүмкіндіктерін анықтайды, олар үшін $S_{ном} = U_{ном} I_{ном}$ номиналды түрінде көрсетіледі. Мысалы, электр энергиясының генераторы үшін толық қуат, $\cos \varphi = 1$ қуаттылық коэффициенті мәнінде алынуы мүмкін, оның максималды активті қуатына тең.

Көптеген синусоидалық токты электротехникалық құрылғылары, мысалы трансформаторлар мен қозғалтқыштар, күшті магнит өрісіндерге ие. Мұндай құрылғыларда токтың реактивті (индуктивті) шамалары жоғары және кернеу мен ток арасындағы фазалар ығысуының бұрышы $\varphi > 0$ (4.29, *a* суретін қараңыз). Бұл олардың $\cos \varphi$ қуаттылық коэффициенті мен өнідірістік кәсіпорынның қуаттылық коэффициенті мәнін азайтады.

Электротехникалық құрылғылардың жұмысына қажетті реактивті индуктивті ток, тарату желісінің, трансформаторлардың, генераторлардың және басқа да электротехникалық жабдықтардың функционалдық мүмкіндіктерін шектейді. Егер қабылдағыштың реактивті индуктивті тогының орынын, оған қосымша конденсатор жалғау арқылы толтырумен, бұл шығындарды азайтуға болады. Конденсаторлардың реактивті (сыйымдылық) токтары қабылдағыштың реактивті (индуктивті) тогын өтейді.

Конденсаторлар қосу арқылы қуаттылық коэффициентін арттыру әдісі, қозғалтқыштардың толық қуатын қолданудан және реактивті токтары аз қозғалтқыштарды (синхронды) орнату арқылы алынатын, *табиғиға* қарағанда *жасанды* деп аталады.

4.15. СИНУСОИДАЛЫҚ ТОК ТІЗБЕГІНДЕГІ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТЕҢГЕРІМ

Барлық энергия көздерінің лездік қуаттарының алгебралық қосындысы барлық энергия қабылдағыштарының лездік қуаттарының алгебралық қосындысына тең. Бұл период аралығындағы қуаттардың орташа мәндеріне де қатысты.

Энергетикалық теңгерім — энергия көздерінің, яғни ток көздері мен ЭҚК (кернеу) көздерінің, энергия қабылдағыштарының, яғни резистивті, индуктивті және сыйымдылық элементтерінің кез-келген санынан тұратын, синусоидалық токтың энергетикалық тізбегіндегі *қуаттар теңгерімі*, біріншіден, *барлық энергия көздерінің активті қуаттарының алгебралық қосындысы барлық резистивті элементтердің қуаттарының арифметикалық қосындысына тең*

$$\sum U_{\kappa} I_{\kappa} \cos(\psi_u - \psi_i) = \sum R I_R^2$$

немесе

$$\boxed{\sum P_{\kappa} = \sum P_R} \quad (4.46)$$

екіншіден, барлық энергия көздерінің реактивті қуаттарының алгебралық қосындысы барлық индуктивті және сыйымдылық элементтерінің алгебралық қосындысына тең

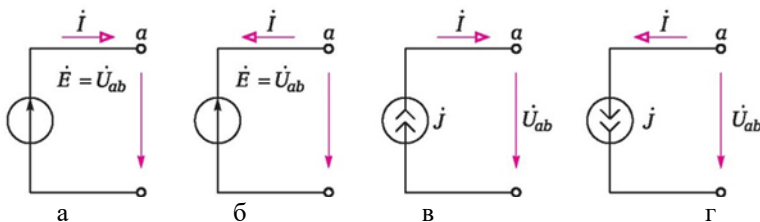
$$\sum U_{\kappa} I_{\kappa} \sin(\psi_u - \psi_i) = \sum X_L I_L^2 - \sum X_C I_C^2$$

немесе

$$\boxed{\sum Q_{\kappa} = \sum Q_L + \sum Q_C} \quad (4.47)$$

дегенді білдіреді.

ЭҚК көзінің активті $P_E = EI \cos(\psi_e - \psi_i) = U_{ab} I \cos(\psi_u - \psi_i)$ және реактивті $Q_E = EI \sin(\psi_e - \psi_i) = U_{ab} I \sin(\psi_u - \psi_i)$ қуаттары, егер $\dot{I}$



4.37-сурет

тогы мен $\dot{E} = \dot{U}_{ab}$ ЭҚК-нің бағыттары сәйкес келетін босла, «плюс» таңбасымен жазылады (4.37-сурет, а). Кері жағдайда (4.37-сурет, б) – «минус» таңбасымен. ток көзінің активті $P_J = U_{ab} I \cos(\psi_u - \psi_i)$ және реактивті $Q_J = U_{ab} I \sin(\psi_u - \psi_i)$ қуаттары, егер көз $j = i$ тогының бағыты және олардың шықпалары арасындағы $\dot{U}_{ab}$ кернеуі бағыты қарама-қарсы болса (4.37-сурет, в), «плюс» таңбасымен жазылады. Кері жағдайда (4.37-сурет, з) – «минус» таңбасымен жазылады.

4.16. ПАССИВТІ ТӨРТ ЖӘНЕ ҮШ ПОЛЮСТІЛЕР

Егер электротехникалық құрылғыларды, тізбектің басқа бөліктерімен 1 – 1' және 2 – 2' шықпалар жұбымен (полюстарымен) жалғанатын, *төрт полюсті* түрінде қарастыратын болсақ (4.38-сурет), олардың жұмыс режимін есептеу қысқарады. Егер төртполюстіде энергия көздері жоқ болса, онда оларды *пассивті*, ал егер бар болса – *активті* деп атайды. Активті төрт полюстіге мысал ретінде дифференциалды күшейткішті, пассивті төртполюстіге – екі орамды трансформаторды, телефондық байланыс желісін, өлшеуші көпірді келтіруге болады. Сызықтық пассивті төрт полюстінің схемасы тек сызықтық резистивті, индуктивті және сыйымдылық элементтерінен, сызықтық емес – сондай-ақ аттас сызықтық емес элементтерден тұрады.

Автоматика мен радиотехника құрылғыларында, төрт полюстінің шықпасындағы $\dot{U}_1$ кернеуінің кешенді мәндерінің оның кірісіндегі $\dot{U}_2$ кернеуіне қатынасының жиілігіне тәуелділігін білу маңызды. Кешенді кернеулердің салыстырмалы өзгерісі *кернеу жіберудің кешенді коэффициенті* деп аталады

$$\underline{K}_u = K_u(\omega) e^{j\theta_u(\omega)} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{U_2 \angle \psi_{u2}}{U_1 \angle \psi_{u1}} \quad (4.48)$$

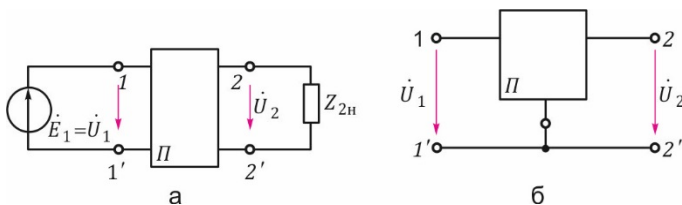
мұндағы

$$K_u(\omega) = U_2 / U_1 = \left| \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right| \quad (4.49)$$

- амплитудалық-жиіліктік сипаттама (АЖС);

$$\theta_u(\omega) = \psi_{u2} - \psi_{u1} \quad (4.50)$$

- төрт полюстінің кернеуінің фазалық жиілікті сипаттамасы (ФЖС).



4.38-сурет

Төрт полюске (сүзгіге, күшейткіштерге және т.б.) ие тізбектерді талдау кезінде *логарифмдік амплитудалық-жиіліктік сипаттаманы* (ЛАЖС) қолданады. Бұл ретте ординат осы бойымен, өлшем бірлігі децибел (дБ) $20 \lg K_u$ шамасының мәндері қойылады, және де абсцисс осы бойымен – ω бұрыштық жиіліктерінің немесе ондық логарифм масштабындағы $f = \omega / 2\pi$ жиілігі қойылады. $\lg \omega|_{\omega=0} = -\infty$ болғандықтан, абсцисс остерінде санақ басы жоқ, ал ордината және абсцисс остерінің қиылысу нүктесі ЛАЖС бейнелеу кезінде дербес таңдалады. ЛАЖС-сын сызықтық бөліктер жиынтығымен аппроксимациялау мүмкіндігі оның қолайлылығын білдіреді, бұл төрт полюстілерге ие тізбектерді талдауды жеңілдетеді. Мысалы, операциялық күшейткішті күшейту жолағын анықтау (15.16-суретті қараңыз).

Егер бір шықпа төрт полюсті тізбектің кірісі, ал екіншісі шықпа оның шығысы болып табылса, онда төрт полюсті үш полюстіні білдіреді.

4.17. ЭЛЕКТРЛІК СҮЗГІЛЕР

Периодты синусоидалық емес функция $\underline{f}(t) = f(t + kT)$ шартын қанағаттандырады, мұндағы T - функция периоды, яғни уақыт өткеннен кейін мәндері қайталанатын уақыт аралығы; k – бүтін сан.

Мұндай периодты функция, жалпы жағдайда шектелмеген, бірақ электрлі тізбектерді есептеу кезінде көбінесе n аяққы санды үйлесімді (синусоидты) құраушылардан (гармоник) тұратын, үйлесімді Фурье қатары түрінде көрсетілуі мүмкін екендігі математика курсынан мәлім. Мысалы, периодты синусоидалық емес ток

$$i = I_0 + I_{m1} \sin(\omega t + \psi_{i1}) + I_{m2} \sin(2\omega t + \psi_{i2}) + \dots + I_{mn} \sin(n\omega t + \psi_{in}).$$

Электрлік сүзгілер периодты синусоидалық емес токтар мен белгілі бір жиілікке ие немесе жиілік жолақтары шегінде кернеулердің үйлесімді құраушыларын, катушкалардың $k\omega L$ индуктивті кедергілері мен конденсаторлардың $1/k\omega C$ сыйымдылық кедергілерінің үйлесімділік құраушысының k нөміріне тәуелділігі негізінде азайтуға мүмкіндік береді.

Тегістеуші сүзгілер. Мұндай сүзгілер айналмалы кернеудің жоғары үйлесімдерін ұстап тұруды азайту үшін қолданылады.

Қарапайым тегістеуші сүзгі, шығыс шықпаларына $R_{2н}$ жүктеме кедергісі бар қабылдағыш жалғанған, пассивті сызықтық төртпюлюстіден тұрады (4.39-сурет, а).

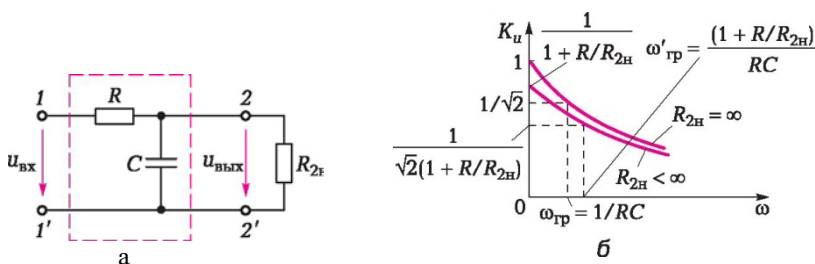
4.39, б суретінде жүктеменің ($R_{2н} = \infty$) ажыратылған тізбегіндегі

$$K_{ux}(\omega) = \frac{\frac{1}{\omega C}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

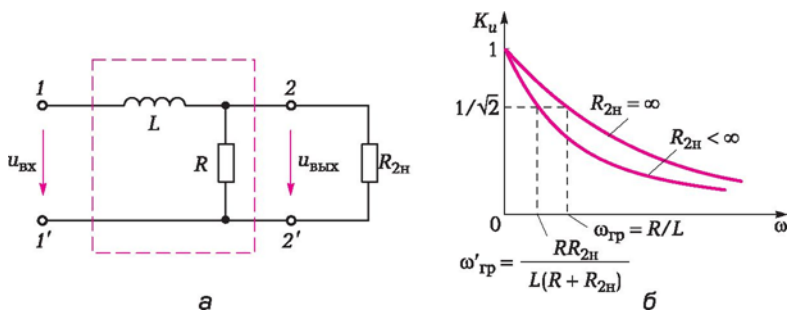
және $R_{2н} < \infty$ жүктеме тізбегінің кедергісі кезіндегі сүзгінің амплитудалық-жиіліктік сипаттамалары келтірілген.

2 – 2' шықпалары арасындағы синусоидалық кернеу амплитудасы мен 1 – 1' шықпалары арасындағы тұрақты амплитуда да, оның

нөлге тең бұрыштық жиілігіндегі мәнінен $\sqrt{2}$, яғни $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ есе аз бұрыштық жиілік $\omega_{шөк}$ шекаралық бұрыштық жиілік деп, ал бұрыштық жиіліктердің $0 \leq \omega \leq \omega_{шөк}$ диапазоны – тегістеуші сүзгінің өткізгіш жолағы деп аталады. Көбінесе бұрыштық жиіліктер орнына олардың сәйкес $f = \omega / 2\pi$ циклдік жиіліктерін қолданады.



4.39-сурет



4.40-сурет

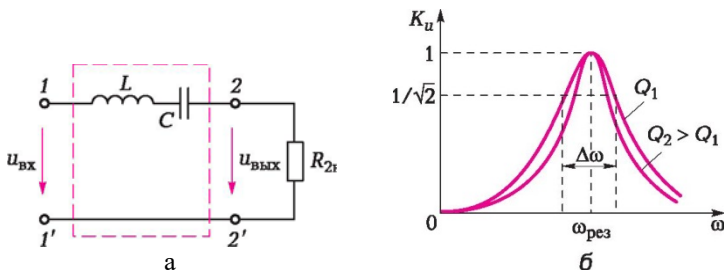
$R_{2,ж} = \infty$ жүктеменің ажыратылған тізбегіндегі

$$K_{ux}(\omega) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

және $R_{2,ж} < \infty$ жүктеме тізбегінің кедергісі кезіндегі, оған тән амплитудалық-жиіліктік сипаттамасымен қоса (4.40-сурет, б), тегістеуіш сүзгі қасиетіне пассивті төртпöлюсті де ие (4.40-сурет, а) RC -тізбегіне негізделген тегістегіш сүзгісіне қарағанда, RL -тізбегі негізіндегі тегістеуіш сүзгіде, демек, шекаралық бұрыштық жиіліктің мәні, яғни өткізу жолақтары жүктеме тізбегінің кедергісі азайған сайын кемиді.

Резонансты сүзгілер. Мұндай сүзгілерде электр тізбегіндегі кернеу мен ток резонанстары құбылысы, қабылдағыштағы кернеуде белгілі бір жиілік жолағын ерекшелеу немесе алып тастау үшін қолданылады.

Жолақтық сүзгіде (4.41-сурет, а) кернеулер резонансы құбылысы қолданылады (4.10-бөлімшені қараңыз).



4.41-сурет

Амплитудалық-жиіліктік сипаттама

$$K_u(\omega) = \frac{R_{2\kappa\kappa}}{\sqrt{[\omega L - 1/\omega C]^2 + R_{2\kappa\kappa}^2}} \quad (4.51)$$

4.41, б суретінде келтірілген.

Сүзгі бөліп шығаратын $\Delta\omega$ бұрыштық жиілік жолағының ені, $K_u = 1/\sqrt{2}$ деңгейінде

$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R_{2\kappa\kappa}}$$

тізбек төзімділігі үлкен болған сайын соншалықты аз болады.

Бөгеуші сүзгіде (4.42-сурет, а) ток резонансы құбылысы қолданылады (4.12-бөлімшені қараңыз). Оның амплитудалық-жиіліктік сипаттамасы

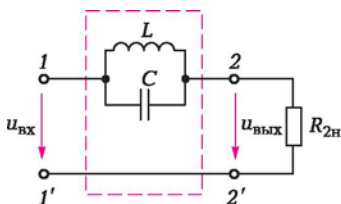
$$K_u(\omega) = \frac{R_{2\kappa\kappa} |1 - \omega^2 LC|}{\sqrt{(\omega L)^2 + R_{2\kappa\kappa} (1 - \omega^2 LC)^2}}$$

4.42, б суретінде келтірілген. Сүзгі бөгейтін $\Delta\omega$ бұрыштық жиілік жолағының ені $K_u = 1/\sqrt{2}$ деңгейінде анықталады.

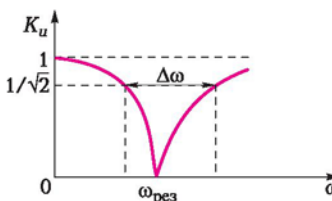
Таңдамалы RC-сүзгілері. Бұл сүзгілер тек резисторлар мен конденсаторлардан тұрады. Жолақты *RC-сүзгілеріне* мысал ретінде, *Вин белдемі* деп аталатын төртполюстіні алуға болады (4.43-сурет, а). Оның амплитудалық-жиіліктік сипаттамасы 4.43, б суретінде келтірілген. Амплитудалық-жиіліктік сипаттамасының максималды мәні $\frac{1}{3}$ -ке тең және

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (4.52)$$

бұрыштық жиілігінде қол жетімді болады.

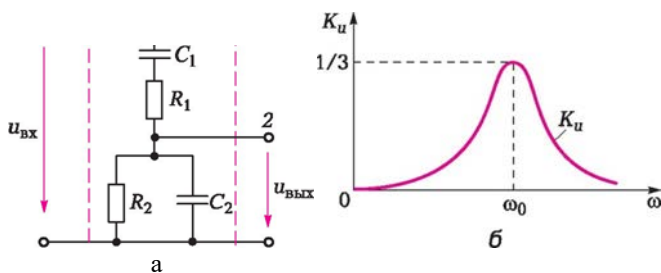


а

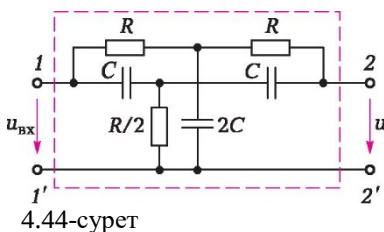


б

4.42-сурет



4.43-сурет



4.44-сурет

Бөгеуші RC -сүзгісі екі қабатты T -тәріздес көпірмен бейнеленеді (4.44-сурет). Жүктеменің ажыратылған тізбегінде оның амплитудалық-жиіліктік сипатының минимумына $\omega_0 = 1/(RC)$ бұрыштық жиілігі сәйкес келеді.

Бұл шартты дәлелдеу көп еңбекүті қажет етеді және бұл жерде келтірілмейді.

Таңдамалы RC -сүзгісінің басқа да схематехникалық шешімдері болуы мүмкін.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Синусоидалық шамалардың амплитудалық, әрекеттегі және орташа мәндері арасындағы қатынас қандай?
2. Неліктен электр қондырғысының қуаттылық коэффициентін арттыруға ұмтылады?
3. Неліктен тізбекті тербелмелі контурда (4.25-суретті қараңыз) кернеулер резонансы кезінде индуктивті және сыйымдылық элементтеріндегі $U_L = U_C$ кернеулер, U көзінің кернеуінің әсерлік мәнінен артық бола алады?
4. 4.39, а суретіндегі схема бойынша тегістегіш сүзгінің әсер ету принципі неге негізделген?
5. Жиілік артқан кезде резистивті, индуктивті және сыйымдылық элементтерінің кедергілерінің мәні қалай өзгереді (артады, азаяды, өзгермейді)?

6. Активті қуатты өлшеу кезінде ваттметрді дұрыс қосу үшін (4.36-суретті қараңыз) неліктен оның тогы мен кернеулері тізбегінің шықпа белгілерін ескеру қажет?
7. Халықаралық бірліктер жүйесінде (СИ) қандай негізгі бірліктер, синусоидалық тоқты электр тізбегіндегі активті, реактивті және толқы қуатты өлшеу үшін қолданылады?

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. $i = 10 \sin \omega t$ А синусоидалық токтың әсерлік мәнін анықтаңыз.
Жауабы: $10/\sqrt{2}$ А.
2. Электр тізбегі, тізбектей жалғанған кедергісі $R = 50$ Ом резистор және индуктивтілігі $L = 0,1$ Гн катушадан тұрады. ток жиілігі $f = 50$ Гц болған кездегі толық кедергіні анықтаңыз.
Жауабы: 59 Ом.
3. 2-ші есептің шарттарын сақтай отырып, $i = 10 \sin \omega t$ синусоидалық ток кезіндегі тізбек қысқыштарының арасындағы кернеудің әсерлік мәндерін анықтаңыз.
4. 2-ші және 3-ші есептердің шарттарын сақтай отырып, тізбектің активті, реактивті және толық қуатын анықтаңыз.
Жауабы: 2 500 Вт, 1 570 вар, 2 950 В • А.
5. Электр тізбегі тізбектей жалғанған кедергісі $R = 30$ Ом резистор мен сыйымдылығы $C = 6$ мкФ конденсатордан тұрады. ток жиілігі $f = 400$ Гц болғанда, тізбектің толық кедергісін анықтаңыз.
Жауабы: 72,8 Ом.
6. 5-ші есептің шарттарын сақтай отырып, тізбек қысқыштары арасындағы $u = 100 \sin \omega t$ синусоидалық кернеуі кезіндегі токтың әсерлік мәндерін анықтаңыз.
Жауабы: 0,975 А.
7. 5-ші және 6-шы есептердің шарттарын сақтай отырып, тізбектің активті, реактивті және толық қуатын анықтаңыз.
Жауабы: 28,5 Вт, -63,5 вар, 69 В • А.
8. $i = 100 \sin(\omega t - \frac{\pi}{4})$ А синусоидалық тогына сәйкес келетін $\dot{I}$ токтың кешенді әсерлік мәні неге тең?
Жауабы: $100/\sqrt{2} e^{-i\pi/4}$

9. $\dot{U} = 10e^{-i\pi/4}$ кернеуінің кешенді әсерлік мәні сәйкес келетін синусоидалық кернеу неге тең?

Жауабы: $u = 10\sqrt{2}\sin(\omega t - \pi/4)\text{В}$.

10. $u = U_m \sin(\omega t - \pi/2)$ синусоидалық кернеуі мен $i = I_m \sin(\omega t - \pi/3)$ тогы арасындағы фазалар ығысуы неге тең?

Жауабы: $-\pi/6$.

5.1. ЭЛЕКТРЛІК ӨЛШЕУ ҚҰРАЛДАРЫН, ТҮРЛЕРІН ЖӘНЕ ӘДІСТЕРІН ЖІКТЕУ

Электрлік өлшеу деп электрлік шамалардың параметрлерінің мәндерін арнайы құралдар көмегі арқылы тәжірибелік жолмен анықтау.

Өлшеу құралдары. Функционалдық тағайындалымы бойынша өлшеу құралдарын: өлшем, өлшеу құралдары, өлшеуіш түрлендіргіштер, өлшеу жүйелері мен өлшеуіш-есептеуіш кешендер деп ажыратады.

Өлшем, берілген мөлшердегі электрлік шамалардың мәндерін жаңғыртуға арналған.

Өлшеу құралдары, оперторға қол жетімді түрде өлшеніп жатқан шаманың мәндері туралы өлшеу ақпараттарын шығаруға арналған.

Өлшеу құралдарын:

- көрсеткіш, есепті құрылғының тек көрсетулерін ғана санайтын; өлшенетін шама тікелей өлшеммен салыстырылатын, салыстырушы; тіркейтін уақыттың нақты масштабында түрлі тасымалдаушыларда көрсеткіштерді тіркеуге рұқсат ететін, тіркеуші;
- балалы, олардың көрсеткіштері өлшенетін шаманың мәндерінің үздіксіз функциясы болып табылады, және өлшенетін шаманың мәндері уақтың тең интервалы арасында сандық кодтармен алмастырылатын сандық;
- түрлі тектес электрмеханикалық өлшеу механизмдері негізіндегі электрмеханикалық, және мұндай механизмдері жоқ немесе тек санақ құрылғысы ретінде ғана қолданылатын электрондық;

- қолдану сипатына қарай стационарлық (қалқандық) және ауыспалы деп бөлінеді.

Өлшеуіш түрлендіргіштер өлшенетін шамалардың мәндерін, ары қарай өңдеуге жеңіл, бірақ оператормен тікелей қабылданбайтын шамалардың пропорционалды мәндеріне түрлендіруге қолданылады.

Түрлендірілетін шамалардың сипатына қарай, электр шамаларын электр шамаларына, электрлік емес шамаларды электр шамаларына, магниттік шамаларды (индукциялар, магниттік ағын мен т.б.) электрлік шамаларға және электрлік шамаларды электрлік емес шамаларға (бағыттап көрсеткіштің ауытқуы және т.б.) өлшеуіш түрлендіргіштерді ажыратады.

Өлшеу жүйелері, бір-бірімен байланыс арналары арқылы жалғанған түрлі өлшеу құралдарының жиынтығынан тұрады және өлшемнің көп көлемін жинақтау мен талдауға арналған.

Өлшеуіш-есептеуіш кешені құрамына еркін бағдарламалантын компьютер кіретін өлшеу жүйесін білдіреді.

Өлшеу түрлері. Нәтижені алу әдісіне қарай тікелей, жанама және бірлескен өлшеулер деп бөлінеді.

Тікелей өлшеу кезінде өлшенетін шаманың мәні, межесі сәйкес бірлікте градуирленген, құрал-жабдық көрсетулерімен анықталады.

Жанама өлшеу кезінде өлшенетін шаманың мәні, оның өзі белгілі тәуелділіктермен байланысқан, басқа шамаларды тікелей өлшеуден алынған нәтижелер бойынша есептеледі. Мысалы, $R = U/I$ Ом заңы бойынша тұрақты ток тізбегіндегі резистор кедергісін өлшеу, I тогы мен U кернеуін өлшеу негізінде жүргізіледі.

Бірлескен өлшеу кезінде, өлшенетін шаманың мәні байланысты болатын, шамаларды тікелей немесе жанама өлшеуден нәтижесі алынады. Мысалы, Ом заңы бойынша электр кедергісінің температуралық коэффициентін өлшеу, ток пен кернеуді әртүрлі температуралық жағдайларда тікелей өлшеуге негізделген.

Өлшеу әдістері. Өлшеу құралдарын қолдану амалларына қарай өлшеу әдістерінің екі топқа ажыратады: тіке бағалау және өлшеммен салыстыру.

Өлшенетін шаманың мәнін *тіке бағалау әдісі*, көрсететін құралдың өлшемі көмегімен алдын ала градуирленген межесі бойынша тіке санақ бастаумен анықталады.

Өлшенетін шаманың мәнін *салыстыру әдісі*, өлшеммен қайта жаңғыртылатын аттас шаманың мәнімен салыстырылады. Нөлдік және дифференциалдық салыстыру әдістері деп бөлінеді. Бірінші

әдіспен өлшем мәні өлшенетін шаманың мәніне дейін реттеледі, ал жоғары сезімталдыққа ие өлшеу аспабы көмегімен тепе-теңдігі бекітіледі. Екінші әдіспен өлшенетін шаманың мәні өлшем мәнімен толығымен теңдестірілмейді, ал олардың мәндерінің айырымы тіке санақ жүргізу арқылы өлшенеді.

Салыстыру әдістері және олардың негізінде жасалынған өлшеу құралдары жоғары дәлдікке ие.

5.2.

ӨЛШЕУ ҚАТЕЛІКТЕРІ МЕН ДӘЛДІК КЛАСТАРЫ

Кез-келген физикалық шама мәндерін өлшеу қателіктермен, яғни оның өлшенген және шынайы мәні арасындағы айырмашылықпен бірге жүреді. Қателіктерді абсолюттік, салыстырмалы және келтірілген деп бөледі.

Абсолюттік ΔA және салыстырмалы γ_0 өлшеу қателіктері

$$\left. \begin{array}{l} \Delta A = A_{\text{олш}} - A; \\ \gamma_0 = (\Delta A / A)100\% \end{array} \right\} \quad (5.1)$$

формулаларымен анықталады, мұндағы $A_{\text{олш}}$ және A — өлшенетін шаманың өлшенген және нақты мәндері.

Көптеген жағдайларда абсолюттік қателік өте аз болады және

$$\gamma_0 = (\Delta A / A)100\%$$

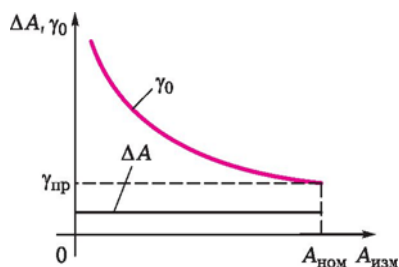
деп қабылдай аламыз.

Абсолюттік және салыстырмалы қателіктер оң және теріс мәндерге ие болуы мүмкін.

Мысалы, егер амперметр $A_{\text{олш}} = 5$ А көрсетсе, ал токтың нақты мәні $A = 4,9$ А болса, онда абсолюттік қателік $\Delta A = 0.1$ А, салыстырмалы қателік $\gamma_0 = (0,1/5)100\% = 2\%$.

Алайда көрсеткіш құралдардың дәлдігін салыстырмалы қателік бойынша көрсету онша қолайлы емес, себебі мұндай құралдардың абсолюттік қателігі барлық меже бойында аз өзгереді. Сондықтан да өлшенетін шаманың мәні кеміген сайын салыстырмалы қателік жылдам арта бастайды (5.1-сурет).

Көрсеткіш құралдардың дәлдігін бағалауға:



5.1-сурет

$$\gamma_{\text{кел}} = (\Delta A / A_{\text{ном}}) 100\% \quad (5.2)$$

келтірілген салыстырмалы қателік қолданылады.

5.1-кесте. Электрмеханикалық көрсеткіш құралдарының межесіндегі шартты белгілер	
Аспаптың атауы	Шартты белгісі
Фазалары біркелкі емес жүктелген үш фазалық тізбекте өлшеу жасауға арналған құрал	
Тура сол, екі элементті өлшеу механизмімен	
Сыртқы магнит өрісіндерден, мысалы 2 мТл қорғаныс	
Сыртқы электр өрістерінен, мысалы 10кВ/м қорғаныс	
Өлшеу диапазонында қателікті пайызбен нормалдау, мысалы 1,5 кезіндегі, дәлдік класы	1,5

Аспаптың атауы	Шартты белгісі
Тура сол, меже ұзындығы, мысалы 1,5 пайызында	
Меженің көлденең орналасуы	
Меженің тік орналасуы	
Деңгейжиегіне қатысты белгілі бір бұрышта, мысалы $\pi/3$, меженің еңкейіп орналасуы	
Жердің магнит өрісінде құралдың бағдарлану бағыты	
Өлшеуші тізбек жақтаудан оқшауланған және кернеумен, мысалы 2 кВ, сыналған	
Құрал оқшаулану беріктігін тексеруге жатпайды	
Абай болыңыз! Жақтауға қатысты өлшеуші тізбектің оқшаулау беркітігі нормаларға сәйкес келмейді (таңба қызыл түспен жазылады)	

мұндағы $A_{\text{ном}}$ — аспап межесіндегі ең үлкен мәнге тең *номиналды мәні*.

Мысалы, егер амперметр межесіндегі номиналды мән $A_{\text{ном}} = 10$ А, ал абсолютті қателік $\Delta A = 0,1$ А болса, онда келтірілген қателік $\gamma_0 = (0,1/10)100\% = 1\%$ болады.

Қателіктер мәні құрылғының өзінің кемшіліктерімен және сыртқы әсерлермен (ферромагнитті материалдардан жасалынған заттардың, магниттік және электрлік өрістер көзінің және т.б. құрылғыға жақын орналасуы) анықталады. Қалыпты жұмыс шарттарында анықталған және тек құрылғының қасиеттеріне ғана тәуелді болатын, келтірілген салыстырмалы қателік, *негізгі қателік* деп аталады.

Өлшеу құралдарын, рұқсат етілген негізгі қателікпен: ,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4 белгіленетін дәлдік кластарына бөледі. *Дәлдік класын* құрылғының беткі жақтамасында көрсетеді; ол меженің барлық бөліктеріндегі құрылғының абсолютті қателігі дәлдік классымен анықталатын мәннен аспайтындығын білдіреді.

Мысалы, егер дәлдік класы 1 болатын амперметр $A_{\text{ном}} = 10 \text{ А}$ номиналды мәніне ие межесі бар болса, онда өлшеулердің меже аясындағы абсолюттік қателігі (5.2) бойынша $\pm \Delta A = \pm \Delta A_{\text{ном}} / 100 = \pm 10 / 100 = \pm 0,1 \text{ А}$ аспайтын болады.

Сыртқы шарттардың қалыпты шарттардан ауытқуы *қосымша қателіктерді* туындатады.

$d\alpha / dA$ шамасы, мұндағы α — көрсеткіш құрылғының межесіндегі бөліктер, оның *сезімталдығы* деп аталады..

5.1-ші кестеде құрылғының жақтауларындағы, олардың йункционалды ерекшеліктері мен қалыпты пайдалану шарттарын білдіретін кейбір шартты белгілер келтірілген.

5.3. ЭЛЕКТР ӨЛШЕУІШ АСПАПТАРДЫҢ ЭНЕРГИЯ ТҰТЫНУЫ

Жұмыс істеп тұрған электр өлшеуіш аспап энергия тұтынады және сол арқылы өзі жалғанып тұрған электр тізбегінің жұмыс режиміне өзгерістер енгізеді. Өлшеу нәтижелерін өңдеу кезінде мұны ескеру қажет.

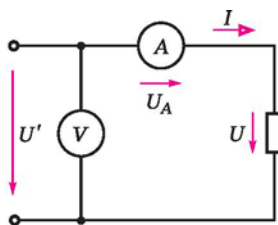
Ом заңы негізінде резистор кедергісінің (тұрақты ток кезінде) амперметр мен вольтметр көмегімен жанама өлшенуін қарастырайық. Аспаптарды қосудың екі схемасы болуы мүмкін.

5.2 суреттегі схемада амперметр R кедергісіне ие резистордағы I тогын, ал вольтметр — резистордағы және амперметр тізбегінің кернеулерінің $U' = U + R_A I$ қосындысын өлшейді, R_A — амперметр тізбегінің кедергісі; U — реистордағы кернеу. Демек, аспаптардың көрсетімдеріне сүйене отырып, Ом заңы бойынша резистор мен амперметр тізбегінің кедергілерінің қосындысы анықталады:

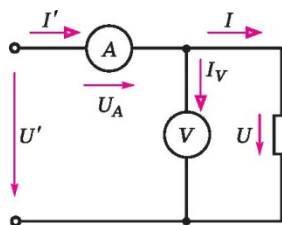
$$U' / I = R' = R + R_A$$

бұл ретте резистор кедергісінің нақты мәні:

$$R = R'(1 - R_A / R')$$



5.2-сурет



5.3-сурет

Амперметр тізбегінің кедергісі аз болған сайын, өлшеу қателігі де аз болады.

5.3-суреттегі схемада вольтметр резистордағы U кернеуін, ал амперметр — резистор мен вольтметр тізбегіндегі $I' = I + I_V$ токтар қосындысын өлшейді. Мұндай жағдайда аспаптар көрсетімдеріне сүйене отырып, Ом заңы бойынша резистор мен вольтметр тізбегіндегі өткізгіштіктер қосындысы анықталады

$$I'/U = 1/R' = 1/R + 1/R_V,$$

яғни

$$R = R'/(1 - R'/R_V),$$

мұндағы R_V — вольтметр тізбегінің кедергісі.

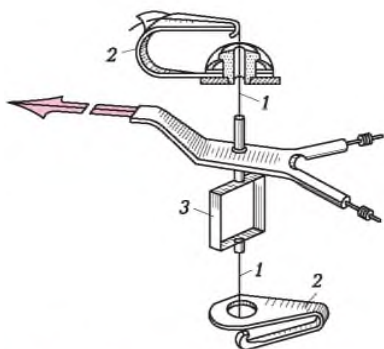
Вольтметр тізбегінің кедергісі аз болған сайын, өлшеу қателігі де аз болады.

Өлшеуіш аспаптар көмегімен басқарылатын электр тізбектерінің қуаттары аз болған сайын, олардың энергия тұтынуының нәтижелеріне әсері көп болады.

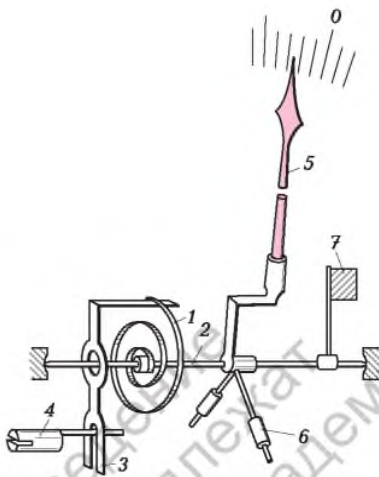
5.4. ЭЛЕКТРМЕХАНИКАЛЫҚ КӨРСЕТУШІ АСПАПТАРДЫҢ МЕХАНИКАЛЫҚ ТҮЙІНДЕРІ

Электрмеханикалық көрсетуші аспаптарда тікелей өлшеулер жасау үшін оның жылжымалы бөлігі, өлшенетін шаманың мәндеріне пропорционалды күштер әсерінен жылжымайтынға қатысты орын ауыстырады. Санақ құрылғысының құрылысына байланысты, жылжымалы бөлігін кергіге немесе остерге орнатқан кезде тілшелі және жарықтық көрсеткіштерге ие электрмеханикалық аспаптар деп бөлінеді.

Кергілер — бұл бериллиден немесе қалайы-мырышты қоладан жасалынған серпімді таспалар. Аспаптың жылжымалы бөлігі,



5.4-сурет



5.5-сурет

ұштары екі жалпақ серіппеге 2 бекітілетін, екі кергіге 1 (5.4-сурет) ілінеді. Кергілер құрылғының жылжымады бөлігін катушканың 3 жақтауларына ток жеткізу үшін қолданылуы мүмкін. Кергілерді бұрап қою кері әсер етуші моментті қамтамасыз етеді.

Оське жылжымалы бөлікті орнатқан кезде, тіректердегі үйкелісті азайту үшін көлденең орнатылады, ал кері әсер етуші моментті фосфорлы қоладан жасалынатын шиыршықты серіппелер тудырады.

Қалдық деформациялар мен мезаникалық әсер етулер салдарынан жұмыс істемейтін құрылғының тілшелі көрсеткіші нөлдік емес бөлікте орналасуы мүмкін. Оны нөлдік күйіне қайтару үшін корректорды қолданамыз. Кері әсер етуші моментті тудыру үшін (5.5-сурет) серіппенің 1 бір ұшы *корректордың* тізгініне 3, ал екіншісі – жылжымалы бөліктің 2 осыне бекітіледі. Тілшелі көрсеткішті 5, құрылғы жақтауындағы бұrandаны айналдырып, тізгін арқылы ығыстырып отыруға болады. Ось маңындағы жылжымалы бөліктің айналу массасы моменттерін теңдестіру үшін оған қарсы салмақ 6 бекітіледі. Мұндай құрылғылардың көрсеткіштері оның орналасуына тәуелді емес деуге де болады.

Серіппесі бар құрылғының жылжымалы бөлігі инерция мен серпімділікке ие. Сондықтан да, өлшенетін шаманың мәндері өзгерген кезде құрылғының жылжымалы бөлігінің тепе-теңдігінің жаңа күйі бірден орнатылмайды, көбінесе бірнеше тербелістерден

кейін ғана орнатылады. Жылжымалы бөліктің кинетикалық энергиясын жұту және өту процесінің уақытын азайту үшін құрылғылар тыныштандырғыштармен жабдықталады.

Магнитті индукциялық және ауа тыныштандырғыштары қолданылады.

Магнитті индукциялық тыныштандырғыш, жылжымалы бөліктің осыне бекітілген және жылжымайтын тұрақты магниттердің магнит өрісінде қозғалатын, алюминий сектордан құралған. Сектор қозғалысы кезінде ЭҚК, және соның әсерінен токтар да индукцияланады. Соңғыларының жылжымайтын тұрақты магниттердің магниттік өрісімен өзара әсерлесуі, жылжымалы бөліктің қозғалысына бөгет жасайтын күштерді тудырады.

Ауа тыныштандырғышы, құрылғының жылжымалы бөлігінің осыне бекітілген, жеңіл 7 алюминийлі «қанат» орналасқан (5.5-суретті қараңыз), жабық камерада тұрады. Тежеуіш ретінде, оның қозғалысы кезінде «қанаттың» екі жағындағы камерадағы қысымдар айырымы қолданылады.

5.5. ЭЛЕКТРМЕХАНИКАЛЫҚ АНАЛОГТЫҚ КӨРСЕТУШІ АСПАПТАР

Электрмеханикалық аналогтық көрсетуші аспаптар электрмеханикалық өлшеу механизмдері мен өлшеу тізбегінен тұрады.

Өлшеу механизмі электр энергиясын, жылжымалы бөліктің және онымен байланысты бағыттауыштың орын ауыстыруының механикалық энергиясына айналдырады.

Өлшеу тізбегі өлшенетін электр шамасының (кернеудің) мәнін, өлшеу механизміне тіке әсер етуші шаманың (токтың) пропорционалды мәндеріне түрлендіреді.

Бірдей өлшеу механизмдері түрлі өлшеу тізбектерімен бірлесіп, әтрүрлі шамаларды өлшеуге қолданыла алады.

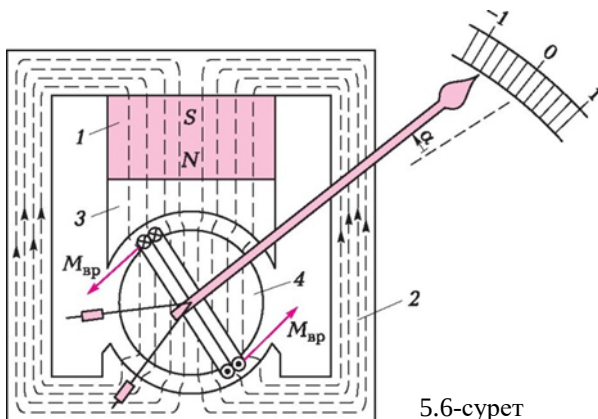
Өлшеу механизмінің әрекет ету принципіне қарай электрмеханикалық баламалы көрсеткіш құрылғылардың бірнеше жүйелерін бөліп ажыратады, олардың шартты белгілері 5.2-кестеде берілген.

5.2-кесте. Баламалы электрмеханикалық көрсеткіштің құрылғының әрекет ету (жүйе) принциптерін шартты белгілеу

Аспап жүйесінің атауы	Шартты белгісі	
	Қарапайым өлшеу механизмі	Логометриялық өлшеу механизмі
Жылжымалы катушкасы бар магнитті электрлік құрылғы		
Жылжымалы магниті бар магнитті электрлік құрылғы		
Электрмагниттік құрылғы		
Электромагнитті поляризацияланған құрылғы		
Электродинамикалық құрылғы		
Индукциялық құрылғы		
Электростатикалық құрылғы		

Магнитті электрлік жүйе. Магнитті электрлік жүйенің өлшеу механизмдерінде айналу моменті, катушкадағы өлшенетін тұрақты токтың тұрақты магниттің магнит өрісіне ие механизммен әсерлесуі есебінен туындайды. Магнитті электрлік жүйелерді жылжымалы катушкалы (жылжымалы жақтаулы) және жылжымалы магнитті деп ажыратады.

Жылжымалы катушкалы магнитті электрлік механизмде (5.6-сурет), соңғысы тірекке орнатылған және магниттік-жұмсақ материалдан және тұрақты магниттен 1 дайындалатын полюстік ұштың 3 және цилиндрлік білігіндегі 4, магниттік өткізгіш 2 құрамындағы магниттік тізбектің бос аралығында айнала алады.



5.6-сурет

Механизмнің жылжымалы бөлігіне

$$M_{\text{айн}} = 2Fwd / 2 = wBl d = k_{\text{айн}} I, \quad (5.3)$$

айналмалы моменті әсер етеді, мұндағы d және l — w орамдардан тұратын, катушка қаңқасының диаметрі мен ұзындығы; $F = BI$ — катушканың әрбір өткізгішіне әсер ететін күш; $k_{\text{айн}} = wBl d$ — айналу моментінің пропорционалдық коэффициенті.

Шиыршық серіппенің кері әсер етуші моменті (5.6-суретте көрсетілмеген) α катушкасының бұрылу бұрышына пропорционалды, яғни $M_{\text{np}} = k_{\text{np}} \alpha$, мұндағы k_{np} — пропорционалдық коэффициенті. $M_{\text{айн}} = M_{\text{np}}$ моменттерінің теңдігінде катушканың бұрылу бұрышы өлшенетін токқа пропорционалды:

$$I = k_{\text{np}} \alpha / k_{\text{айн}} = c_I \alpha \quad (5.4)$$

немесе

$$\alpha = \frac{1}{c_I} I$$

мұндағы c_I — құрылғы тұрақтысы («меже бөліктерінің бағамы»).

Магнитті электрлік жүйенің көрсеткіш құрылғыларының негізгі артықшылықтары — жоғары сезімталдық пен дәлдік класы (0,1-ге дейін) және өрістің магниттік индукциясын өлшеу механизмінің магниттік тізбегінің бос ауа кеңістігінде айтарлықтай (0,35 Тл-ға дейін) және біркелкі үлестірілуі салдарынан тұрақты ток тізбегінде өлшеу кезінде меженің біркелкілігі.

Негізгі кемшілігі – тек тұрақты токтарды ғана өлшеуі.

Синусоидальқ токты өлшеу үшін түрлендіргіштер қолданылады. Мысалы, екі жартылай периодты түзеткіш (5.7-сурет, мұндағы ӨМ – өлшеу механизмі) – тізбектегі i токтың (4.3) орташа мәнін өлшеуге мүмкіндік береді.

Гальванометрлер — межелері градиурленбеген және тұрақты токқа қатты сезімтал магнитті электрлік жүйе құрылғысы.

Электрмагниттік жүйе. Электромагнитті жүйені өлшеу механизмдеріндегі айналу моменті, құрылғының жылжымайтын катушкасындағы өлшенетін токтың магнит өрісінің жылжымалы ферромагнитті тетігіне электрмеханикалық әсерімен шартталған. Механикалық күштер, механизмнің магнит өрісінің энергиясы мүмкіндігінше үлкен болатындай етіп тетікті қозғалтуға ұмтылады.

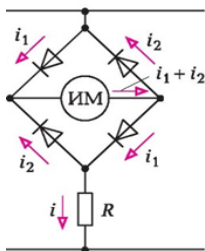
Электрмагниттік механизмде (5.8-сурет) тетік 1, өлшенетін ток тізбегіне кіретін, 2 катушкаға тартылады. Магнит өрісін күшейту және айналу моментінің мәнін басқару үшін жылжымайтын 3 ферромагнитті білік қолданылады.

Кері әсер етуші момент 5 шиыршықты серіппе әсерінен туындайды. Сыртқы магнит өрісіндерден қорғау мақсатында өлшеу механизмі 4 ферромагнитті экранға орналастырылған.

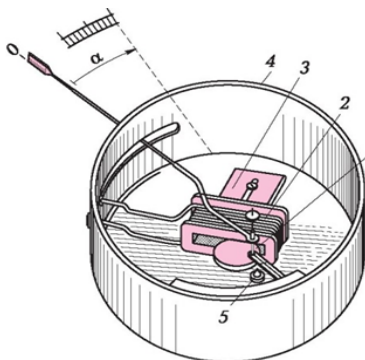
Жалпы жағдайда жылжымалы бөлікке әсер ететін айналу моменті $W_m = L(\alpha)i^2 / 2$ (3.23) магнит өрісі энергиясының α орын ауыстыру координатасы бойынша

$$M_{aйн} = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{i^2}{2} \frac{dL(\alpha)}{d\alpha} \quad (5.5)$$

туындысына тең, мұндағы $L(\alpha)$ мен i – катушка индуктивтілігі мен тогы.



5.7-сурет



5.8-сурет

Егер катушка тогы $i = I_m \sin \omega t$ синусоидалық болса, онда жылжымалы бөліктің тепе-теңдігі, айналу моменті мен серіппенің кері әсер етуші моментінің мәндерінің периодтағы орташасына тең болуы кезінде орындалады:

$$M_{aин} = \frac{I_m^2}{2\pi} \frac{dL(\alpha)}{d\alpha} \int_0^\pi \sin^2 \omega t d\omega t = \frac{I^2}{2} \frac{dL(\alpha)}{d\alpha} = M_{np} = k_{np} \alpha \quad (5.6)$$

мұндағы I — токтың әрекеттегі мәні.

Демек, өлшенетін токтың әсерлік мәні

$$I = \sqrt{\frac{2k_{np}}{dL(\alpha)/d\alpha}} \sqrt{\alpha} = c_I(\alpha) \sqrt{\alpha} \quad (5.7)$$

тең, немесе

$$\alpha = \frac{1}{c_I^2(\alpha)} I^2.$$

$i = I$ тұрақты токты өлшеу кезінде электромагнитті механизмді осыған ұқсас тәуелділікке ие.

Өлшенетін токқа ие катушканың магниттік өрісі салыстырмалы түрде өте әлсіз, себебі оның магниттік сызықтары жолдарының көп бөлігін ауада өткізеді. Осы себепті электромагнитті жүйенің өлшеу механизмінің сезімталдығы өте аз және оны сыртқы магнит өрісіндерден қорғап тұру қажет немесе астатикалық етіп жасау керек.

Астатикалық өлшеу механизмінде айналу моментінің түзілуіне бірдей мөлшерде қатысатын катушкалар саны екі еселенеді, ал олардың өзіндік магнит өрісіндері қарама-қарсы бағытқа ие болады.

Сыртқы біртекті магнит өрісі бір катушканың магнит өрісін күшейте отырып, өлшеу механизмінің ортақ айналу моментін өзгертпестен екінші катушканың магнит өрісін сондай дәрежеде әлсіретеді.

Электромагнитті жүйенің көрсеткіш құрылғыларының негізгі артықшылықтары — құрылымдарының қарапайымдылығы, жылжымайтын катушканың ток бойынша жүктемелерге орнықтылығы, ток қисығының пішінінен көрсеткіштердің тәуелсіздігі.

Негізгі кемшіліктері — жылжымалы біліктің геометриялық пішінін тандап алу арқылы жартылай жөндеуге болатын, меженің біркелкі еместігі, магнитті гистерезис пен өлшеу механизмінің ферромагнитті элементтерінде энергия жоғалтуы салдарынан, төмен класты дәлдік (1,5-тен жоғары емес).

Электродинамикалық жүйе. Электродинамикалық жүйенің өлшеу механизмінде айналу моментін тудыру үшін өлшенетін токқа ие екі катушканың өзара әсерлесуі қолданылады.

Электродинамикалық механизм жылжымайтын 1 және жылжымалы 2 катушкалардан тұрады (5.9-сурет). Кері әсер етуші моментті серіппе 3 тудырады.

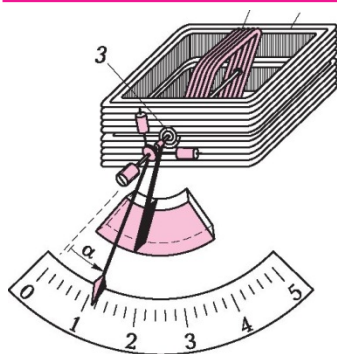
Электродинамикалық механизмнің айналу моменті электромагниттік механизмінің айналу моменті секілді анықталады

$$M_{aин} = \frac{dW_{\text{м}}}{d\alpha} = i_1 i_2 \frac{dM(\alpha)}{d\alpha}$$

мұндағы магнитті өріс өрнегіндегі катушканың α бұрылу бұрышына тек токтар мен жылжымайтын және жылжыйтын катушканың өзара индуктивтілігі - $M(\alpha)i_1 i_2; i_1, i_2$ және $M(\alpha)$ құраушылары ғана тәуелді болады.

Өлшеу механизмінде екі катушканың бар болуы оларды түрлі электрлік тармақтарды өлшеу үшін құрылғыларда қолдануға мүмкіндік береді.

Синусоидалық токтың i әрекеттегі мәнін өлшеу кезінде жылжымалы жәе жылжымайтын катушка параллелді жалғанады (5.10-сурет, a , мұндағы $i_1 = k_1 i, i_2 = k_2 i$ - катушкалар тогы). (5.5) және (5.8) тәуелділіктерін салыстыра отырып, және (5.6)-ға ұқсас түрлендіруді орындап, өлшенетін токтың әсерлік мәнін аламыз:



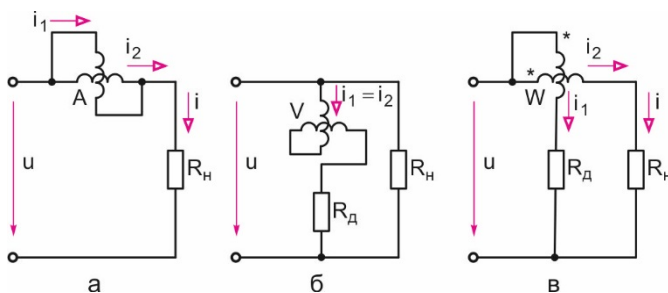
5.9-сурет

$$I = \sqrt{\frac{k_1 k_2 k_{np}}{dM(\alpha)/d\alpha}} \sqrt{\alpha} = c_I(\alpha) \sqrt{\alpha}$$

немесе

$$\alpha = \frac{1}{c_I^2(\alpha)} I^2$$

Өлшеу механизмдері тізбегіндегі түрлі жүйелер құрылғыларының өлшеу шектерін және функционалдық мүмкіндіктерін кеңейту үшін резистор-



5.10-сурет

ларды қосады. Өлшеу механизмінің катушкасымен бірге тізбектей жалғанатын резистор, *қосымша резистор* деп аталады. Өлшеу механизмінің немесе катушка мен қосымша резистордан тұратын тармақ катушкасымен бірге параллелді жалғанатын резистор, *шунт* деп аталады.

5.10, б және в суреттеріндегі схема бойынша электродинамикалық механизмді катушкаларды қосу, синусоидалық ток тізбегіндегі кернеу мен қуаттың әрекеттегі мәндерін өлшеуге мүмкіндік береді

$$U = (R_{\text{кос}} + R_K) \sqrt{\frac{k_{np}}{dM(\alpha)/d\alpha}} \sqrt{\alpha} = c_U(\alpha) \sqrt{\alpha}$$

$$P = UI \cos \varphi = \frac{(R_{\text{кос}} + R_{K1}) k_{np}}{dM(\alpha)/d\alpha} \alpha = c_P(\alpha) \alpha$$

немесе

$$\alpha = \frac{1}{c_U^2(\alpha)} U^2; \quad \alpha = \frac{1}{c_P(\alpha)} P,$$

мұндағы $R_{\text{кос}}, R_{K1}, R_K$ — қосымша резистордың, ваттметр кернеуі тізбегіндегі катушканың және вольтметр тізбегіне тізбектей жалғанған екі катушкалардың кедергілері; φ — кернеу мен ток арасындағы фазалардың ығысу бұрышы.

Амперметр мен вольтметрге қарағанда ваттметрдің жылжымалы және жылжымайтын катушкасының бірі – ток тізбегіне, екіншісі – кернеу тізбегіне қосылатындығын айта кетейік. Сондықтан да ваттметр көрсеткішінің ауытқуының бағыты, яғни өлшенетін қуаттың таңбасы, жұлдызшамен белгіленген катушка шықпаларын, ток пен кернеудің таңдап алынған оң бағыттарына ие тізбекке жалғау тәсіліне байланысты (4.14-бөлімшені қараңыз).

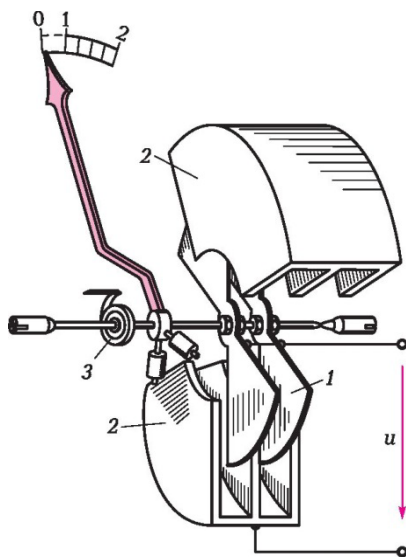
Тұрақты ток тізбегінде аттас шамаларды өлшеу кезінде электродинамикалық механизмдер де осыған ұқсас тәуелділіктерге ие.

Электродинамикалық жүйенің көрсеткіш құрылғыларының негізгі артықшылықтары – жоғары дәлдік класы (0,1-ге дейінгі), көрсеткіштердің өлшенетін ток немесе кернеу қиысығының пішініне тәуелсіздігі.

Негізгі кемшіліктері – катушкалардың магнит өрісінің әлсіз электрмеханикалық әсері салдарынан төмен сезімталдық, ток пен кернеудің әсерлік мәндерін өлшеу кезінде меженің біркелкі болмауы, құрылысының күрделілігі.

Электростатикалық жүйе. Электростатикалық жүйенің өлшеу механизмдерінде, пластиналар арасына салынған өлшенетін кернеудің әсерінен конденсатор пластиналары арасында түзілетін, зарядтардың өзара әсерлесуінің электростатикалық күштері есебінен айналу моменті туындайды.

Электростатикалық механизмдегі (5.11-сурет) айналу моменті, олардың арасындағы электростатикалық өріс энергиясы (1.15) мүмкіндігінше үлкен болатындай, жылжымалы бөлігін 1 оқшауланған жылжымайтын бөлігіне 2 қатысты бұруға тырысады.



5.11-сурет

Жалпы жағдайда айналу моменті $W_{эл} = C(\alpha)u^2 / 2$ (3.23) электр өрісі энергиясының α орын ауыстыру координатасы бойынша

$$M_{айн} = \frac{dW_{эл}}{d\alpha} = \frac{u^2}{2} \frac{dC(\alpha)}{d\alpha} \quad (5.5)$$

туындысына тең, мұндағы $C(\alpha)$ мен u – жылжымалы және жылжымайтын бөлігі арасындағы электрлік сыйымдылық пен олардың арасындағы кернеу.

Осы өрнектерді электрмагниттік механизмдегі айналу моментінің өрнегімен (5.5) салыстыра отырып, u мен i қатысты олар ұқсас екендігін көреміз.

Демек, (5.7)-ге ұқсас серіппенің 3 кері әсер етуші моментін ескере отырып, электростатикалық механизм $u = U_m \sin \omega t$ синусоидалық кернеудің әсерлік мәнін және $u = U$ тұрақты кернеуді өлшеуге мүмкіндік береді

$$U = \sqrt{\frac{2k_{np}}{dC(\alpha)/d\alpha}} \sqrt{\alpha} = c_U(\alpha) \sqrt{\alpha}$$

немесе

$$\alpha = \frac{1}{c_U^2(\alpha)} U^2$$

Электростатикалық жүйенің көрсеткіш аспаптардың негізгі артықшылығы – энергияны аз тұтынуы, жиіліктің кең диапазоны (10МГц-ке дейін), көрсеткіштердің кернеу қиысығының пішіне тәуелсіздігі.

Негізгі кемшіліктері — төмен сезімталдық, меженің біркелкі еместігі. Мұндай аспаптарды жоғары кернеуді өлшеу үшін қолданады.

Индукциялық жүйе. Индукциялық жүйенің өлшеу механизмдерінде айналмалы магнит өрісінің электрмеханикалық әсері қолданылады.

Индукциялық өлшеу механизмдерінде айналу моменті, синусоидалық токтың екі электромагнитінің қорытқы магнит өрісінің жылжымалы бөлікке – осы өріс құйынды токтарды қоздыратын алюминий дискке – әсері арқылы туындайды.

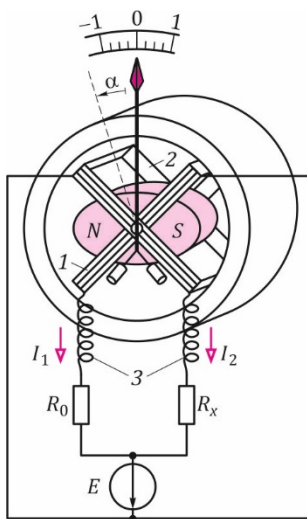
Айналу моментінің мәні электромагниттегі ток мәніне және олардың арасындағы фазалық ығысу бұрышына тәуелді. Индукциялық өлшеу механизмінің бұл қасиеті құрылғыларда синусоидалық ток тізбегіндегі (5.7-бөлімшені қараңыз) қуат пен энергияны өлшеу үшін қолданылады.

Логометр деп жылжымалы бөлігінің орналасуы екі токтың мәндерінің қатынасына тәуелді болатын көрсеткіш құрылғыларды атайды. Оларды электрлік (кедергі, индуктивтілік, фазалардың ығысу бұрышы) және электрлік емес (сұйықтық деңгейі, ылғалдылық және т.с.с.) шамаларды өлшеу үшін қолданады. 5.5-бөлімде қарастырылған кез-келген өлшеу жүйелерінің серіппе туындататын кері әсер етуші моментінің жоқ болуы секілді өзін тән ерекшеліктері бар логометрлік механизмін тұрғызуға болады.

Кедергіні өлшеу үшін магнитті электрлік логометрді қарастырайық. Тұрақты магниттің біртекті емес өрісінде (5.12-сурет) бір-біріне қатысты қозғалмайтын, тілшелі көрсеткіші бар ортақ оське бекітілген 1 және 2 екі катушкалары орналастырылған. Катушканың майысқақ ток өткізгіштері 3 арқылы ортақ көзге жағанады. Катушкаға әсер ететін айналу моменттері олардың біртекті емес магнит өрісінде орналасуына, яғни α бұрышы мен

$$I_1 = \frac{E}{R_0} \text{ және } I_2 = \frac{E}{R_x} \quad (5.9)$$

токтарына тәуелді, мұндағы R_0 және R_x – катушка орамдарының белгілі және белгісіз кедергілері.



5.12-сурет

I_1 және I_2 токтарының бағытын, катушкалардың айналу моменттері бір-біріне қарама-қарсы бағытталған болатындай етіп таңдап алады. (5.3)-те қабылданған белгілеулерді қолдана отырып, жылжымалы бөліктің

$$\begin{aligned} M_{aйн1} &= B_1(\alpha) w_1 I d I_1 = \\ &= M_{aйн2} = B_2(\alpha) w_2 I d I_2 \end{aligned} \quad (5.10)$$

тепе-теңдік шартын аламыз, мұндағы $B_1(\alpha)$ мен $B_2(\alpha)$ – өрістің магниттік индукциясының α бұрышының мәніне тәуелділігі. (5.10) қатынасы, жылжымалы бөліктің бұрылу бұрышы тек катушкадағы токтардың мәндерінің қатынасына ғана тәуелді екендігін көрсетеді.

(5.9)-дан I_1 және I_2 токтарының өрнегін

(5.10)-ға қойып, өлшенетін кедергі мен жылжымалы бөліктің бұрылу бұрышының мәндері тәуелділікті аламыз.

Жылжымалы бөліктің бұрылу бұрышының ЭҚК мәніне тәуелсіздігі омметрлерде және мегаомметрлерді (10^{14} Ом дейінгі) қолданылады. Соңғыларында электрлік оқшаулауды басқару үшін қол жетегіне ие генераторлар түріндегі (8.9-бөлімшені қараңыз) ЭҚК көздерін (2500 В дейінгі) қолданады.

Логометрлердің негізгі артықшылықтары – көрсетулердің көздегі кернеу мәніне тәуелсіздігі.

Негізгі кемшіліктері – меже біркелкі еместігі, төмен дәлдік класы (1,5-тен аспайды).

5.6. СИНУСОИДАЛЫҚ ТОКТАҒЫ ЭЛЕКТР ТІЗБЕКТЕРІНДЕГІ ЭНЕРГИЯНЫ ӨЛШЕУ

$Z_{\kappa c}$ жүктеме кедергісіне ие қабылдағыш тұтынатын активті энергияны өлшеу үшін электр тізбегіне жалғанған, бір фазалық индукциялық есептегіші құралының схемасы 5.13-суретте көрсетілген.

Есептегіштің жылжымалы бөлігі, қабылдағыштың активті қуатына пропорционалды айналу моменті

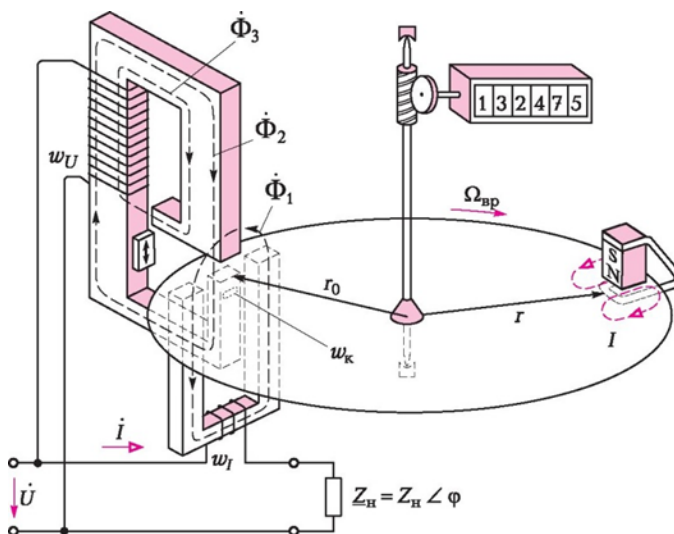
$$M_{a\dot{u}n} = k_{a\dot{u}n} P \quad (5.11)$$

және тежеуіш моменті қарама-қарсы бағыттарда бір уақытта әсер ететін, еркін қозғалатын алюминий дискіден тұрады. Айналу және тежеу моментінің теңдігі кезінде диск тұрақты жиілікпен айналады.

Тежеу моментін тудыру үшін магнитті индукциялық принцип қолданылады. Тұрақты магниттің өрісі айналмалы дискіде ЭҚК индукциялайды, оның мәні тұрақты магниттің Φ ағынына және полюстар арасында орналасқан диск бөлігінің айналуының орташа шеңберлік v жылдамдығына пропорционал:

$$E = k_1 \Phi v = k_1 \Phi 2\pi n / 60 = k_2 \Phi n$$

мұндағы $n = \Omega_{a\dot{u}n} 60 / 2\pi$ — диск айналу жиілігі, айн/мин; r — полюстер арасында орналасқан диск бөлігінің орташа радиусы; $\Omega_{a\dot{u}n} = v / r$ — дискінің бұрыштық айналу жылдамдығы.



5.13-сурет

Осы ЭҚК әсерінен дискте, мәні диск материалының γ меншікті өткізгіштігіне пропорционал ток туындайды:

$$I = k_3 E \gamma.$$

Тұрақты магнит өрісінің дискідегі токпен әсерлесуі ток пен ағынға пропорционалды тежеуіш моментін тудырады:

$$M_{\text{теж}} = k_4 I \Phi$$

немесе ток пен ЭҚК арналған өрнекті қойғаннан кейін

$$M_{\text{теж}} = k_5 r \gamma \Phi^2 n = k_{\text{теж}} n \quad (5.12)$$

мұндағы k_1 — k_5 — пропорционалдық коэффициенті.

Дискінің тұрақты айналу жиілігінде тежеу және айналу моменттері тең, яғни (5.11) мен (5.12)-ден активті қуат:

$$P = k_{\text{теж}} n / k_{\text{айн}}.$$

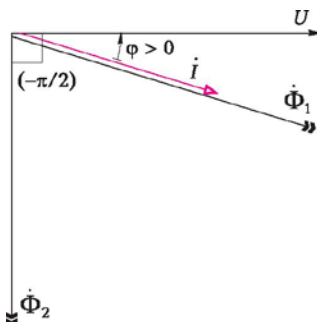
Қуаттан уақыт бойынша интегралы, $t_2 - t_1$ уақыт аралығында басқарылатын тізбекпен алынған электр энергиясына тең:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \frac{k_{\text{теж}}}{k_{\text{айн}}} \int_{t_1}^{t_2} n dt = \frac{k_{\text{теж}}}{k_{\text{айн}}} N = c_{ec} N \quad (5.13)$$

мұндағы $N = t_2 - t_1$ уақыт аралығындағы диск айналымдарының қосынды саны; c_{cc} — есептегіш тұрақтысы.

Дисктің N айналымдар санын, оның осымен бұрамдық таратқышпен байланыстырылған, санақ құрылғысы тіркейді.

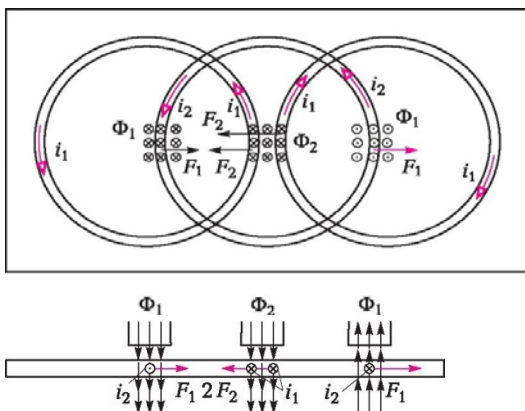
Бұрамдық таратқыштың беретін санын, санақ құрылғысы, жылжымалы бөліктің айналым санын емес, тек киловатт-сағатты көрсететіндей етіп таңдайды.



5.14-сурет

Айналу моментінің өрнегін алу үшін, U кернеу веткорын, яғни нөлдік бастапқы фазасына ие бастапқы вектор ретінде қабылдап, бастапқы есептегіштің ток пен кернеу тізбектерінің векторлық диаграммасына жүгінейік (5.14-сурет). Санғы аз w_l орамдағы $\dot{I}$ ток пен үлкен бос ауа кеңістігіне ие магниттік өткізгіштегі ол қоздыратын $\dot{\Phi}_1$ магниттік ағынының фазалары сәйкес келеді. Шағын бос ауа кеңістігіне ие магниттік өткізгіште орналасқан, орамдар саны өте көп w_v орамадағы шықпалар арасындағы U кернеуінің фазасы осы магниттік өткізгіштегі $\dot{\Phi}_2$ ағын фазасынан $\pi/2$ бұрышына өзгешеленеді.

Есептегіш кернеуінің тізбектегі w_U орамды сейілуінің ағындық ілінісі $w_U \Phi_3$ тең. Оның мәні өте үлкен және аз аралықтарда жылжымалы ферромагниттік пластинамен реттеле алады.



5.15-сурет

Жылжымайтын диск үлгісіндегі процестерді қарастырайық (5.15-сурет). Синусоидалық магнит ағындары

$$\Phi_1 = \Phi_{m1} \sin(\omega t - \varphi)$$

$$\text{және } \Phi_2 = \Phi_{m2} \sin(\omega t - \pi / 2) \quad (5.14)$$

резистивті жүктемеге ие трансформатордың екінші ретті орамы секілді дискіде құйынды токтарды қоздырады

$$i_1 = I_{m1} \sin(\omega t + \pi / 2 - \varphi) \text{ және } i_2 = I_{m2} \sin \omega t$$

және оларға әсер ететін күштер

$$F_1 = k_1 \Phi_1 i_2 \text{ және } F_2 = k_2 \Phi_2 i_1$$

мұндағы k_1 мен k_2 — магниттік жүйенің геометриялық параметрлерін ескеретін тұрақты коэффициенттері.

Осылайша, дискіге әсер ететін айналу моментінің орташа мәнін анықтауға болады

$$M_{\text{айн}} = \frac{2r_0}{T} \int_0^T (F_1 - F_2) dt = k_{\text{айн}} UI \cos \varphi$$

мұндағы r_0 — жүктеме радиусы; $k_{\text{айн}}$ — тұрақты коэффициент, және (5.14) қатынасы мен Φ_1 магниттік ағынның және I тізбек тогының, Φ_2 магниттік ағыны мен U тізбек керенуінің әсерлік мәндерінің арасындағы пропорционалды тәуелділіктер ескерілген.

Есептегіш тогы мен кернеуінің тізбегінің шықпалары ваттметрлерге қабылданған белгісі болуы керек (4.14-бөлімшені қараңыз).

5.8.

КӨПІРЛІК ӨЛШЕУ ӘДІСТЕРІ

Резисторлар, индуктивтілік катушкалары мен конденсатор параметрлерін өлшеу үшін көпірлік әдістерді қолданады. Индуктивтілік катушкалары мен конденсаторлардың параметрлерін өлшеу үшін синусоидалық ток көпірлері қажет. Резистор кедергілерінің мәнін өлшеу үшін тұрақты ток көпірлері қолданылады.

Тұрақты ток көпірі. 5.16-суретте *тұрақты токтың төрт иінді схемасы* келтірілген. Көпірдің бір диагоналіне тұрақты Е ЭҚК-і, екіншісіне K_1 және K_2 кілттерінің көмегімен — G гальванометр жалғанған.

b және d түйіндері арасындағы көпір иініне R_x белгісіз кедергілі резистор қосылған. Көпірдің басқа иіндерінде реттелетін резисторлар — 0,0005-ке дейінгі дәлдік класына ие манганин сымынан (2.1-кестені қараңыз) жасалынған бифилярлы

орамды кедергілердің үлгілік катушкалары жиынынан тұратын, үлгілік кедергілер қорабы тұр.

Көпір тепе-тендігінде b мен c нүктелерінің потенциалдары бірдей ($V_b = V_c$), яғни.

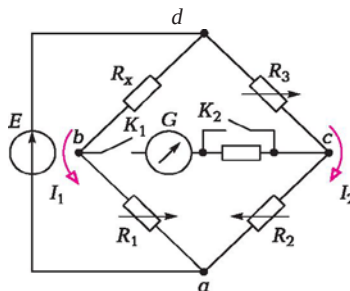
$$R_1 I_1 = R_2 I_2; R_x I_1 = R_3 I_2$$

Бірінші теңдікті мүшелеп жіктеп, өлшенетін кедергінің

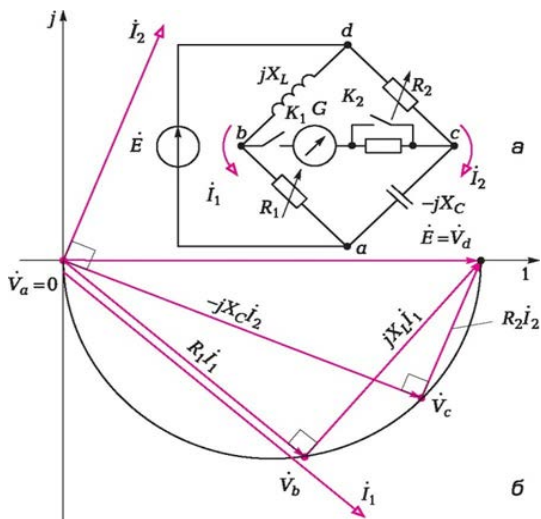
$$R_x = R_1 R_3 / R_2 \quad (5.15)$$

мәнін табамыз.

Синусоидальқ ток көпірі. Синусоидальқ токтың төрт иінді көпірлерінің схемасы әртүрлі. 5.17, a және b суреттерінде синусоидальқ токтың төрт иінді көпірлерінің схемасы және гальванометрдің ажыратылған тізбегі кезіндегі оның векторлық диаграммасы келтірілген. Көпірдің оң (4.24, b суретін қараңыз) және сол (4.23, b суретін қараңыз) тармақтардың кернеулер үшбұрыштары тікбұрышты болғандықтан b және c нүктелерінің кешенді потенциалдарын сипаттайтын векторлардың ұштары, $\dot{E} = E$ ЭҚК-не (ЭҚК-нің бастапқы фазасы нөлдік деп алынған) тең



5.16-сурет



5.17-сурет

жарты шеңбердің диаметрінде орналасқан. Көпірдің реттелетін элементтерінің параметрлерін өзгерте отырып, V_b және V_c потенциалдарының мәндерін өзгертуге болады. Көпірдің тепе-теңдігі ($\dot{V}_b = \dot{V}_c$) гальванометрмен тіркеледі.

Көпір тепе-теңдігі кезінде кернеулер үшбұрышының теңдігінен

$$R_1 \dot{I}_1 = -jX_C \dot{I}_2; jX_L \dot{I}_1 = R_2 \dot{I}_2$$

екендігі шығады.

Бір теңдеуді екіншісіне мүшелеп бөліп, және де $X_L = \omega L$ және $X_C = 1/\omega C$ екендігін ескере отырып,

$$L/R_1 = R_2 C \quad (5.16)$$

аламыз. (5.16)-шы өрнек, егер көпірдің басқа элементтерінің параметрлері белгілі және катушка мен конденсатордағы шығындарды елемеге болатын болса, синусоидалық ток көпірі индуктивті және сыйымдылық элементтерінің параметрлерін өлшеуге мүмкіндік беретіндігін көрсетеді.

0,0001 — 1 Гн аралығындағы үлгілік индуктивтілік катушкалары, мыс сымдары оралған орамаға ие магнитті емес материалдан (көбінесе фарфордан) жасалынған қаңқадан тұрады.

Айнымалы индуктивтіліктің үлгілік өлшемдері ретінде, бірі жылжымалы болып табылатын, тізбектей жалғанған екі катушкадан тұратын *вариометрлер* қолданылады.

Тұрақты (0,01 мкФ-ге дейін) және айнымалы (0,001 мкФ-ге дейін) сыйымдылықтардың үлгілік өлшемдерін ауа конденсаторлары, ал үлкен сыйымдылықты үлгілік өлшемдерін — диэлектригі ретінде слюда қолданылатын конденсаторлардан дайындайды.

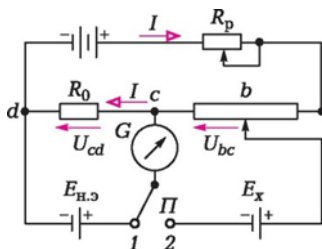
Үлгілік индуктивтілік катушкалары мен түрлі номиналды мәнге ие конденсаторлардың жиынтығы индуктивтілік және сыйымдылық қораптарын түзеді.

5.9.

ӨТЕМДЕУШІ ӨЛШЕУ ӘДІСІ

Өтемдеуші әдіс тұрақты ток тізбектеріндегі кіші ЭҚК мен кернеулерін өлшеу, мысалы термopapa ЭҚК, және электр өлшеуіш аспаптарды градуcтау үшін пайдаланылады.

Кіші E_x ЭҚК-н өтемдеуші әдіспен өлшеуге арналған тізбектің принциптік схемасы 5.18-суретте көрсетілген, мұндағы $E_{кз}$ — күкірт



5.18-сурет

қышқылды кадмийдің қаныққан немесе қанықпаған ерітіндісінен тұратын гальваникалық элемент болып табылатын, қалыпты элементтің ЭҚК-і (2.10-суретті қараңыз) 20 °С кезінде 0,0005 (0,002) жоғары дәлдік класына ие қаныққан (қанықпаған) қалыпты элементтердің ЭҚК-нің 1 мкА кем емес ток кезіндегі мәні 1,0185—1,0187 В (1,0188 — 1,0196 В) аралығында болады. Аз дәлдік кезінде қанықпаған элементтер аз ішкі кедергісіне (300 Ом-ға жуық) және ЭҚК-нің температураға аз тәуелділігіне ие.

Алдымен жұмыс тогының калибрленуі жүргізіледі. Ол үшін Π ауыстырып-қосқышын 1 күйіне келтіреміз және R_p реостат қозғалтқышының орынын ауыстыру арқылы G гальванометрде ток болмауына, яғни

$$U_{cd} = R_0 I = E_{нэ}, \quad (5.17)$$

теңдігіне қол жеткізеді, мұндағы R_0 — үлгілік резистор кедергісі.

Содан кейін E_x ЭҚК-і өлшенеді. Ол үшін Π ауыстырып-қосқышын 2 күйіне келтіріліп, үлгілік реостаттың қозғалтқышын жылжыту арқылы гальванометрде ток болмауына, яғни

$$U_{bc} = R_{bc} I = E_x$$

теңдігіне тағы да қол жеткізеді, немесе (5.17)-ні ескерсек,

$$E_x = \frac{R_{bc}}{R_0} E_{нэ}$$

мұндағы R_{bc} — үлгілік реостаттың b — c бөлігіндегі кедергісі.

Өтемдеуші өлшеу әдісін іске асырушы құрылғылар потенциометрлер деп аталады.

Патонциометрлердің негізгі артықшылықтары – өлшеу нысанынан энергияның іріктелуінің жоқ болуы және жоғары дәлдік класы (0,001-ге дейін).

Негізгі кемшілігі — төмен қуатты тұрақты ток тізбектерінде ғана өлшеу жүргізу.

Электрлік емес шамаларды өлшеуге арналған электрлік құрылғылар екі негізгі бөліктен: электрлік емес шаманың мәндерін электрлік шаманың пропорционал мәндеріне өлшеуіш түрлендіргіштерден (датчиктерден) және электр шамалары мәндерін өлшеу құралдарынан тұрады. Параметрлік және генераторлық өлшеуіш түрлендіргіштерге бөледі.

Параметрлік өлшеуіш түрлендіргіштер. Мұндай құрылғылар өлшенетін электрлік емес шамалардың мәндерін электр тізбегінің бір пассивті (резистивті, индуктивті, сыйымдылық) элементтерінің біреуінің параметрінің мәндеріне түрлендіреді. Олардың жұмыс атқаруы үшін қосымша электр энергиясының көзі қажет.

Реостатты түрлендіргіштерде, басқарылатын нысанның координатына тәуелді жылжымалы байланыстың орыны арқылы ұзындығы анықталатын, өткізгіш бөлігінің кедергісінің тәуелділігі қолданылады. Оларды электрлік емес шамаларды (мысалы, қысымды) сызықтық орын ауыстыруларға түрлендіру үшін пайдаланады.

Термосезімтал түрлендіргіштерде (терморезисторларында) өткізгіш немесе жартылай өткізгіш кедергісінің температураға тәуелділігі қолданылады.

Жұмыс режимі бойынша қатты қызып кету және әдейі емес қыздыру түрлендіргіштері деп бөледі.

Әдейі емес қыздыру түрлендіргіштеріндегі терморезистор тогы өте аз, және оның температурасы орта температурасымен анықталады. Мұндай түрлендіргіштер температураны өлшеу үшін қолданылады.

-260-тан 1100°C-ке дейінгі температуралар кезінде платина сымынан жасалынған; -200-ден 200 °C-ке дейінгі температураларда – мыс сымынан жасалынған; -60-тан 120°C-ке дейінгі температураларда жартылай өткізгіштер негізіндегі терморезисторларды қолданады.

Қатты қызып кету түрлендіргіштерінде терморезисторды қатты қыздыру салдарынан онда ток пайда болады. Бұл түрлендіргіштерді газ ағынының қозғалыс жылдамдығын (*терманеометрлер*), газ сиретілуі дәрежесін (*вакуумметрлер*), газдық қоспалар құрамын (*газ сараптаушылар*) және т.б. өлшеу үшін қолданады.

Индуктивті түрлендіргіштерде катушкалардың индуктивтілігі немесе өзара индуктивтілігінің магниттік тізбек элементтерінің бір-

біріне қатысты орналасу координаттарына тәуелділігі пайдаланылады. Мысалы, катушка индуктивтілігінің ондағы $L(x)$ біліктің сызықтық орын ауыстыруына немесе остері ортақтастырылып орналастырылған екі катушканың өзара индуктивтілігінің олардың арасындағы $M(x)$ арақашықтыққа тәуелділігі. Түрлендіргіштің индуктивті параметрлерін өлшеу үшін синусоидалық ток көпірлерін қолданады (5.8-бөл. қараңыз).

Сыйымдылық түрлендіргіштерінде конденсатордың C сыйымдылығының (1.11) оның жақтауларының $C = f_1(x)$ бір-біріне қатысты орналасуына және олардың арасындағы $C = f_2(\epsilon_r)$ диэлектриктің ϵ_r салыстырмалы диэлектрлік өткізгіштігіне тәуелділігі. $C = f_1(x)$ тәуелділігі сызықтық және бұрыштық орын ауытсыруларды өлшеу үшін, ал $C = f_2(\epsilon_r)$ тәуелділігі – зат ылғалдығын, диэлектриктен жасалынған бұйым қалыңдығын және т.б. өлшеу үшін қолданылады. Өлшеуіш түрлендіргіштердің сыйымдылығын өлшеу үшін синусоидалық ток көпірлері пайдаланылады (5.8-бөлімшені қараңыз).

Тензометрлік түрлендіргіштерде өткізгіш (кейбір металлдардан жасалынған) пен жартылай өткізгіштердің, мысалы бүгілу немесе бұрау кезінде туындайтын механикалық кернеулерге тәуелділігі пайдаланылады.

Генераторлық өлшеуіш түрлендіргіштер. Мұндай құрылғылар өлшенетін электрлік емес шаманың мәндерін ЭҚК-нің немесе электр зарядының пропорционалды мәндеріне түрлендіреді. Олар жұмыс жасау үшін электр энергиясы көздерін талап етпейді.

Термоэлектрлік түрлендіргіштер термопараның термоэлектрлік әсеріне негізделген. Термопара, бір ұштарында дәнекерленген түрлі тектес металлдардан жасалынған екі электродтан тұрады. Егер термопарның дәнекерленген ұштарын жоғары температуралы ортаға орналастырсақ, онда термопараның бос (суық) ұштарының арасында термоЭҚК пайда болады. Егер термопараның суық ұштарының температурасы ұдайы ұсталынып тұрса, онда оның мәні орта температурасына тәуелді. Мысал ретінде кеңінен таралған, хромель (90% Ni + 10% Cr) — копель (56% Cu + 44% Ni) материалдары негізіндегі термопараларды келтірейік: өлшенетін температуралардың жоғарғы шегі 600°C, 100°C дәнекерлену және 0 °C бос ұштарының температураларындағы термоЭҚК мәні 6,9 мВ .

Индукциялық түрлендіргіштер $e = -d\psi / dt$ (3.18) электромагниттік заңына негізделген. Оларды сызықтық $v(t)$ жылдамдықтары мен бұрыштық $\Omega(t)$ орын ауыстыруларды өлшеу үшін қолданады. Егер бұл жағдайда, түрлендіргіштің $e(t)$ ЭҚК-нің

лездік мәндерін интегралдасақ және дифференциалдасақ, онда кернеудің алынған мәндері сызықтық және бұрыштық орын ауыстыруға немесе үдеуге пропорционалды болады. Индукциялық түрлендіргіштер бұрыштық жылдамдықты өлшеуге арналған (*тахометрлерде*) құралдарда кең қолданысқа ие болды. Мұндай түрлендіргіштер 100 Вт-қа дейінгі қуатқа ие, тұрақты магниттерден тәуелсіз қоздырылуы орын алатын, тұрақты ток генераторынан тұрады. Генератордың ЭҚК-і зәкірдің бұрыштық жылдамдықтарына және ортақ білікпен механикалық байланыстырылған басқарылатын нысанның айналмалы бөлігіне пропорционалды.

Пьезоэлектрлік түрлендіргіштер тұзу пьезоэлектрлік әсерді – кейбір кристаллдардың (кварц, сегнетоэлектрлік тұз және т.б.) беткі қабатында механикалық кернеулер әсерінен электрлік зарядтардың түзілуі әсерін қолдануға негізделген. Кварц, сонымен қатар барий титанатынан жасалынған поляризацияланған керамика негізіндегі түрлендіргіштер ең көп таралымға ие болды.

Пьезоэлектрлік түрлендіргіштер жылдам өзгеретін электрлік емес шамалардың (діріл, айнымалы қысым және т.б.) мәндерін өлшеу үшін пайдаланады.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Қандай өлшеу әдістері мен түрлері бар?
2. Абсолюттік, салыстырмалы және келтірілген қателіктерге анықтама беріңіз.
3. Құрылғының дәлдік класы нені білдіреді?
4. Қосымша кедергілер мен шунттар қандай мақсатта қолданылады?
5. Көпірлік өлшеу әдісінің негізгі қолдану саласы қандай?
6. Өтемдеуші өлшеу әдісінің негізгі қолдану саласы қандай?

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. 0,1 дәлдік класына ие амперметрдің өлшейтін тогының номиналды мәні $I_{ном}=5A$ болғандағы ΔI абсолюттік қателігі неге тең?
Жауабы: 5 мА.
2. Абсолюттік қателігі $\Delta U = \pm 10 мВ$ аспайтын 15 В тұрақты кернеуді өлшеу қажет. Магнитті электрлік вольтметрдің өлшейтін кернеуінің номиналды мәні $U_{ном}=20V$ болғандағы, қажетті дәлдік класын таңдаңыз.
Жауабы: 0,05-тен төмен емес.

6.1.

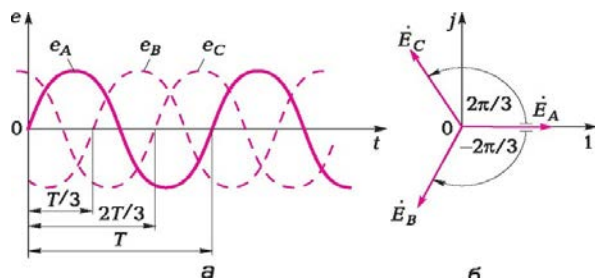
ЖАЛПЫ МАҒЛҰМАТТАР

Үш фазалық электр тізбектерін алғашқы рет өндірістік қолданылуы XIX ғ-дың соңына жатады. Оның жасап шығарылуына дарынды орыс инженері М.О. Доливо-Добровольский (1862—1919) үлкен үлес қосты.

Өндірістік жиіліктегі синусоидалық токтың үш фазалық тізбектері электр энергиясын алу (120 МВт-қа дейінгі қуаты бар үш фазалық электрмеханикалық генераторлармен), алыс арақашықтыққа жіберу (750 кВ-қа дейінгі кернеуге ие үш фазалық жоғары вольтты жіберу желілерімен), үлестіру (трансформаторлармен) және тұтынудың (үш фазалық асинхронды және синхронды қозғалтқыштармен) кешенді мәселелерін тиімді шешуге мүмкіндік береді.

Үш фазалық генераторлардың, қозғалтқыштардың, және трансформаторлардың құрылысындағы ерекшеліктері мен жұмыс сипаттамалары ары қарай қарастырылатын болады. Мұнда тек синусоидалық токты электр энергиясының үш фазалық көзінің әрекет ету принциптерін түсіндіретін боламыз. Егер синусоидалық токты электр энергиясының, жазықтықтары бір-біріне қатысты $2\pi/3$ бұрышына бұрылған, бір фазалық көзінің құрылысындағы (4.1-суретті қараңыз) бір орамды үш окшауланған орамдармен алмастыратын болсақ, онда үш фазалық көзінің әрекет ету принциптеріне (4.3-бөлімшені қараңыз) ұқсас болады. Үш фазалық көздің бұл орамдары, басқаша айтқанда фазалары латын алфавитінің *A*, *B*, *C* бас әріптерімен белгіленеді.

Орамдарда индукцияланатын синусоидалық фазалық ЭҚК-і фазасы бойынша $2\pi/3$ бұрышына ығыстырылған тең амплитудаларға ие болады. Олар аттас индекстермен белгіленіп, мына формулалар арқылы есептеп шығарылады:



6.1-сурет

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 4\pi/3) = E_m \sin(\omega t + 2\pi/3). \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Бұл жерде нөлдік бастапқы фаза ретінде А фазасының ЭҚК таңдап алынған.

6.1, а суретінде фазалық ЭҚК-нің лездік мәндерінің графиктері, ал 6.1, б суретінде – оларға сәйкес келетін кешенді мәндердің үш векторы көрсетілген:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_A &= E e^{j0} = E \angle 0 = E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \\ \dot{E}_B &= E e^{-j2\pi/3} = E \angle (-2\pi/3) = E \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = E a^2 \\ \dot{E}_C &= E e^{j2\pi/3} = E \angle 2\pi/3 = E \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = E a \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

мұндағы $a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ кешенді шамасы *фазалық көбейткіш* деп аталады.

Уақыттың кез-келген мезетіндегі фазалық ЭҚК-нің лездік мәндерінің қосындысы мен фазалық ЭҚК-нің кешенді мәндерінің қосындысы нөлге тең:

$$e_A + e_B + e_C = 0 \quad (6.3)$$

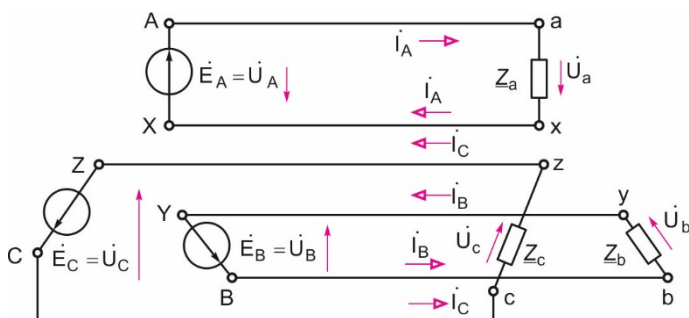
$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$$

Үш фазалық тізбек құрамында фазаларды жалғаудың (энергия көздері мен қабылдағыштарды) екі әдісі мүмкін: жұлдыз түрінде және үшбұрыштап.

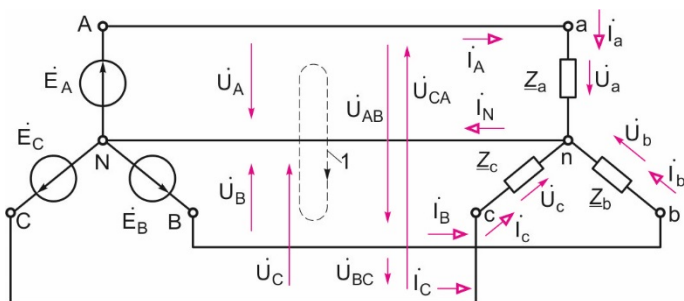
6.2-суретте энергия көзінің үш фазасын қабылдағыштың үш фазасына бөлек жалғаудың схемасы келтірілген. Фазалық ЭҚК-нің оң бағыттары көздің фазалық орамаларының «басын» (A, B, C) және «ұшын» (X, Y, Z) анықтайды. Аттас кіші әріптермен қабылдағыш фазасының шықпалары белгіленеді.

Энергия көзі мен қабылдағыш фазаларын жұлдыз түрінде (шартты белгісі $\star$) жалғау 6.3-суретте келтірілген, ондағы энергия көзінің X, Y, Z шықпалары және қабылдағыштың x, y, z шықпалары сәйкесінше N түйініне және n түйініне біріктірілген. Бұл түйіндер көздің және қабылдағыштың *бейтарап нүктелері*, ал оларды байланыстырушы сым – *бейтарап сым* деп аталады. Көз бен қабылдағыштың аттас шықпаларын жалғайтын, қалған үш сымдар сызықтық деп аталады.

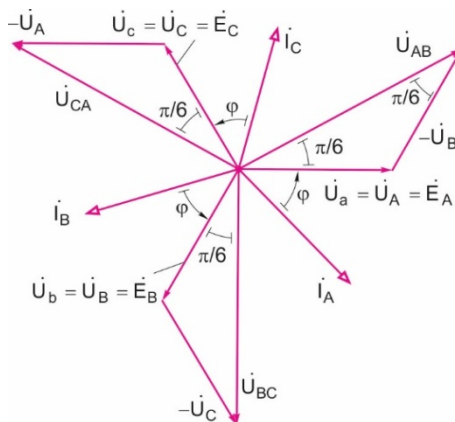
Үш фазалық тізбектерді есептеу кезінде фазалық және сызықтық токтар мен кернеулер түсінігін қолданады.



6.2-сурет



6.3-сурет



6.4-сурет

Фазалық токтар мен кернеулер деп көз бен қабылдағыш фазаларындағы токтарды және фазалар шықпасының арасындағы кернеу айтамыз.

Сызықтық токтар мен кернеулер деп сызықтық сымдардағы токтар және олардың арасындағы кернеуді айтамыз.

Көз фазалық шамаларын және сызықтық шамаларды белгілеу үшін латын алфавитінің A, B, C бас әріптерін, ал қабылдағыштың фазалық шамаларын белгілеу үшін – кіші a, b, c әріптерді қолданатын боламыз.

Көз бен қабылдағыш фазаларын жұлдыз түрінде жалғау кезінде көз бен қабылдағыштың аттас фазалық токтары мен оларға сәйкес келетін сызықтық ток өзара тең болады. Барлық сымдардың кедергілерін елеместен, Ом заңы бойынша фазалық токтарды

$$\dot{I}_A = \dot{I}_a = \dot{E}_A / \underline{Z}_a; \dot{I}_B = \dot{I}_b = \dot{E}_B / \underline{Z}_b; \dot{I}_C = \dot{I}_c = \dot{E}_C / \underline{Z}_c; \quad (6.4)$$

және бейтарап сымдағы токты табамыз:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \quad (6.5)$$

Барлық үш фазаларының кедергілері бірдей болатын қабылдағыш

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\Phi = Z_\Phi e^{j\varphi}$$

симметриялық деп, ал фазалық кедергілері әртүрлі – симметриялы емес деп аталады. Симметриялық қабылдағыш кезінде барлық фазалар тогы бірдей I_Φ әсерлік мәніне және сәйкес фазалық ЭҚК-не қатысты бірдей φ фазалық ығысуына ие (6.4-сурет), бейтарап сымдағы ток (6.5) нөлге тең. Сондықтан да симметриялық қабылда-

ғыш жағдайында, яғни симметриялық жүктемеде, бейтарап сым қажет емес, ал барлық сызықтық және фазалық токтардың әсерлік мәндері бірдей:

$$I_A = I_\Phi \quad (6.6)$$

Барлық сымдардың кедергісін елеместен, 6.3-суреттегі схемадағы 1-контур және басқа екі баламалы контурлар үшін Кирхгофтың екінші заңы бойынша теңдеу құрып және

$$\dot{E}_A = \dot{U}_A = \dot{U}_a; \dot{E}_B = \dot{U}_B = \dot{U}_b; \dot{E}_C = \dot{U}_C = \dot{U}_c \quad (6.7)$$

ескере отырып,

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{E}_A - \dot{E}_B = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{U}_A \angle \pi/6; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{E}_B - \dot{E}_C = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_A \angle (-\pi/2); \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{E}_C - \dot{E}_A = \dot{U}_C - \dot{U}_A = \dot{U}_A \angle 5\pi/6; \end{aligned} \right\} \quad (6.8)$$

сызықтық кернеулердің кешенді мәндерін аламыз, мұндағы U_A — сызықтық кернеудің әсерлік мәндері; $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$ — A, B, C көз фазасының шықпалары мен N бейтарап нүкте арасындағы кернеу.

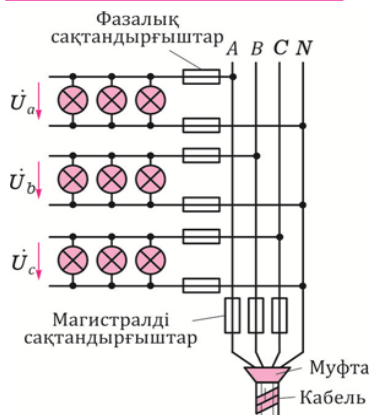
Фазалық кернеулерді бір индексмен белгілеуге қабылданған жүйесі дұрыс еместігін айта кетейік, себебі екі индексмен кернеуді белгілеу ережесіне сәйкес келмейді (2.3-бөлімшені қараңыз).

Көз бен қабылдағыш фазаларын жұлдыз түрінде жалғау кезіндегі фазалық және сызықтық кернеулердің векторлық диаграммасы 6.4-суретте берілген. $\dot{U}_{AB}$ сызықтық кернеу векторы (6.8)-ші жүйенің бірінші теңдеуі бойынша, $\dot{U}_A$ және $\dot{U}_B$ векторларын қосу арқылы тұрғызылған. Сызықтық кернеулердің қалған екі векторлары да осыған ұқсас тұрғызылған.

Кернеулер үшбұрышынан, сызықтық және фазалық кернеулердің әсерлік мәндерінің арасында бейтарап сым бар болған кезде, симметриялық та, симметриялық емес те жүктеме кезінде

$$U_A = 2U_\Phi \cos \pi/6 = \sqrt{3}U_\Phi \quad (6.9)$$

қатынасы дұрыс болмақ.



6.5-сурет

мысалы:

сызықтық кернеу $U_A, B, \dots$ 660 380 220
 фазалық кернеу $U_\phi, B, \dots$ 380 220 127

Егер симметриялық қабылдағышты, мысалы үш фазалық қозғалтқышты бейтарап сымы жоқ үш фазалық көзге қосатын болса, симметриялы емес жүктемесі бар қабылдағышты қосу кезінде, мысалы жұмыс істеу уақыты белгісіз жарықтандырғыш құралдарын өосу кезінде бейтарап сымы қажет (6.5-сурет).

Бұл ретте әрбір жарықтандырғыш құралының жұмыс істеу тәртібі олардың фазадағы сандарына тәуелсіз, ал бір магистралді сақтандырғышты өшіріп тастау тек бір фазаның жарықтандырғыш құралдарының өшірілуіне әкеледі.

6.3.

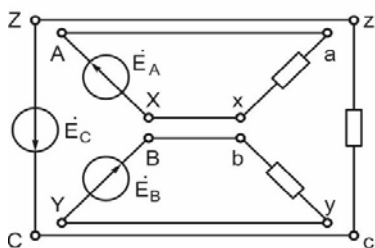
ЭНЕРГИЯ КӨЗІ МЕН ҚАБЫЛДАҒЫШ ФАЗАЛАРЫН ҮШБҰРЫШТАП ЖАЛҒАУ

6.6, *a* суретінде энергия көзінің үш фазасын қабылдағыштың үш фазасына бөлек қосу схемалары, 6.6, *б* суретінде – көз бен қабылдағыш фазаларын үшбұрыштап жалғау схемасы (шартты белгісі Δ) келтірілген.

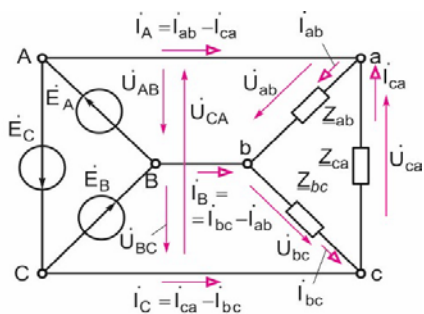
Барлық сымдардағы кедергілерді елеместен, көз бен қабылдағыштың фазалық кернеулері және оларға сәйкес келетін сызықтық кернеулер

$$\dot{E}_A = \dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab}; \dot{E}_B = \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}; \dot{E}_C = \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca} \quad (6.10)$$

тең болады, қабылдағыштың фазаларының кедергілеріне тәуелді емес. Соңғысы барлық сызықтық және фазалық кернеулердің әсер-

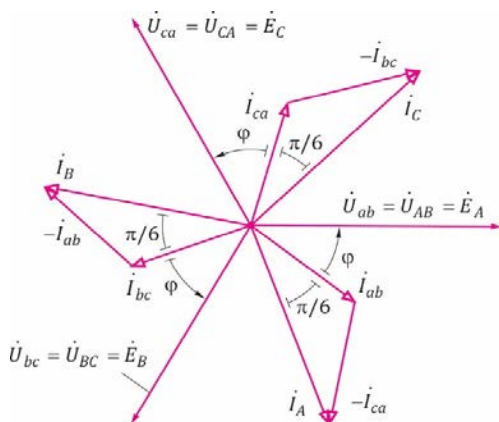


a



б

6.6-супер



6.7-сурет

лік мәндері бірдей екендігін білдіреді:

$$U_A = U_\Phi \quad (6.11)$$

Қабылдағыштың фазалық токтарын және оларға сәйкес келетін көздегі фазалық токтар:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} \quad (6.12)$$

формулаларымен анықталады.

a , b , c түйіндері үшін Кирхгофтың бірінші заңы бойынша сызықтық токтар

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} \quad (6.13)$$

тең болады. Симметриялық қабылдағыш кезінде

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_\Phi = Z_\Phi e^{j\varphi} \quad (6.14)$$

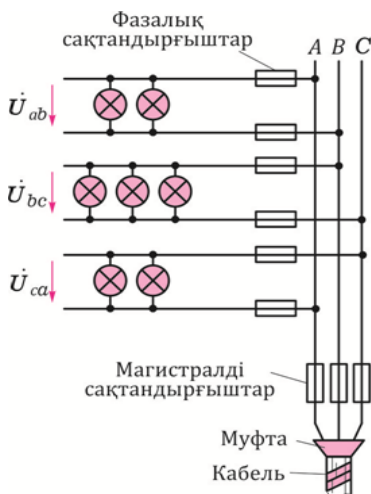
барлық I_Φ фазалық токтар бірдей әсерлік мәнге және сәйкес фазалық ЭҚК-і мен кернеулерге қатысты φ фазалық ығысуға ие.

Симметриялық қабылдағыш кезіндегі кернеулер мен токтардың векторлық диаграммасы 6.7-суретте көрсетілген. Токтар үшбұрышынан симметриялық жүктеме кезінде сызықтық және фазалық токтардың әрекеттегі мәндері үшін

$$I_A = 2I_\Phi \cos \pi / 6 = \sqrt{3}I_\Phi \quad (6.15)$$

қатынасы орындалады.

Энергия көзі мен қабылдағыш фазаларын, бейтарап сымсыз жұлдыз түрінде жалғауға қарағанда үшбұрыштап жалғаудың артық-



6.8-сурет

шылығы фазалық токтардың бір-біріне қатысты тәуелсіздігі болып табылады.

Егер 6.8-суретте көрсетілгендей етіп жарықтандыру құралдары қосылған болса, онда әрқайсысының жұмыс істеу тәртібі олардың фазадағы санына байланысты болмайды, ал магистралді сақтандырғыш арқылы бір сызықтық сымды өшірген кезде басқа екі сызықтық сымдар арасындағы кернеу мен сәйкес фаза қуаты өзгермейді. Екі басқа фазалардың қуаты азайғанмен, олар өшіп қалмайды.

Энергия көзі мен қабылдағыштың аттас фазаларын жұлдыз түрінде немесе үшбұрыштап жалғаудың қарастырылған талдау әдістерін, энергия көзінің фазасы мен қабылдағыш фазасы жалғанулары

әртүрлі болатын, үш фазалық тізбекке де қолдануға болады.

6.4.

ҮШ ФАЗАЛЫҚ СИММЕТРИЯЛЫҚ ҚАБЫЛДАҒЫШТЫҢ АКТИВТІ, РЕАКТИВТІ ЖӘНЕ ТОЛЫҚ ҚУАТТАРЫ

Симметриялық жүктеме кезінде үш фазалық тізбектегі қабылдағыштың барлық фазаларының қуаты бірдей, ал қабылдағыштың қуаты оның бір фазасының қуатының үшке көбейтілген мәніне тең.

$\underline{Z}_\phi = Z_\phi e^{j\varphi}$ кешенді кедергісіне ие синусоидалық токты тізбектің бөлігі ретінде қабылдағыштың бір фазасын қарастыра отырып, (4.41)-бойынша оның активті қуатын анықтайық:

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = 3 \frac{U_\phi^2}{Z_\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} U_A I_A \cos \varphi \quad (6.16)$$

бұл жерде жұлдыз (6.6), (6.9) және үшбұрыш (6.11), (6.15) схемасындағы фазалық және сызықтық токтар мен кернеулер арасындағы қатынас ескерілген.

Қабылдағыштың реактивті қуаты (4.42) бойынша:

$$Q = 3Q_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi = 3 \frac{U_{\phi}^2}{Z_{\phi}} \sin \varphi = \sqrt{3}U_A I_A \sin \varphi \quad (6.17)$$

қабылдағыштың толық қуаты (4.43) бойынша

$$S = 3S_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} = 3 \frac{U_{\phi}^2}{Z_{\phi}} \varphi = \sqrt{3}U_A I_A \quad (6.18)$$

ұқсас анықталады.

6.5. ҮШ ФАЗАЛЫҚ СИММЕТРИЯЛЫҚ ҚАБЫЛДАҒЫШТЫҢ ФАЗАЛАРЫН ҮШБҰРЫШ ЖӘНЕ ЖҰЛДЫЗ ТҮРІНДЕ ЖАЛҒАУ КЕЗІНДЕГІ ЖҰМЫС ШАРТТАРЫН САЛЫСТЫРУ

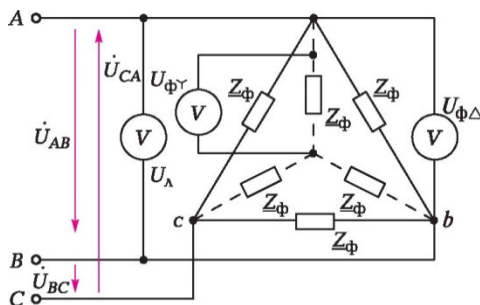
Симметриялық қабылдағыштың активті қуатының өрнегі, $Z_{\phi} = Z_{\phi} e^{j\varphi}$ кешенді кедергісімен жұлдыз немесе үшбұрыш түрінде (6.16), олардың фазаларының жалғану әдістеріне тәуелсіз

$$P = 3 \frac{U_{\phi}^2}{Z_{\phi}} \cos \varphi \quad (6.19)$$

түріне ие болады.

Фазаларды үшбұрыш түрінде жалғау кезінде (6.9-сурет) фазалық кернеу сызықтыға (6.11) тең:

$$U_{\phi\Delta} = U_{\Delta}$$



6.9-сурет

ал осы қабылдағыштың фазаларын жұлдыз түрінде жалғау кезінде (6.9-суретте штрих сызықпен көрсетілген) фазалық кернеу (6.9)-ды ескере отырып анықталады

$$U_{\Phi\perp} = U_{\Lambda} / \sqrt{3}.$$

Фазалық кернеулерге арналған өрнекті (6.20)-ға қойып, өзгермейтін сызықтық кернеуіндегі ($U = \text{const}$), симметриялық қабылдағыштың фазаларын үшбұрыш схемасынан жұлдыз схемасына ауыстыру кезінде оның активті қуаттарының қатынасын аламыз.

$$P_{\Lambda} = P_{\Phi\perp} \quad (6.20)$$

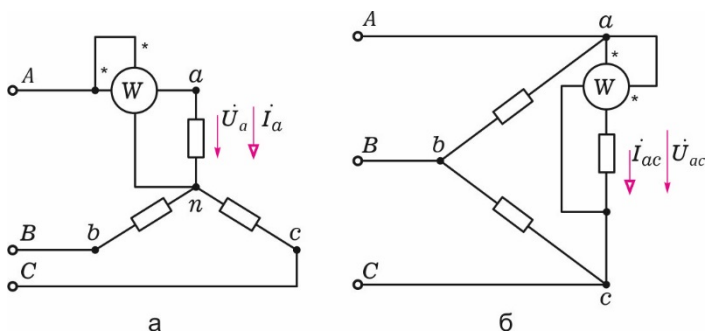
Қабылдағыштың реактивті (6.17) және толық (6.18) қуаттары да үш есе азаяды.

Қабылдағыш фазаларын ауыстыру, мысалы үш фазалық асинхронды қозғалтқыштардың іске қосу токтарын азайту, үш фазалық электр пешінің қыздыру температурасын өзгерту және т.б. үшін қолданылады.

6.6.

ҮШ ФАЗАЛЫҚ ЭЛЕКТР ТІЗБЕКТЕРІНДЕГІ АКТИВТІ ҚУАТ ПЕН ЭНЕРГИЯНЫ ӨЛШЕУ ӘДІСТЕРІ

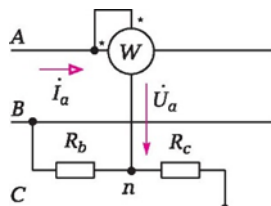
Үш фазалық электр тізбектерінде активті қуатты, олардың жұмыс істеу тәртібіне (симметриялық немесе симметриялық емес) және көзі мен қабылдағыштың фазаларын жалғау схемасына (бейтарап сыммен немесе бейтарап сымсыз) байланысты бір, екі немесе үш аспап әдістерімен өлшеу жүргізеді. Бұл аспаптарға, мысалы электр-



6.10-сурет

динамикалық жүйенің ваттметрлері (5.5-бөлімшені қараңыз) жатады.

Егер симметриялық қабылдағыштың фазалары ваттметр қосылуына жетімді болса, онда оның активті қуатын (6.19) өлшеу үшін, бір фазаның активті қуатын өлшеуге арналған (6.10-сурет, *a* және *б*) бір аспап әдісі қолданылады.

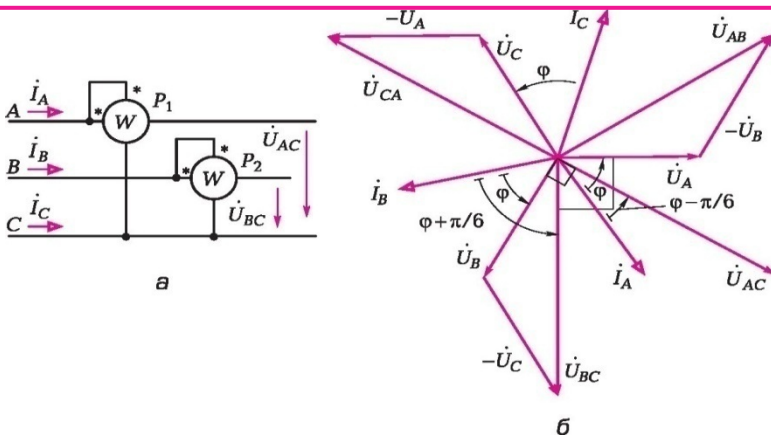


6.11-сурет

Егер симметриялық қабылдағыштың фазалары жетімсіз болса, онда оның активті қуатын бір ваттметрмен өлшеу үшін *жасанды бейтарап нүктесі* қолданылады. Бұл, бір фазасын R_V кедергісіне ие ваттметр кернеуі тізбегі құрайтын, басқа екеуі - $R_b = R_c = R_V$ кедергілі резисторлар болып табылатын, фазалары жұлдыз түрінде жалғанған симметриялық қабылдағыштың *n* бейтарап нүктесі (6.11-сурет).

Ваттметр кернеуі тізбегінің $\dot{U}_a$ кернеуі мен тогы тізбегінің $\dot{I}_a$ тогы жұлдыз схемасы бойынша симметриялық қабылдағыштың аттас фазасының немесе үшбұрыш схемасы бойынша симметриялық қабылдағыш тізбегінің баламалы жұлдызының (2.10-бөлімшені қараңыз) аттас фазасының кернеуі мен тогына тең. Екі жағдайда да ваттметр үш бірдей фазалардың біреуінің активті қуатын өлшейтін болады.

Симметриялық емес қабылдағыштың активті қуатын өлшеу үшін *екі аспап әдісі* (6.12-сурет, *a*) қолданылады. Бұл ретте қабылдағыштың активті қуаты, бірі теріс болуы мүмкін екі ваттметрдің көрсеткіштерінің алгебралық қосындысына тең.



6.12-сурет

Осы әдістің дұрыстығын дәлелдейік.

Қабылдағыш фазаларын жұлдыз түрінде жалғау кезінде оның лездік қуаты көздегі лездік қуатқа тең

$$P = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C.$$

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша бейтарап сымсыз үш фазалық тізбекте

$$i_C = -(i_A + i_B).$$

Токтың i_C мәнін лездік қуат өрнегіне қою арқылы,

$$P = (u_A - u_C) i_A + (u_B - u_C) i_B = u_{AC} i_A + u_{BC} i_B$$

аламыз.

Екі көбейтіндінің орташа мәндерінің қосындысын, яғни қабылдағыштың активті қуатын, екі ваттметр көмегімен өлшеуге болады

$$P = P_1 + P_2 = U_{AC} I_A \cos(\psi_u - \psi_i) + U_{BC} I_B \cos(\psi_u - \psi_i) \quad (6.21)$$

мұндағы $\psi_u - \psi_i$ — сәйкесінше сызықтық кернеу мен ток арасындағы фазалар ығысу бұрышы.

Қабылдағыштың өлшенетін қуаттарының екі ваттметр көрсеткіштері арасында үлестірілуі сызықтық кернеулер мен токтар арасындағы фазалар ығысуының бұрыштарына тәуелді (6.21). Симметриялық қабылдағыш үшін осы тәуелділікті қарап шығайық. 6.12, б суретте, фазалары жұлдыз түрінде жалғанған симметриялық қабылдағыштың кернеулері мен токтарының векторлық диаграммасы тұрғызылған. Сәйкес фазалық кернеу мен ток арасындағы фазалар ығысуының бұрыштары бірдей және қабылдағыш фазасының кешенді кедергісінің φ аргументіне тең. Симметриялық қабылдағыш кезінде $\dot{U}_{AC}$ және $\dot{I}_A$, $\dot{U}_{BC}$ пен $\dot{I}_B$ векторлары арасындағы фазалар ығысуының бұрышы сәйкесінше $\varphi - \pi/6$ мен $\varphi + \pi/6$ тең екендігі диаграммадан шығады.

Екі ваттметрдің көрсеткіштерінің қосындысы (6.21) бойынша симметриялық қабылдағыштың активті қуатына (6.16) тең

$$\begin{aligned} P &= P_1 + P_2 = U_A I_A \cos(\varphi - \pi/6) + U_A I_A \cos(\varphi + \pi/6) = \\ &= \sqrt{3} U_A I_A \cos \varphi \end{aligned} \quad (6.22)$$

мұндағы $U_A = U_{BC} = U_{AC}$ және $I_A = I_A = I_B$ — сызықтық кернеу мен ток.

(6.22)-ші формуладан, симметриялық қабылдағыш кезінде ваттметрлердің P_1 және P_2 көрсеткіштері тек $\varphi = 0$ кезінде ғана тең болатындығы шығады. $\varphi > \pi/3$ кезінде екінші ваттметрдің P_2 көрсеткіштері теріс болады.

Қабылдағыш фазаларының үшбұрыш түрінд жалғануы кезінде активті қуатты екі ваттметр әдісімен өлшеу мүмкіндігін дәлелдемей-ақ қоюға болады, себебі оның тізбегін баламалы жұлдыз ретінде көрсетуге болады (2.10-бөлімшені қараңыз).

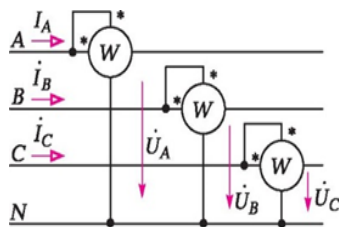
Үш аспап әдісі (6.13-сурет) бейтарап сымы бар симметриялық емес қабылдағыштың активті қуатын өлшеу үшін қолданылады. Бұл ретте әрбір ваттметр қабылдағыштың бір фазасының активті қуатын өлшейді. Қабылдағыштың активті қуаты үш ваттметр көрсеткіштерінің қосындысына тең:

$$P = P_1 + P_2 + P_3.$$

Екі және үш аспап әдісі қабылдағыштың активті қуатын өлшеу кезінде тек сызықтық токтардың симметриялы еместігінде ғана емес, сызықтық кернеулердің симметриялы еместігінде де орындалады.

Үш фазалық тізбектің жұмысын басқаруға арналған *ваттметрлер* ортақ остерінде екі немесе үш өлшеу механизмдеріне ие, олар ортақ көрсеткішке әсер етеді және үш фазалық тізбекке екі немесе үш аспаппен өлшеу әдістеріне сәйкес жалғанады.

Үш фазалық тізбектердегі активті энергияны тіркеуге арналған *есептегіштер*, есептегіштің ортақ осыіне және сол арқылы санақ құрылғысына әсер ететін, екі немесе үш индукциялық механизмге ие (5.7-бөлімшені қараңыз). Осы есептегіштерді қосу схемасы, екі немесе үш аспап әдісімен активті қуатты өлшеуге арналған ваттметрді жалғау схемасына сәйкес келеді.



6.13-сурет

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Үш фазалық электр энергиясы көзінің фазалық орамдарында индукцияланатын ЭҚК-нің өзгешелігі неде?
2. Үш фазалық тізбектегі қандай токтар мен кернеулер фазалық деп, қандайы – сызықтық деп аталады?
3. Үш фазалық тізбектің қандай жағдайларында бейтарап сымы қолданылады және оның міндеті неде?
4. Қандай жағдайларда электр энергиясының үш фазалық қабылдағышының қуатын өлшеу үшін бір құрылғы, екі құрылғы, үш аспап әдісі қолданылады?

5. Электр энергиясының қандай үш фазалық қабылдағышы симметриялық және қандайы – симметриялық емес. Мысал келтіріңіз?

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. Үш фазалық тізбектің сызықтық кернеуінің әсерлік мәні $U_{\Pi} = 10\sqrt{3} = 17,3\text{В}$. Симметриялық қабылдағыш фазаларын жұлдыз түрінде жалғаған кезде, оның U_{ϕ} фазалық кернеуінің әсерлік мәні неге тең?
Жауабы: 10 В.
2. 1-ші есептің шарттарын сақтай отырып, егер әрбір фазаның тізбегі тізбектей жалғанған $R = X_L = 10$ Ом резистивті және индуктивті кедергілерден тұрса, фазалық токтың әсерлік мәнін анықтаңыз.
Жауабы: $\sqrt{2} = 0,7\text{А}$
3. 1-ші және 2-ші есептер шарттарын сақтай отырып, қабылдағыштың активті, реактивті және толық қуатын анықтаңыз.
Жауабы: 15 Вт; 15 вар; $21,2 \text{ В} \cdot \text{А}$.
4. 3-ші және 4-ші есептердің шарттарын сақтай отырып, егер қабылдағыштың фазалары «жұлдыз» схемасынан «үшбұрыш» схемасына ауыстырылған болса, фазалық токтың әсерлік мәнін, қабылдағыштың активті, реактивті және толық қуатын анықтаңыз.
Жауабы: $\sqrt{3/2} = 1,2\text{А}$; 45 Вт; 45 вар; $63,6 \text{ В} \cdot \text{А}$

ТРАНСФОРМАТОРЛАР

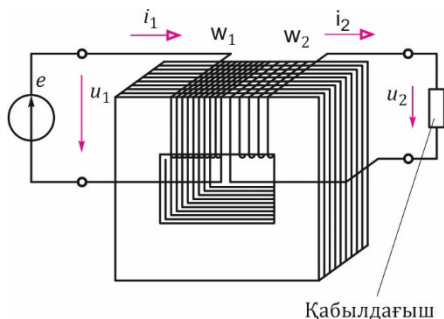
7.1. ЖАЛПЫ МАҒЛҰМАТТАР

Статикалық, яғни жылжымалы бөлшектері жоқ, кернеу мен ток айнымалыларының параметрлерінің бір мәндерін сол жиіліктегі басқа мәндерге түрлендіруге арналған, электрмагниттік құрылғыны *трансформатор* деп атайды. Трансформатор ортақ магниттік ағынға ие екіден кем емес электрлік окшауландырылған (автотрансформаторын есептемегенде) орамдардан тұрады.

Көптеген трансформаторлардағы индуктивті байланысын күшейту және құйынды токтардың әсерін азайту үшін орамдары, электротехникалық болаттан жасалынған табактардан тұратын, магниттік өткізгіште орналастырылады (7.1-сурет).

Энергия көзіне (қабылдағышына) жалғанған трансформатор орамы *бірінші реттік* (*екінші реттік*) деп аталады. Сәйкесінше бірінші ретті (екінші реттік) орамға жататын барлық шамалар да, *бірінші реттік* (*екінші реттік*) деп аталады және олардың әріптік белгілерінде 1 (2) индекстері болады.

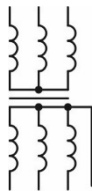
Егер трансформатордың бірінші ретті U_1 кернеуі екінші ретті U_2 кернеуінен аз (үлкен) болса, онда трансформатор *арттырушы* (*азай-*



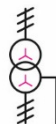
7.1-сурет



7.2-сурет



7.3-сурет



тушы) деп аталады. Кернеу мәндері бойынша жоғары кернеу (ЖК) орамдары және төменгі кернеу (ТК) орамдары деп ажыратады.

Бір фазалық (бір фазалық токтар тізбегі үшін) және үш фазалық (үш фазалық тізбектер үшін) трансформаторлар деп бөледі. Үш фазалық трансформаторда бірінші және екінші реттік орамдар деп сәйкесінше бір кернеудің үш фазалық орамдарының жиынтығын атайды. 7.2-суретте бірфазалының, 7.3-суретте – үш фазалық трансформаторлардың белгілері көрсетілен

Трансформатор қалқанында толық қуаттың, жоғары және төменгі кернеудің, токтардың, жиіліктердің номиналды мәндері*, және де фазалар саны мен олардың жалғану схемалары көрсетілген. Үлкен қуатқа ие трансформаторлар үшін жұмыс істеу тәртібінің қосымша сипаттамалары (ұзақ немес қысқа мерзімді), суыту әдістері және басқалары көрсетілуі мүмкін.

1000 В • А дейінгі қуатқа ие трансформаторлар тізбектің электрлік оқшауланған бөліктерін қоректендіру үшін өндірістік электроникада қолданылады. 10 кВ • А артық қуатқа ие трансформаторларды күштік деп атайды. Оларды электроэнергетикада сызықтық кернеуі 6,3 — 38,5 кВ болатын үш фазалық генераторлардан 750 кВ дейінгі сызықтық кернеуге ие тарату желілері арқылы электр энергиясын үнемді жіберу және 11 кВ-тан бастап одан төмен сызықтық кернеулерге ие қабылдағыштар арасында үлестіру үшін қолданады. Тарату желісінің кернеуі жоғары болған сайын, сондай толық қуаттағы $S = UI$ олардың сымдарындағы ток та соншалықты аз болады, сондықтан да энергия шығыны да аз болады.

Бір фазалық трансформатордың жұмыс процесі, үш фазалық трансформатордың бір фазасының жұмыс процесі секілді. Сондық-

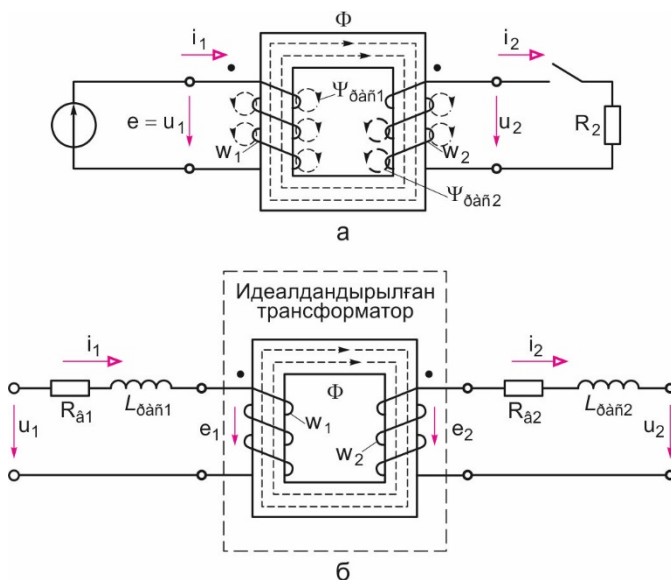
* Номиналды деп, электротехникалық құрылғы (трансформатор, қозғалтқыш, генератор және т.б.) экономикалық тиімді ПӘК ие жол берілмейтін салдарларсыз (қатты қызу, оқшаулаудағы тесік және т.б.) белгісіз уақыт бойы жұмыс жасай алатын электрлік шамалардың мәндері.

тан да, ең алдымен бір фазалық екіорамды трансформатордың жұмысын қарастырамыз, содан кейін үш фазалық трансформаторлардың ерекшеліктерін атап өтеміз.

7.2. БІР ФАЗАЛЫҚ ТРАНСФОРМАТОРДЫҢ ЖҰМЫС ІСТЕУ ПРИНЦИПІ

7.4, а суретінде бір фазалық трансформатордың қосылуының схемасы келтірілген. w_2 орамдар санына ие екінші ретті орама жағынан, яғни R_2 жүктеме кедергісіне ие қабылдағыш үшін трансформатор энергия көзі, ал w_1 орамдарға ие бірінші ретті орама жағынан – қоректендіру көзінен келетін энергияны қабылдағыш болып табылады.

Бір фазалық трансформатордың жұмыс істеу принципін қарастырайық. Трансформатордың екінші ретті орамасының тізбегі ажыратылған және $u_1 = e$ кернеу көзі әсері кезінде бірінші ретті орамадағы ток i_1 -ге тең деп болжайық. $i_1 w_1$ магниттік қозғаушы күші магнит өткізгішінде магниттік ағынды қоздырады, оның оң бағыты бұрғы ережесімен анықталады (3.23, а суретін қараңыз). Бұл



7.4-сурет

магнит ағыны бірінші ретті орамада e_{L1} өзіндік индукциясының ЭҚК-н (суретте көрсетілмеген) және екінші ретті орамада - e_{M2} өзара индукциясының ЭҚК-н (суретте көрсетілмеген) ндукциялайды

Екінші ретті ораман тізбегі тұйықталғаннан кейін e_{M2} өзара индукциясының ЭҚК-і әсерінен, R_2 жүктеме кедергісіне ие қабылдағышта i_2 тогы пайда болады.

7.4-суретте көрсетілген орауларының бағыттары үшін бірінші және екінші ретті орамалар мен $i_2 w_2$ -ге тең МҚК-дің i_1 және i_2 токтарының таңдап алынған оң бағыттары магнитөткізгішінде, $i_1 w_1$ -ге тең МҚК әсерінен магниттік ағынға қарсы бағытталған ағынды қоздырады.

Демек, қарастырылып отырылған трансформатордың бірінші және екінші ретті орамалар қарама-қарсы қосылған, бұл орамалардың шықпаларының белгісімен белгіленеді (3.25, *в* суретін қараңыз). бірінші және екінші ретті орамалардың МҚК-нің $i_1 w_1$ - $i_2 w_2$ тең. Бұл МҚК-і магнит өткізгішінде Φ ортақ магниттік ағынын қоздырады. Сонымен қатар, трансформатордың жұмысын талдау кезінде, сәйкесінше i_1 және i_2 токтарына пропорционалды бірінші $\Psi_{\text{шап1}}$ және екінші $\Psi_{\text{шап2}}$ орамаларының шашырауының ағындық ілесуін ескеру керек.

7.4, *б* суретте бірінші R_{o1} мен екінші R_{o2} орамдарының активті кедергілеріне және олардың $L_{\text{шап1}} = \Psi_{\text{шап1}} / i_1$ және $L_{\text{шап2}} = \Psi_{\text{шап2}} / i_2$ шашырау индуктивтіліктеріне ие трансформатордың алмастыру схемасы көрсетілген.

Бірінші және екінші ретті орамалары активті кедергілерге және шашыраудың ағындық ілесуіне ие болмайтын трансформаторлар *идеалдандырылған трансформаторлар* деп аталады. 7.14, *б* суретте идеалдандырылған трансформатор штрих сызықпен айрықшаландырылған.

Оның бірінші орамасындағы e_1 ЭҚК-нің және i_1 тогының оң бағыттары, трансформатор екінші ретті орамасының ажыратылған тізбегінде айналатын катушкадағыдай (3.23, *а* суретін қараңыз) сәйкес келеді.

Трансформатордың бірінші $e_1 = -w_1 d\Phi / dt$ және екінші $e_2 = -w_2 d\Phi / dt$ орамдарындағы ЭҚК-і магниттік өткізгіште бір Φ магниттік ағынмен индукцияланатындықтан, осы ЭҚК-нің екі ораманың аттас шықпаларына қатысты оң бағыттары бірдей .

Егер бірінші ретті орама тізбегіндегі e_1 ЭҚК-і мен i_1 тогы бағыттары бойынша сәйкес келетін болса (ток, ағын және ЭҚК үшін оң жүрісті бұрғы ережесі (3.23-суретті қараңыз), онда екінші реттік:

орама тізбегіндегі i_2 токтың бағыты e_2 ЭҚК-нің бағытына қарама-қарсы алынған. Бұл ЭҚК-нің әртүрлі рөлдері туралы физикалық көрініске сәйкес келеді: бірінші жағдайда ЭҚК-і ток өзгерісіне бөгет жасайды, ал екінші де – токты қоздырады.

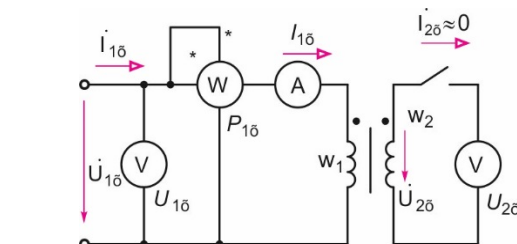
$S_{ном} = S_{1ном} = U_{1ном} I_{1ном}$ номиналды толық қуатына ие трансформаторлардың бірнеше жұмыс режимдерін ажыратады:

- *номиналды режимі*, яғни трансформатордың бірінші ретті орамасындағы кернеудің $U_1 = U_{1ном}$ және токтың $I_1 = I_{1ном}$ номиналды мәндеріндегі жұмыс режимі;
- *жұмыс режимі*, бұл ретте бірінші ретті ораманың кернеуі номиналды мәнге жуық немесе тең болады: $U_1 = U_{1ном}$, ал I_1 тогы өзінің $I_{1ном}$ номиналды мәнінен аз немесе оған тең және трансформатор жүктелуімен, яғни I_2 тогымен анықталады;
- *бос жүріс режимі*, яғни екінші ретті ораманың тізбегі ажыратылған ($I_2 = 0$) немесе өте үлкен жүктеме кедергісіне ие қабылдағышқа жалғанған (мысалы вольтметрге) трансформатордың жүктелмеген режимі;
- *трансформатордың қысқаша тұйықталу режимі*, бұл ретте оның екінші реттік орамасы тұйықталған ($U_2 = 0$) немесе өте аз жүктеме кедергісіне ие қабылдағышқа жалғанған (мысалы амперметрге).

Бос жүріс пен қысқаша тұйықталу режимдері трансформаторды тексеру кезінде арнайы тудырылады.

7.3. ТРАНСФОРМАТОРДЫҢ БОС ЖҮРІС РЕЖИМІ

Бос жүріс режимінде (7.25-сурет) трансформатор w_1 орам санына ие синусоидалық кернеу көзі орамасына қосылған магнит өткізгіш катушкаға айналады.

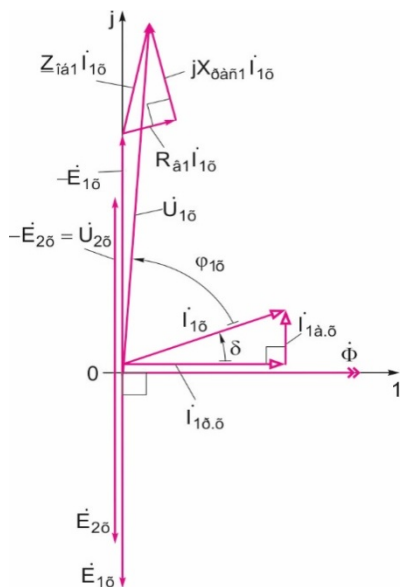


7.5-сурет

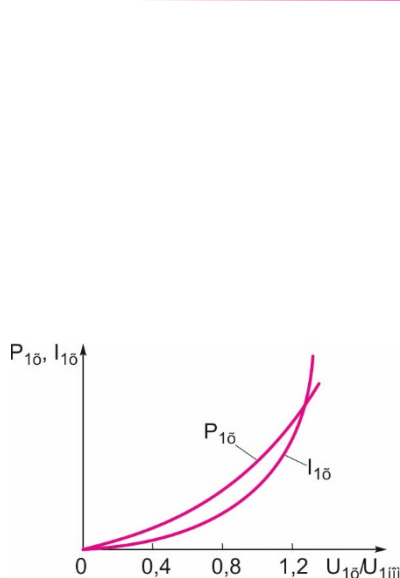
Бос жүріс тәжірибесі деп екіншілік орама тізбегінің ажыратылған кезіндегі және номиналды біріншілік кернеу $U_{1x} = U_{ном}$ кезіндегі трансформаторды сынауды айтады. Осы тәжірибе негізінде өлшеу құралдарының көрсеткіштері арқылы трансформация коэффициенті мен трансформатордың магнит өткізгішіндегі шығын қуатын анықтайды. Бос жүріс тәжірибесі трансформатордың зауыттық сынамасында міндетті болып табылады.

Номиналды біріншілік кернеуде $U_{1x} = U_{ном}$ бос жүріс тогы I_{1x} біріншілік номиналды токтың $I_{1ном}$ 2-8% құрайды (неғұрлым аз болса, соғұрлым трансформатордың номиналды толық қуаты көп болады), яғни $U_{1x} = E_{1x}$. Сонымен қатар, екіншілік орама тізбегінің ажыратылған сәтінде $U_{2x} = E_{2x}$. Сондықтан бос жүріс режиміндегі біріншілік U_{1x} және екіншілік U_{2x} кернеуді вольтметрмен өлшей отырып, трансформатордың жоғарылайтын немесе төмендейтін трансформация коэффициентін анықтайды:

$$\left. \begin{aligned} n_{21} &= \frac{w_2}{w_1} = \frac{E_{2x}}{E_{1x}} = \frac{U_{2x}}{U_{1x}} > 1 \\ n_{21} &= \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_{1x}}{E_{2x}} = \frac{U_{1x}}{U_{2x}} > 1 \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$



7.6-сурет



7.7-сурет

Трансформация коэффициенті трансформатор қалқанында оның бос жүрісіндегі жоғары кернеудің төмен кернеуге қатынасы түрінде көрсетіледі, мысалы «6000/230В».

Бос жүріс кезінде трансформаторларда шығын қуаты магнит өткізгіштегі шығын қуатында (құйынды токтарда және магнитті гистерезисте), біріншілік орама сымындағы шығын қуатында ($R_{\text{бл}} I_{1\text{x}}^2$), сондай-ақ қосымша шығын қуатында (жапырақтардың дірілінен шығындар олардың түйісу орындарында кезігеді, схемалық нұсқаларда ағындар шашырайды және т.б.) жинақталады. Бос жүрісте сымдағы ток $I_{1\text{x}} \ll I_{1\text{ном}}$ пен шығын қуат магнит өткізгіштегі шығын қуатымен салыстырмалы түрде өте аз (тек номиналды толық қуаты $1000\text{В} \cdot \text{А}$ аз болмайтын трансформаторлар ғана ерекшеленеді). Осы қосымша шығын қуатына да қатысты болып табылады. Сондықтан бос жүріс тәжірибесі трансформатордың магнит өткізгішіндегі шығын қуатын анықтау үшін қолданылады. Трансформаторда бос жүріс кезінде шығын қуаты аз және толық номиналды қуаттың 0,3-1,4 % құрайды (неғұрлым аз болса соғұрлым трансформатордың толық номиналды қуаты көп болады). Дегенмен магнит өткізгіште шығын қуаты маңызды тәжірибелік мағынаға ие, себебі күштік трансформаторлар біріншілік желіден сирек өшеді.

Бос жүріс тогы $I_{1\text{x}}$ реактивті $I_{1\text{р.х}}$ және активті $I_{1\text{а.х}}$ құраушылардан тұрады. Соңғысы магнит өткізгіш пен қосымша шығындармен анықталады. Көп жағдайда активті құраушы $I_{1\text{а.х}}$ реактивті құраушыдан $I_{1\text{р.х}}$ 10%-ға аз және бос жүріс тогы фаза бойынша біріншілік кернеуден дерлік төрттен бір периодқа қалып отырады, яғни $\varphi_{1\text{x}} \approx \pi / 2$ (7.6-сурет).

Шектеулі суыту мүмкіндіктерінде біріншілік кернеудің өзгеруінен кейін трансформатордың бос жүріс режимі қалай өзгертіндігін білу маңызды.

$P_{1\text{x}} = f(U_{1\text{x}})$ және $I_{1\text{x}} = (U_{1\text{x}})$ тәуелділіктері трансформатордың бос жүрісінің сипаттамасы деп аталады (7.7-сурет).

Алдымен біріншілік кернеуді $U_{1\text{x}}$ нөлдік мәннен көтеру кезінде магнит өткізгіш қанықпаған және ток $I_{1\text{x}}$ кернеуге пропорционалды түрде ұлғаяды; кейін магнит өткізгіштің қанығуына ықпал етеді, мысалы $U_{1\text{x}} > 0.8 U_{1\text{ном}}$, және бос жүріс тогы $I_{1\text{x}}$ тез артып кетеді.

Көптеген күштік трансформаторлар үшін біріншілік кернеуді рұқсат етілген жоғарғы шектік созылмалы жоғарылатуы (бос жүріс режимінде) $1,1 U_{1\text{ном}}$ тең болады.

Қысқа тұйықталу режимін ереже шарттарында және қысқа тұйықталу сынағы деп жіктейді. Біріншісі трансформатор қатты қызып кететін нәтижесінде бұзылуына алып келуі ықтимал трансформатордың апттық режимін сипаттайды.

Қысқа тұйықталу сынағы деп трансформатордың номиналды біріншілік ток кезінде $I_{1x} = I_{1x}$ және екіншілік орама тізбегінің қысқа тұйықталуы сәтіндегі сынақты айтады (7.8-сурет). Осы сынақ негізінде орама сымындағы шығын қуаты мен кернеудің ішкі құлау үшбұрышын анықтайды. Бос жүріс сынағы сынды қысқа тұйықталу сынағы да зауыттық сынауларда міндетті болып табылады.

Қысқа тұйықталу сынағында біріншілік ораманың кернеуі U_{1k} $I_{1k} = I_{1ном ток}$ кезінде номиналды мәnnің $U_{1ном}$ 5-10 % құрайды, ал ЭҚК мәні жұмыс режиміндегі мәнінің E_{2k} -2-5 % құрайды. ЭҚК мәніне пропорционалды түрде магнит өткізгіште магнит ағыны азаяды (7.11), ал сонымен бірге магниттеуші ток пен магнит өткізгіштегі шығын қуаты. Сондықтан қысқа тұйықталу сынағы біріншілік және екіншілік орама сымдарындағы шығын қуатын анықтау үшін пайдаланылады:

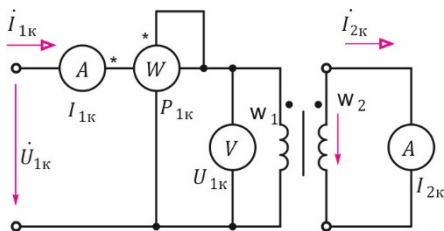
$$P_{1k} = R_{\sigma 1} I_{1k}^2 + R_{\sigma 2} I_{12}^2 \quad (7.2)$$

Қысқа тұйықталу сынағында тарнсформатордағы шығын қуаты оның номиналды толық қуатының 1-4% құрайды (неғұрлым аз болса, соғұрлым трансформатордың номиналды толық қуаты көп болады).

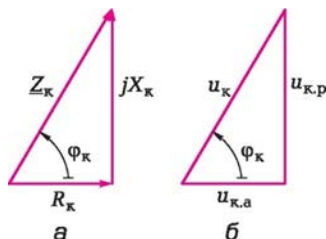
Қысқа тұйықталу сынағынан анықтайды:

■ трансформатордың қысқа тұйықталуының толық кедергісі

$$Z_K = U_{1R} / I_{1Kj} \quad (7.3)$$



7.8-сурет



7.9-сурет

- трансформатордың қысқа тұйықталуының активті кедергісі

$$R_K = P_{1K} / I_{1K}^2 \quad (7.4)$$

- трансформатордың қысқа тұйықталуының индуктивті кедергісі

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} \quad (7.5)$$

7.9 а және б суреттерінде кедергі үшбұрышы мен соған ұқсас қабырғалары номиналды кернеуді пайызбен көрсететін $U_{1ном}$, қысқа тұйықталу сынағындағы біріншілік $U_{1к}$ кернеулердің және активті және индуктивті құрамын көрсететін кернеудің ішкі құлау үшбұрышы тұрғызылған:

$$u_{K.a} = \frac{R_K I_{1ном}}{U_{1но}} 100\%$$

$$u_{K.p} = \frac{X_K I_{1ном}}{U_{1но}} 100\%$$

$$u_K = \frac{Z_K I_{1ном}}{U_{1но}} 100\%$$

(7.6)

Қысқа тұйықталу кернеуі u_K трансформатордың маңызды параметрі болып табылады және оның қалқанында көрсетіледі. Ол жүктелген трансформатордың екіншілік кернеуінің өзгеруін анықтайды.

Қысқа тұйықталу кернеуі номиналды біріншілік 5-10% құрайды және трансформатор орамасының номиналды кернеуі ұлғайған сайын арта түседі. Бұл сымдардың изоляциялау қалыңдығын ұлғайтқан кезде ағын тізбегі шашырауын түсіндіреді, және сйкесінше шашыраудың индуктивті кедергісін $X_{шаш1}$ және $X_{шаш2}$ түсіндіреді.

Қысқа тұйықталу сынағы сонымен қатар трансформатордың жоғарылайтын және төмендейтін трансформация коэффициентін анықтау үшін де соңғы сынақ болып табылады.

$$\left. \begin{aligned} n_{21} &= \frac{w_2}{w_1} = \frac{I_{2k}}{I_{1k}} > 1 \\ n_{21} &= \frac{w_1}{w_2} = \frac{I_{1k}}{I_{2k}} > 1 \end{aligned} \right\}$$

(7.7)

Жұмыс режимінде трансформатордың екіншілік орамасы 7.10, а суретінде көрсетілген схема бойынша $\underline{Z}_2 = Z_2 \angle \varphi_2$ жүктеме кедергісімен энергия қабылдағышқа қосылады, ол 7.10, б суретіндегі алмастыру схемасына сәйкес келеді, ондағы $R_{\text{в1}}$, $R_{\text{в2}}$ және $X_{\text{шаш1}}$, $X_{\text{шаш2}}$ — біріншілік және екіншілік орамалардың индуктивті және активті кедергілері болып табылады.

Трансформатор магнит өткізгішіндегі магнит ағыны жұмыс режимінде және бос жүріс режимінде (7.3-бөлімшені қараңыз) аз өзгереді. Сондықтан МҚК теңгерімінің теңдігі жұмыс режимінде келесі өрнекке сай сипатқа ие деп санауға болады:

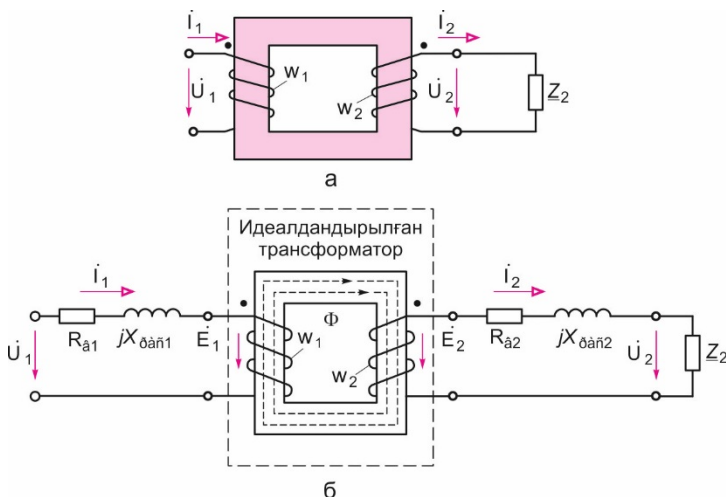
$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_{1x} w_1 \quad (7.8)$$

мұндағы, $\dot{I}_{1x} w_1$ - бос жүріс режиміндегі біріншілік орамадағы ток МҚК-і.

Теңдіктің екі бөлігін де (7.8) біріншілік ораманың w_1 орама санына бөлгенде, келесі өрнекті аламыз

$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_2 + \dot{I}_{1x} \quad (7.9)$$

мұндағы $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 w_2 / w_1$ екіншілік тізбектің біріншілік тізбекке жүргізілген тогы.



7.10-сурет

Трансформатордың орналасу схемасына Кирхгофтың екінші заңына келтірілген теңдеулер сай келеді:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 + R_{B1} \dot{I}_1 + jX_{pac1} \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + \underline{Z}_{o\delta 1} \dot{I}_1; \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 + R_{B2} \dot{I}_2 + jX_{pac2} \dot{I}_2 = -\dot{E}_2 + \underline{Z}_{o\delta 2} \dot{I}_2 \end{aligned} \right\}; \quad (7.10)$$

мұндағы, $\underline{Z}_{o\delta 1} = R_{B1}$ және $\underline{Z}_{o\delta 2} = R_{B2}$ — ораманың активті кедергісін мен олардың индуктивті таралуын ескеретін кешенді кедергілер болып табылады. Осы сәтте w_1 және w_2 орама санымен трансформатордың біріншілік және екіншілік орамасында индукцияланған, сонымен қатар магнит өткізгіштегі синусоидалы магнит ағынының $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ амплитудалық мәні мен әрекет ететін ЭҚК мәні (3.18) қатынасымен байланысты

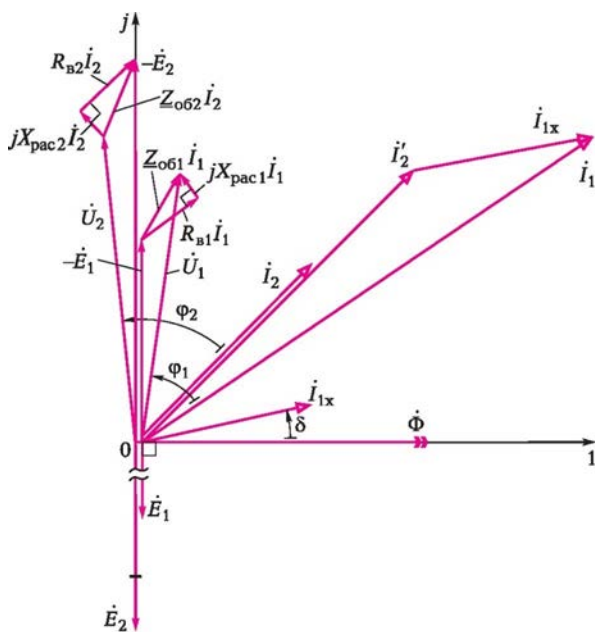
$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m; \\ E_2 &= \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m; \end{aligned} \right\} \quad (7.11)$$

7.11-суретте $\varphi_2 > 0$ кезінде, яғни индуктивті жүктеме кезінде (7.9) және (7.10) бойынша құрылған трансформатордың векторлық диаграммасы келтірілген.

Трансформатор теңдеуі мен оның векторлық диаграммасынан магнит өткізгіште $\dot{\Phi}$ магнит ағынымен индукцияланатын ЭҚК мәнімен біріншілік ораманың шықпасы мен екіншілік ораманың шықпасындағы кернеу мәнінің қатынасы сәйкес келмейтінін көруге болады. $\underline{Z}_{o\delta 1} \dot{I}_2$ және сәйкесінше $\underline{Z}_{o\delta 2} \dot{I}_2$ кернеу мәндері трансформатордың біріншілік және екіншілік орамаларындағы *кернеудің толық ішкі азаюы* деп аталады. Байқап қарасақ, келтірілген векторлық диграмма көлемдер арасындағы тек сапалық қатынасты көрсетеді. Көп жағдайларда кернеудің ішкі құлау үшбұрышы аз және келесідей етіп көрсетсе болады.

$$U_2 / U_1 \approx E_2 / E_1 = \frac{w_2}{w_1} \quad (7.12)$$

Сондай-ақ, трансформатордағы магниттеуші ток оның жүктемесіне тәуелді, яғни I_2 токқа тәуелді. Бұл өз кезегінде жүктеменің өзгерісінен кейін біріншілік орамада ток пен оның кернеуінің ішкі толық құлауы $\underline{Z}_{o\delta 1} \dot{I}_1$ өзгереді.



7.11-сурет

Дегенмен көп жағдайда кернеудің құлауы $\underline{Z}_{o61} \dot{I}_1$ қорек көзінен U_1 аз болып келеді және I_{1x} магниттеуші ток $I_2 = 0$ кезінде трансформатордың бос жүріс тогына тең деп есептесе болады.

7.6. ТРАНСФОРМАТОРДЫҢ СЫРТҚЫ СИПАТТАМАСЫ ЖӘНЕ ПӘК-І

Егер трансформатордың біріншілік орамасының шықпасы арасындағы кернеу тұрақты әрі номинал мәнге ие болса $U_1 = U_{ном}$, онда жүктеме кедергісін өзгерту кезінде трансформатордың орамаларында ток I_1 және I_2 пен екіншілік кернеу U_2 өзгереді.

Трансформатордың сыртқы сипаттамасы қабылдағыш қуатының тұрақты коэффициенті ($\cos \varphi_2 = const$) кезінде және номиналды біріншілік кернеу $U_1 = U_{ном}$ кезінде (7.12-сурет) екіншілік U_2 кернеу өзгерісінің жүктеме I_2 тогынан тәуелділігін анықтайды.

7.13-суретте трансформатордың энергетикалық диаграммасы көрсетілген, P_1 — біріншілік орама қуаты, $P_{пр1}$ — біріншілік орама сымдарын жылытуға кететін шығын қуаты, P_c — магнит

өткізгіштегі гистерезистегі және құйындық токтардағы шығын қуаты; $P_{12} = P_1 - P_{\text{пр1}} - P_c$ — екіншілік орама қуаты, $P_{\text{пр2}}$ — екіншілік орама сымдарын жылытуға кететін шығын қуаты, $P_2 = P_{12} - P_{\text{пр2}} = P_1 - P_{\text{пр1}} - P_c - P_{\text{пр2}}$ — трансформатордан қуаттанатын қуат тізбегі.

Трансформатордың шығынсындағы активті қуаттың P_2 кірістегі активті қуатқа P_1 қатынасы пайыз түрінде келтірілген,

$$\eta = (P_2 / P_1) 100\%$$

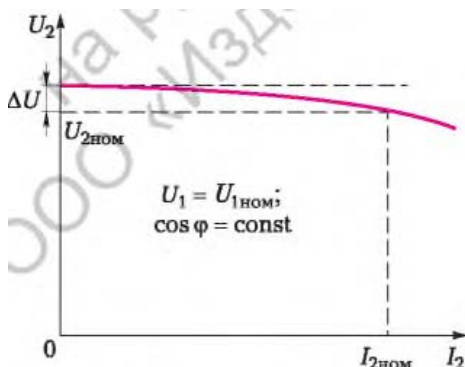
Жұмыс режиміне тәуелді трансформатордың *пайдалы әсер коэффициенті* (ПӘК) деп аталады.

ПӘК-ті табу үшін бос жүріс сынағы (7.3-бөлімшені қараңыз) мен қысқа тұйықталуынан (7.4-бөлімшені қараңыз) трансформатордың шығын қуатын тура өлшеуіне негізделген жанама өлшеу әдісі ыңғайлы.

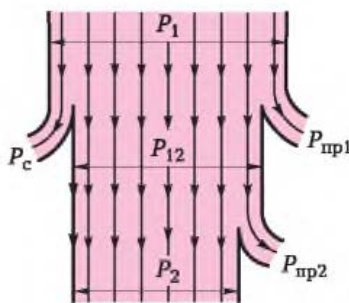
$$\eta = \left(\frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \right) 100\% = \left(1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P} \right) 100\%$$

Трансформатордың біріншілік орамасында және қабылдағыштың қуат коэффициентінде $\cos \varphi_2 > 0,8$, сондай-ақ кернеу $U_1 = U_{\text{ном}}$ токтың $I_1 = I_{\text{ном}}$ номиналды мәнінде үлкен қуатты күштік трансформаторлардың ПӘК-і 99% асады.

Аз қуатты трансформаторлар үшін ПӘК мәні 70%-дан аз болуы мүмкін.

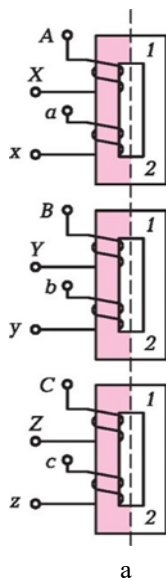


7.12-сурет

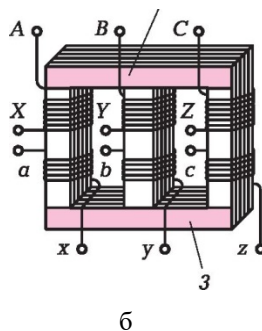


7.13-сурет

Үш фазалық тізбектерде (6-бөлімшені қараңыз) ток пен кернеудің мәнінің түрленуі үш бірдей бір фазалық трансформаторлар көмегімен жүзеге асырылуы мүмкін, 7.14 а суретінде А, В, С (X, Y, Z) бас әріптерімен жоғары кернеудің орама басы белгіленген, аттас жай әріптермен төмен кернеудің басы (соңы) көрсетілген. Үш фазалық тізбектің симметриялық жұмыс режимінде уақыттың кез-келген моментінде үш біріншілік және үш екіншілік орамалары нөлге тең (6.4 және 6.7-суреттерді қараңыз). Сондықтан олардың бірегей әрекетімен қоздырылатын үш магнит өткізгіште магниттік ағын қосындысы уақыттың кез-келген сәтінде дәл осылай нөлге тең болады. Сәйкесінше, егер жолақ сызықпен белгілінген магнит өткізгіштің бөлігін ескермесек, ал қалған бөліктерін аттас торцқа 1 және 2 магнит өткізгішін біріктірсе (7.14-суретті қараңыз), онда трансформатордың бастапқы функциялары сақталады. Бұл *үш фазалық трансформатордың магнит өткізгіші* конструкциясында қолданылған (7.14-сурет, б). Жоғарыда және төменде 3 бұғаумен біріктірілген және электротехникалық болаттан жиналған әрбір үш бірдей өзекте үш фазалық трансформатордың



7.14-сурет



біріншілік және екінші-лік ораманың бір фазасы орналасады. Магниттік ағындардың қосындысы уақыттың кез-келген бөлігінде нөлге тең. Соңғысы практикалық мәнге ие емес және бұғаудың бар екенін ескере отырып магнит өткізгіштің бұтақтанбаған екі шеткі аймақтарында және орталық магниттік кедергі аз ғана айырмашылықпен түсіндіріледі.

Симметриялық жүктеме жағдайында қарастырылған барлық бір фазалық трансформаторларды үш фазалық трансформатордың әр фазасы үшін таратуға болады.

Үш фазалық трансформатордың құны, өлшемі мен массасы дәл осындай қуатты бірақ бір фазалық аттас трансформаторлардың қосынды бағасынан аз болады. Алайда, трансформаторлық топтың сенімді эксплуатациясы үшін жөндеуге және тасымалдауға ыңғайлы бір фазалық қосымша трансформаторға ие болған ыңғайлы, ал үш фазалық бір трансформатор үшін дәл осындай қосымша үш фазалық трансформатор қажет болады. Көрсетілген себептер бойынша үш фазалық трансформатордың қуаты 1 млн кВт*А аспайды. Біріншілік сынды үш фазалық трансформатордың екіншілік орамасы жұлдызшамен ($\perp$ немесе бейтарап нүктені шығару кезінде $\perp 11$) немесе үшбұрышпен (Δ) біріктірілуі мүмкін. Жоғарылататын трансформатордың біріншілік орамасы төменгі кернеудің — НН (жоғарылататын —ВН) орамасы болып табылады.

Үш фазалық трансформаторды үш фазалық үлкен сызықтық ток және аз сызықтық кернеу кезінде үшбұрышпен қосқан қолайлы. Мұндай қосылыс кезінде орамаларды бекіту сызықтық кернеуге есептелуі тиіс, ал сымдардың қимасы сызықтың $\sqrt{3}$ есе аз фазалық токқа есептелуі керек. Ресейдің энергия жүйелерінде көбіне жоғарғы мен төменгі кернеу орамасының қосындысы кең таралған $\perp/\perp 11$, $\perp 11/\Delta$, $\perp/\Delta$. Мысалы егер төмен кернеу жақтан бейтараптамаға шығару талап етілмесе, жоғарылатқыш күштік үш фазалық үлкен қуатты трансформаторларда $\perp/\Delta$ қосылыс орамасын қолданады.

Бірдей $\perp/\perp$ немесе Δ/Δ орама қосылыстарында сызықтық кернеу қатынасы (жоғарының төменге) үш фазалық трансформатордың бір фазасының трансформациясына тең болады (7.1). $\perp/\Delta$ ($\Delta/\perp$) схемасы бойынша жоғары және төменгі кернеу қосылыстарында қатысты сызықтық кернеудің мәні трансформация коэффициентінен $\sqrt{3}$ есе аз (көп) болады. Өз кезегінде бұл трансформатордың орамасының қосылыс схемасын өзгерте отырып екіншілік кернеудің мәнін өзгертуге мүмкіндік береді.

Үш фазалық трансформатордың төмен және жоғары кернеу орамаларының қосылыс әдістерінен оның аттас сызықтық жоғары және төмен кернеулерінің арасындағы фаза ығысу бұрышы тәуелді болып келеді, мысалы сызықтық кернеулер арасында U_{ab} және U_{ab} . Осы белгі бойынша үш фазалық трансформаторларды топтарға бөледі. Орамалар қосылысының қосылу топтарының мәні минуттық және сағаттық тілдің векторлық диаграммасына негізделе отырып жасалған. Минуттық тілше (12 цифрына қойылған) сызықтық жоғары кернеумен сәйкестендіріледі, мысалы U_{AB} , ал сағаттық тілше — аттас сызықтық төмен кернеумен сәйкестендіріледі, мысалы U_{ab} .

Ресейде үш фазалық трансформаторлар үшін екі стандартты топ таңдалған: 0 және 11. 11 тобына жоғары және төмен кернеудің орама қосылысының екі түрі бар $\perp/\Delta$ -11 және $\perp_N/\Delta$, 0 тобына тек жалғыз қосылыс түрі жатады — $\perp/\perp_N$ -0.

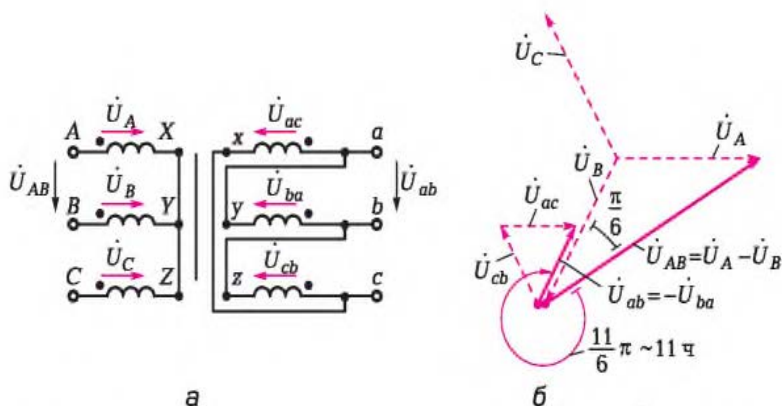
7.15, *a* және *b* суреттерінде үш фазалық трансформатордың қосылу орамасы $\perp/\Delta$ -11 және оған сәйкес векторлық диаграмма келтірілген.

Сызықтық төмен кернеу векторы $\vec{U}_{ab}$ сызықтық жоғары кернеу векторымен $\vec{U}_{AB}$ минуттық пен сағаттық тілшелердің арасы – 11 – ге тең бұрышын $2\pi - \pi/6 = \frac{11}{6}\pi$ құрайды.

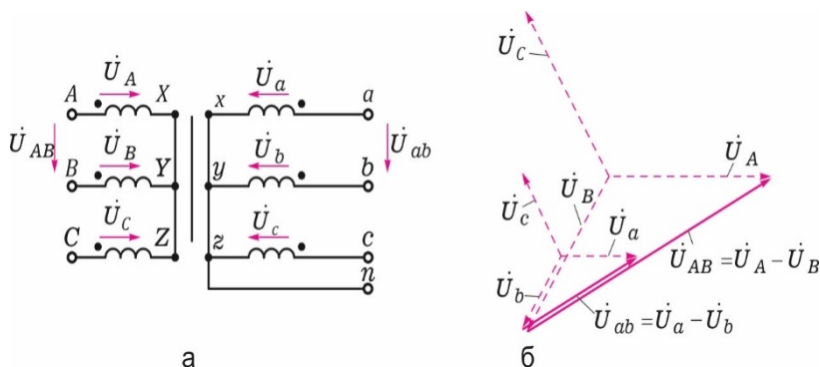
7.16, *a* және *b* суреттерінде үш фазалық трансформатордың қосылу орамасы $\perp/\perp_N$ -0 және оған сәйкес векторлық диаграмма келтірілген.

Сызықтық төмен және жоғары кернеулердің векторлары сәйкес келеді, ол минуттық және сағаттық тілінің 0 санына орналасуына сай. Үш фазалық трансформатордың қосылыс орамасының схемасы мен тобын оның қалқанында көрсетеді. Бұл ақпараттардың мәні үш фазалық трансформаторды қосу кезінде параллельді жұмыс жасауға қажет болады.

Бір фазалық трансформаторлар үшін бір қосылыс тобы орнатылған – 0.



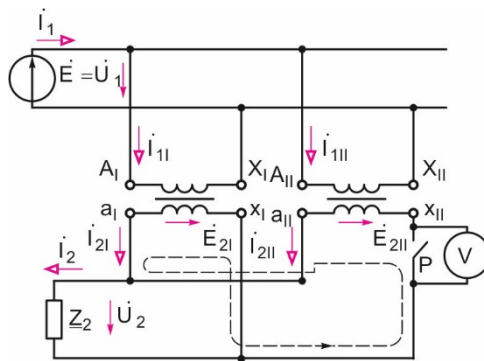
7.15-сурет



7.16-сурет

7.9. ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫҢ ПАРАЛЛЕЛЬ ЖҰМЫСЫ

Қабылдағыштардың толық қуаты ұлғайған (азайған) кезде максималды ПӘК алу үшін трансформатордың номиналды толық қуатын ұлғайтқан (азайтқан) дұрыс. Әрқайсысын қосып, өшіру мүмкін болу үшін бірнеше трансформаторды параллель қосу ыңғайлы. Бұл кезде трансформаторды тасымалдау да ыңғайлылық тудырады, себебі резервте тек бір ғана трансформатор болғаны жеткілікті жайт.



7.17-сурет

Параллель жұмысқа қосылған трансформаторлар параметрлері мынадай үш шартты қанағаттандыруы қажет:

1) бір фазалық 0 және 11 үш фазалық трансформаторлар үшін қосылған орамдардың 0 біркелкі тобы;

2) трансформация коэффициентінің айырмасы шекті $\pm 0,5\%$ мәнінен артық емес болғанда бірінші және екінші реттік кернеудің номиналды мәнінің бірдей болуы;

3) шекті айырмасы $\pm 10\%$ мәнінен артық емес болғанда қысқа тұйықталу кернеуі U_k мәндері бірдей болуы ((7.6) қараңыз).

7.17-суретте бір фазалық екі трансформатордың жұмысқа параллель қосылуының принциптік схемасы келтірілген.

7.17-суреттегі тізбекте штрих сызықпен келтірілген бірінші және екінші шарт ескерілмейтін болса, ЭҚК $E_{21} - E_{211} = \Delta E_2 \neq 0$ жұмыс істейтін болады да әрі трансформатор орамына қауіпті ток туындататын болады. ЭҚК ΔE_2 болуын ажыратқыш P тұйықталмаған кездегі вольтметрмен анықтауға болады.

Үшінші шарттың орындалуы параллель жұмыс істейтін трансформаторлар арасында жүктемені олардың номиналды толық қуаттарына пропорционал етіп бөлуге мүмкіндік береді.

7.10.

БІР ФАЗАЛЫҚ ЖӘНЕ ҮШ ФАЗАЛЫҚ АВТОТРАНСФОРМАТОРЛАР

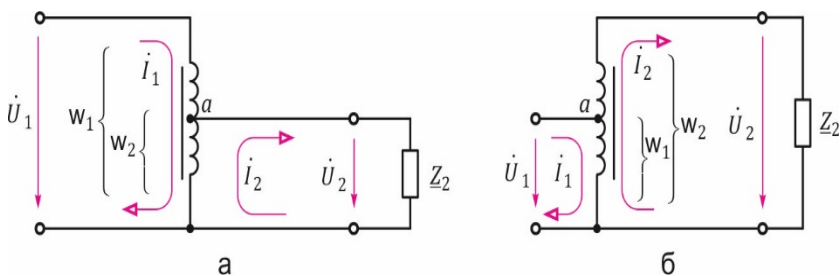
Жоғары кернеу беретін сымдарда кернеудің түсіп кетуін және ондағы өте созылып кетуді орнына келтіру үшін, номиналды кернеуі 110 мен 220 кВ, немесе 330 бен 400 кВ шамада болатын

беріліс сымдарын бірыңғай энергия жүйесіне біріктіру үшін, электр пештерінің қыздыру элементтеріндегі кернеуді сатылай реттеу үшін, және т.б. мақсаттар үшін трансформация коэффициенті $n \leq 2$ болатын аса қуатты күш трансформаторлары қажет.

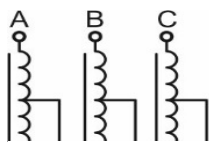
Мұндай жағдайларда әдеттегі қарапайым трансформатор орнына автотрансформатор қолданған ыңғайлы, себебі сол номиналды толық қуат болса да мұндағы ПӘК жоғары, ал масса мен көлемі кіші.

Қарапайым трансформатордан автотрансформаторлардың айырмашылығы мынадай – мұнда жартысы төмен кернеулі, қалғаны жоғары кернеулі бір орам болады. Автотрансформатордың жоғары кернеулі орамы бірінші реттік (7.18-сурет, а) немесе екінші реттік (7.18-сурет, б) болуы мүмкін.

Магниттелудің $\dot{I}_{1x}$ мардымсыз тогын ескермесек, онда трансформатордың жұмыс режимінде оның бірінші $\dot{I}_1$ және екінші $\dot{I}_2$ реттік орамының фазасы бірдей болады (7.10-суретті қараңыз), ал бірінші мен екінші орамның жалпы бөлігіндегі жұмыс істеп тұрған ток мәні $|I_1 - I_2|$ тең болады. Егер төмендеткіш (жоғарылатқыш) автотрансформатордың трансформация коэффициенті бірден сәл ғана өзгеше болса $n_{12} = w_1/w_2 = I_2/I_1$ ($n_{21} = w_2/w_1 = I_1/I_2$), онда жұмыс істеп тұрған ток $\dot{I}_1$ мен $\dot{I}_2$ мәні бір-біріне жақын, ал олардың айырмасы әрқайсысының мәнімен салыстырғанда аз болады. Бұл дегеніміз бірінші және екінші орамның жалпы бөлігінің қиылысу аудандарының аз болуын қамтамасыз етеді деген сөз. Сәйкесінше, орамалардың салмағы мен өлшемі, магниттік өткізгішті орнату тер-



7.18-сурет



7.19-сурет

езесінің ауданы өзгереді, сонымен қатар, магнитті өткізгінің де өлшемі ауысады.

Автотрансформатордың кемшілігі – жоғары және төмен кернеулі тізбектің электрлік қосылуы болып табылады. Сондықтан, төмен кернеулі тізбекті электролиздеу жоғары кернеуге

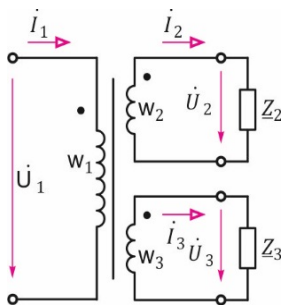
сәйкес келуі қажет. Трансформация коэффициентінің үлкен мәнінде бұл фактор төмен кернеулі тізбектің электрқұралының бағасының артуына және қызметкерлер жұмысындағы қауіпсіздіктің кемуіне әкеп соқтырады.

Автотрансформатор орамындағы а нүктенің орналасуының ауысуы (7.18-сурет) екінші реттік кернеуді бірқалыпты реттеуге мүмкіндік береді, мысалы, екінші реттік тізбегінің бір шықпасында жылжымалы контактісі бар зертханалық автотрансформаторлар (ЛАТР).

Үш фазалық автотрансформаторлар орамы әдетте шығарылатын бейтарап нүктемен немесе оның көмегімен жұлдызшамен қосылады (7.19-сурет).

7.11. КӨП ОРАМАЛЫ ТРАНСФОРМАТОРЛАР

Көп орамалы трансформатор – жалпы магнит өткізгішке орналастырылатын бір алғашқы орамнан және бірнеше екінші реттік орамнан тұрады. Мұндай трансформаторлар 1000 В · А дейінгі қуатқа ие бола алады және де өндірістік электроника құралдарында



7.20-сурет

бір-бірінен оқшауланған бірнеше тізбектің бір көзден қуат алуы үшін қолданылады. Көп орамалы және екі орамалы трансформаторлардың жұмыс істеу принциптері ұқсас.

7.20-суретте келтірілген схема бойынша қосылған үш орамалы екі фазалық трансформатордың жұмысын қарастырайық. I_{1x} орамасындағы бастапқы магниттеуші ток магнит өткізгіштегі барлық орамалар санына пропорционал болатын ЭҚК-ті индукциялаушы магнит ағынын

інші реттік орамалар I_2 және I_3 тогымен

жүктелген болса, онда бірінші реттік ораманың МҚК-і осы токтың МҚК-ін магнитсіздендіруші әсерін теңестіруі қажет. Сондықтан көп орамалы трансформаторларда МҚК-тің теңестірілуі (7.8) ұқсас, мынаған тең:

$$I_1 w_1 = I_2 w_2 + I_3 w_3 + I_{1x} w_1 ,$$

ал, екінші реттік орама теңдеулерінен кернеу (7.1) сияқты мынаған тең:

$$U_2 = U_1 w_2 / w_1 ; \quad U_3 = U_1 w_3 / w_1$$

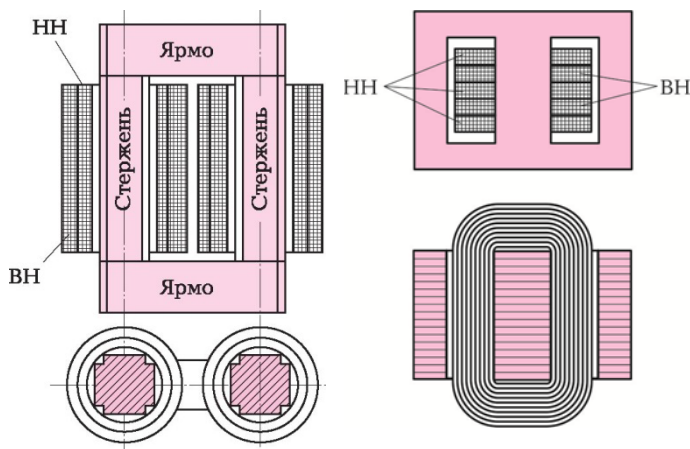
Үш фазалық трансформаторларда екі немесе одан көп екінші реттік орамалар болуы мүмкін.

Ток жүктемесі фазасы бойынша сәйкес келетін барлық екінші реттік орамалардың бір мезеттегі номиналды жүктемесінің ықтималдығы аз болады. Сондықтан көп орамалы трансформатордың алғашқы ораманың қуаты әдетте екінші реттік ораманың толық номиналды қуаты қосындысынан кем шамаға деп есептеледі.

7.12. КҮШТІК ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫҢ МАГНИТ ӨТКІЗГІШТЕРІ МЕН ОРАМАЛАРЫНЫҢ КОНСТРУКЦИЯЛАРЫ

Трансформаторлардың магнит өткізгішін электротехникалық болаттың суық илемделген және ыстық илемделген табақтарынан дайындалады. Шығынды азайту мақсатында құрамында күйінды тоқтан 4 % кремнийге дейін бар болатын ыстық илемделген электротехникалық болаттан жасалған магнит өткізгіш 0,35-тен 0,5 мм дейінгі қалыңдықтағы штампталған табақтардан құралады. 1511 (3.2 табл қараңыз), 1512, 3411, 3412 болаттары қолданылады. Магнит өткізгішті жинау алдында табақтарды оқшаулағыш лакпен жағады, одан кейін қорапшаға болат шпилькалар түрінде буылады. Магнит өткізгіштің орамға қатысты орналасуына қарай *өзекшелі* және *құрышты* трансформатор деп бөледі. Бірінші жағдайда ВН және НН орамдары магнит өткізгіштің өзекшесін де орайды (7.21-сурет), екіншіде – магнит өткізгіш ВН және НН орамаларын кей жерінде орап өтеді (7.22-сурет).

Өзекшелі трансформатор құрылымы құрыштыға қарағанда қарапайым болып келеді, орамның қажетті оқшаулану беруін жеңілдетеді және де күштік трансформаторларда қолданылады. Ш-түріндегі штампталған жапырақшалардан құралған құрышты трансформатордың кейбір ерекшелігіне орамның механикалық бүлінуден ішінара қорғауын жатқызуға болады.



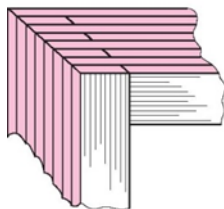
Ярмо – бұғау; Стержень – өзекше

7.21-сурет

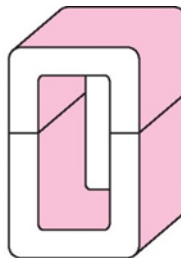
7.22-сурет

Магнит өткізгіштің жекелеген магниттік жапырақшаларының қиысқан жеріндегі магниттік кедергісін кеміту үшін олар сол түйісу нүктесінде шихталады, яғни қапталады (7.23-сурет).

Трансформатордың магнит өткізгіші – ауасыз босандатқанда өткізу бағытында жоғары магнит өткізгіштік беретін суықилемделген электротехникалық болаттан да дайындалады. Өткізу бағытымен кесілген бұл болат жолақтарды қажетті магнитөткізгінің мөлшеріне келтіріп есіп, күйдіреді, сосын трансформаторға қажет бөліктерге бөледі (7.24-сурет). Мұндай жинақтаудағы магнит өткізгіште ауа саңылалаулары болмайды да, токтың бос жүрісін айтарлықтай азайтады.



7.23-сурет



7.24-сурет

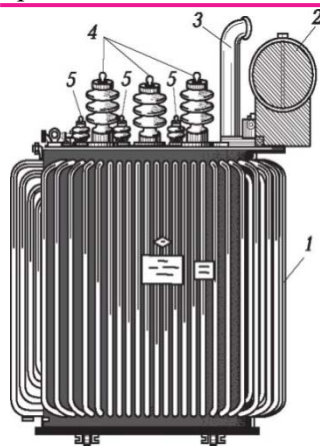
7.1-кесте. «Шнейдер электрик» компаниясының (Франция) құрғақ үш фазалық трансформаторлардың кейбір типтерінің параметрлері

Қуаты , кв*А	Бірін ші реттік керне у, В	Екінші реттік кернеу, В	Бос жүріс режимінде гі шығын қуаты, Вт	Номиналды жүктемедегі және $\theta=75^{\circ}\text{C}$ -ғы шығын қуаты, Вт	Сал мағ ы, кг	Габариттері*, м
100	10000	400	440	1700	650	1,05x0,65x1,2
400	10000	400	1000	4500	1210	1,375x0,795,1,33
1600	10000	400	2800	12300	3210	1,665x0,945x2,035
3150	10000	400	5500	21800	6000	2,06x1,196x2,33

* Қаптамасыз.

ВН және НН орамдардың сәйкесінше орналасуын концентрленген (7.21-суретті қараңыз) және кезектесуші деп бөледі (7.22-суретті қараңыз). Орамалардың концентрленген орналасуы күштік трансформаторларда қолданылады, және ВН мен НН орамалы катушкасының екі коаксиалды цилиндр түрінде орналасуын көрсетеді. НН орамасы өзекшеге жақын орналасқан, себебі оны магнитті өткізгіден оқшаулау оңай.

Қуаты аз трансформаторлар табиғи ауамен салқындату арқылы жасалады да, *құрғақ* деп аталады (7.1-кесте), орташа және жоғары қуаттылар – май арқылы салқындату арқылы жасалады (7.25-сурет). Жете тазартылған минералды маймен толтырылған, әрі жақсы оқшаулағыш болып табылатын болат бак ішіне орамдалған магнит өткізгіш орналастырылады (1.1-кестені қараңыз). Майдан жылуды шығару үшін бак сыртында ауа ағыны арқылы салқындайтын түтікті 1 радиатор орналасқан. Трансформатор жұмысы кезінде май қызып, бак ішіндегі ағын бағытымен циркуляция жасайды, одан кейін салқындай отырып, радиатордағы төмендегіш ағын бағытымен циркуляция жүреді. Қызғанда және салқындағанда бактағы майдың көлемі айтарлықтай өзгереді. Майдың көлемі аз болғанда бак ішіне ылғал ауа еніп, ылғалын гигросоптық майға қарай береді де, ондағы электрлік беріктік төмендейді. Қызған майдың артық резервуары қызметін жалпы май көлемінің шамамен 10%-ын құрайтын 2 болат бак атқарады.



7.25-сурет

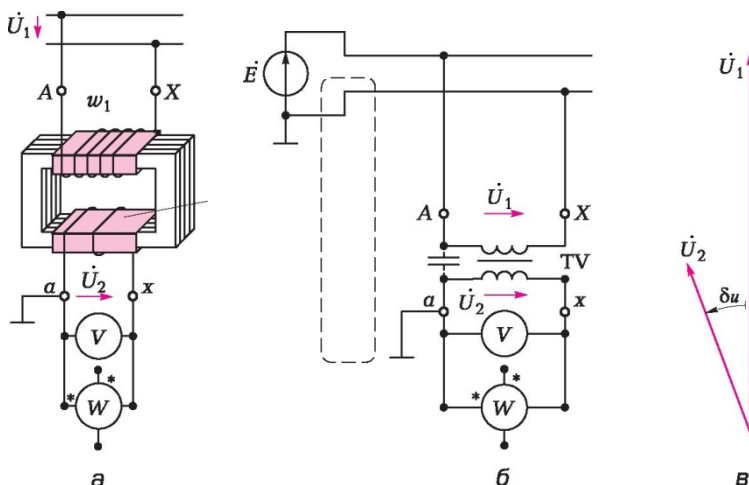
Маймен салқындатудың кемшілігі – қызған минералды май (жану температурасы шамамен 160°C) болып табылады. Май жанғанда пайда болатын газ бакты бүлдіруі мүмкін. Бактағы апаттың алдын алу үшін бакта жұқа мембраналық сақтандырғышы бар газ шығаратын 3 түтік орнатылады, ол қысым артқан жағдайда газдың еркін шығуын қамтамасыз етеді.

Трансформатор орамаларының ұштарын бактан 4 және 5 фарфор өткізгіш оқшаулағыштар арқылы шығарады.

7.12. ӨЛШЕУШІ ТРАНСФОРМАТОРЛАР

Кернеу (TV) мен ток (ТА) өлшегіш трансформаторларды құрылғылардың өлшеу мен оқшаулау шегін кеңейту үшін және олардың аппараттарын жоғары кернеу тізбегінен автоматты түрде қорғау үшін қолданады.

Кернеу трансформаторы. 7.26, *а* және *б* суреттерінде TV қосу схемасы және оның шартты белгілері келтірілген. Кернеу трансформаторы қуаты төмен күштік трансформаторға ұқсайды. Оның алғашқы орамы – тарамдар саны аз болатын ВН орамы, w_1 – тізбекке қосылады, өлшенетін U_1 кернеу, ал екінші орамда w_2 – мейілінше аз, НН орамасы, U_2 – бір-біріне параллель түрде вольтметр



7.26-сурет

және тізбекке басқа құрылғылардың кернеулері қосылады. Екінші орамның бір ұшы мен трансформатордың корпусы жерге жалғанады. Бұл оқшаулау жүйесінің бүлінуі жағдайын алдын-алу үшін, және де 7.26, б суретінде трансформатордың бірінші мен екінші реттік орамасы арасындағы сыйымдылық арқылы штрих сызықпен көрсетілген ток тізбегін тұйықтау үшін жасалады. Құрылғылар тізбегінде бұл токтың бар болуы өлшеу дәлдігін төмендетеді.

Өлшеуіш құрылғылар тізбегі кернеуі мен вольтметрлер кедергісі электрмеханикалық өлшегіш механизмдер негізінде (5.5-бөлімшені қараңыз) мыңдаған Омға жетеді, ал сәйкесінше электр құрылғылар мен тізбегінікі (15.10-бөлімшені қараңыз) – ондаған мегаомға теңеседі, яғни, TV бос жүріске жақын болатын жүріс шарттарында жүзеге асады (7.3-бөлімшені қараңыз). Сондықтан бірінші және екінші орамдағы TV кернеу төмендеуі аз болады, яғни, $U_1 \approx E_{1x}$; $U_2 \approx E_{2x}$ деп есептеуге мүмкіндік береді және (7.1) бойынша:

$$E_{1x}/E_{2x} = w_1/w_2 = n_{12} ,$$

болғандықтан

$$U_1 = n_{12} U_2 \quad (7.13)$$

мұндағы, $n_{12} \gg 1$ – трансформация коэффициенті.

Сәйкесінше, екінші реттік төмен U_2 кернеуді анықтай отырып, бірінші жоғары U_1 кернеуді табуға болады.

TV орамаларының шықпаларында $A-X$, $a-x$ белгілері болады. Таңдалынған кернеудің оң бағытында (7.26 a және b суреттерін қараңыз), яғни, трансформатордың бірдей салыстырмалы біраттас орама шықпаларының екінші және бірінші кернеу фазалары сәйкес келеді (0-жалғау тобы, 7.8-бөлімшені қараңыз).

TV кернеу фазалары мен өлшеу құралдары тізбегінің теңдіктері сәйкесінше екінші орам мен құралдар қосылуы арқасында алынады. Фазалардың дұрыс сәйкесуі вольтметр үшін емес, қайта ваттметр мен есептегіш үшін маңызды. Көптеген TV екінші кернеуінің номиналды мәні стандартты 100 В шамасында болады.

(7.13) тепе-теңдігі TV орамасындағы кернеудің төмендеуін ескермейді. Шын мәнінде, бұл кернеудің төмендеуі оны өлшеуде (кернеу қателігі) және фаза берілісінде (бұрыштық қателік) дәлсіздіктерге әкеледі.

Кернеу қателігі дегеніміз – алғашқы кернеудің өлшенген $U_{\text{өлш}}$

және шын U_1 мәнінің айырымын осы кернеудің шын мәніне қатынасына тең:

$$f_n = \left(\frac{U_{1\text{өлш}} - U_1}{U_1} \right) 100\% .$$

Бұрыштық қателік 7.6 суреттегідей векторлық диаграммадағы екінші және бірінші кернеу векторларының арасындағы δ_u бұрышты анықтайды. (7.26-сурет, в). Ол минутпен өлшенеді, және оң деп есептеледі, егер екінші кернеу векторы бірінші кернеу векторынан асып кететін болса.

Бірінші реттік номиналды кернеулер үшін $U_{1\text{ном}} < 6 \text{ кВ}$ табиғи ауа арқылы салқындайтын құрғақ TV қолданылады (7.2 табл), ал $U_{1\text{ном}} \geq 6 \text{ кВ}$ үшін майлы TV қолданылады.

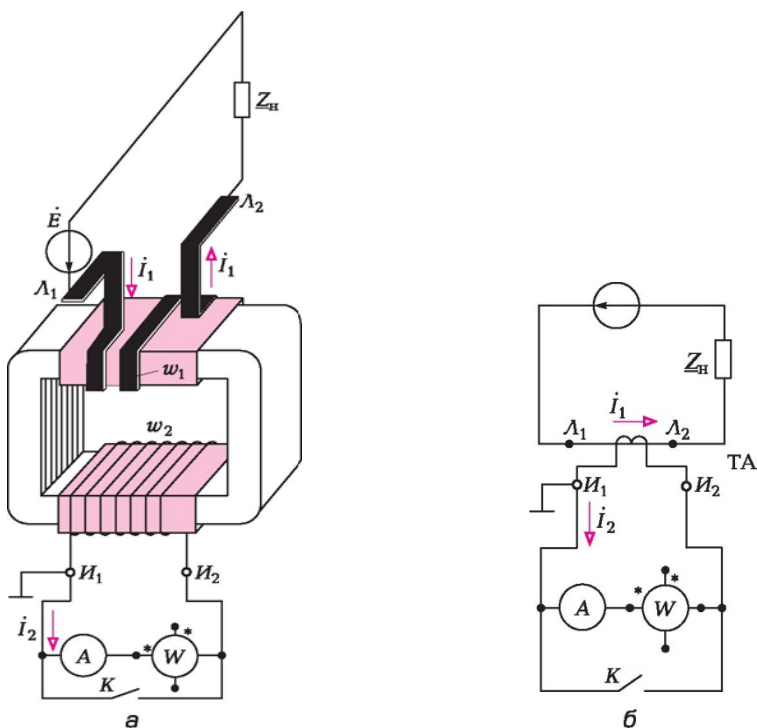
Бір фазалық және үш фазалық TV дайындалады.

Ток трансформаторы. 7.27, а және б суреттерінде ТА-ны тізбекке қосудың принциптік схемасы және оның шартты белгісі келтірілген.

ТА-ны сымдар w_1 орамы аз болатын бірінші орам сәйкесінше өлшенетін токтың оралмаған аймағына қосылады да, оның орамы саны көп болатын w_2 екінші реттік орамына амперметр және басқа өлшеуіш аспаптардың тізбегі қосылады. Бірінші ораманың басы мен

7.2 кесте «Шнейдер электрик» компаниясының (Франция) құрғақ трансформаторлардың кейбір типтерінің параметрлері

VRC1/S1F кернеуі трансформаторы				Тороидалы жүрекшесі ARC2/S1 ток трансформаторы			
Бірінші номиналды кернеу, кВ	Екінші реттік номиналды кернеу, В	Екінші орамның номиналды қуаты, В*А	Дәлдік класы	Бірінші номиналды ток, А	Екінші номиналды ток, А	Бірінші орам кедергісі, Ом	Дәлдік класы
3,3	110	75	0,5	75	5	0,006	0,5
6,6	110	75	0,5	250	5	0,06	0,5
11	110	75	0,5	600	5	0,15	0,5
15	110	75	0,5	1250	5	0,33	0,5



7.27-сурет

ұшы сәйкесінше L_1 және L_2 (сызық) деп, ал екінші ораманың басы мен ұшы – I_1 және I_2 (өлшеуіш аспап) деп белгіленеді.

Амперметр мен өлшенетін құралдар тізбегінің қосынды кедергісі аз (әдетте, 2 Омнан аз), яғни, ТА трансформатордың қысқа тұйықталуға жақын кездегі шарттары жағдайында жүзеге асады (7.4-бөлімшені қараңыз). ТА екінші реттік орамы кернеуі өлшеуіш аспаптардың салыстырмалы түрде төмен кедергісінде кернеу кемуімен анықталады (әдетте, 1-12 В), оған ЭҚК E_2 төмен мәні сәйкес келеді, сәйкесінше магнит өткізгіштегі магнит ағыны да аз болады (7.11).

Аз магниттік ағынды қоздыру үшін мардымсыз МҚК қажет $w_1 I_{1x}$, ЭҚК теңдеуіндегідей (7.8):

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_{1x} w_1$$

ескермесек,

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_2 w_2$$

деп санауға болады, немесе,

$$I_1 = \left(\frac{w_2}{w_1}\right) I_2 = n_{21} I_2$$

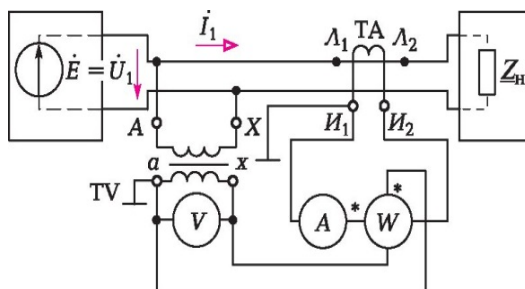
мұндағы, $n_{21} \gg 1$ – трансформация коэффициенті.

Сәйкесінше, екінші токтың мардымсыз мәнін өлшей отырып, бірінші токтың үлкен мәнін анықтауға болады.

Индекстері бірдей ТА мәніне қатысты бірдей токтың оң бағыттағы мәні таңдалынса, екінші және бірінші токтың фазалары сәйкес келеді. Барлық ТА-да екінші токтың номиналды мәні стандарт мәнге ие – 5А (арнайы жағдайларда 1 А).

(7.14) теңдігі $i_{1x}w_1$ МҚК ескермейді, оның нәтижесі ток өлшемдерінің (ток кемшілігі f_i) және фазалық берілістегі (бұрыштық кемшілік δ_i) мәнінің дәл болмауына әкеп соқтырады. Бұл екі өлшем де TV кемшіліктеріне ұқсас түрде анықталады. Магнит өткізгіштің магнит кедергісі мен қуаты қанша аз болған сайын, МҚК те $i_{1x}w_1$ сонша аз болуы ондағы сол магнит ағынының қозуы үшін қажет болады. Сондықтан ТА магнит өткізгіштерін майыспалы жұқа пермаллойдан сақина түрінде дайындайды (7.2-кестені қараңыз). МҚК-ның әсері аз болуы үшін МҚК-тің алғашқы орамы мүмкіндігінше үлкен болуы қажет (500 А-дан аз емес). Сондықтан, номиналды токтағы бірінші орам бірнеше айналымға ие болуы қажет. Ал $I_{1ном} < 500 А$ ток үшін бірайналымды ТА қолданылады.

ТА бос жүрісі режимі (орамның екінші тізбегі тұйықталмаған, және оның тогы $i_2=0$) апатты болуы мүмкін. Мұндай жағдайда ТА магнит өткізгішті және орамдар саны w_1 аз катушкаға айналады, тізбектегі синусоидалы ток кедергісі мардымсыз (7.27-суретті қараңыз) және оның жұмыс режиміне әсер етпейді. Бірінші орамның үлкен тогы тіпті өзгеріссіз қалады да, және (7.13) бойынша магнит өткізгіштің магниттену тогына тең болады: $i_1 = i_{1x}$. Магниттелген токтың бірнеше рет артуы магнит ағынының айтарлықтай артуына әкеледі, салдарынан магнит өткізгіш пен екінші орамның E_2 ЭҚК-і шекті қанығуына әкеледі (жоғары токтарға ТА-да 1,5 кВ-ға дейін), ол қызмет көрсетуші персонал үшін аса қауіпті. Оның үстіне, магнит өткізгіштегі шығын қуаты артады, оның қызуы, кеңейіп тіпті, оқшаулағыш бүлінуі де мүмкін.



7.28-сурет

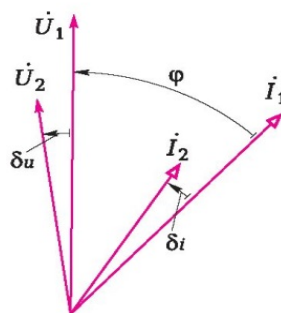
Өлшеуіш аспаптарды жұмыс істеп тұрған ТА-дан ажыратар алдында, оның екінші орамасын K кілтпен тұйықтау қажет (7.27, б суретін қараңыз).

ТА және TV трансформация коэффициенті барынша рұқсат етілген қателік мәніне қарай дәлдік кластарына бөлінеді. Мысалы, TV 0,5 класына кернеу мәні $\pm 0,5\%$ болатын рұқсат етілген өлшеу қателігі сәйкес келсе, бірінші реттік 0,8-1,2 номиналды мәніндегі кернеуде бұрыштық қателік $\pm 20'$ тең, ал ТА 1 класы ток өлшеудегі рұқсат етілетін қателік $\pm 1,0\%$ және тізбекке 0,25-1,0 жүктеме түскендегі бұрыштық қателік $\pm 90'$ және бірінші токта номиналды мәні 1,2-0,1.

7.28-суретте бір фазалық өлшеуіш аспаптар кешенін TV және ТА арқылы қосу схемасы келтірілген. Үш фазалық тізбекте өлшеу үшін бір фазалық бірнеше ТА мен ТВ қажет (6.5-бөлімшені қараңыз).

Ток пен кернеуді өлшеу дәлдігі тек трансформация коэффициентінің қателігіне тәуелді. Активті қуатты $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi$ (реактивті $Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi$) өлшеу дәлдігіне бұрыштық қателіктер де, әсіресе, бірінші кернеу мен ток арасындағы фаза жылжуының үлкен (кіші) шамаларында, әсер етеді (7.29-сурет).

Активті (реактивті) қуаттың өлшенетін мәні $\cos \varphi (\sin \varphi)$ мәніне емес, $\cos(\varphi + \delta_i) [\sin(\varphi + \delta_u - \delta_i)]$ мәніне пропорционал болады. Бұл ретте, таңбалары әртүрлі болса δ_u мен δ_i қосылып кетуі мүмкін.



7.29-сурет

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Трансформатордың қандай параметрлері алғашқы және екінші реттік деп аталады?
2. Трансформатордың қандай негізгі параметрлері оның қалқанында көрсетіледі?
3. Трансформатордағы шығын қуаты қандай құраушылардан қосылады?
4. Трансформатордағы шығын қуатының қандай құраушылары бос жүріс тәжірибесінде, қандайлары қысқа тұйықталу тәжірибесінде анықталады?
5. Трансформаторды параллель жұмысқа қосқанда қандай ережелерді сақтау қажет?
6. Өзекшелі және құрышты трансформаторлардың құрылымдық ерекшеліктері қандай?
7. Неге ток өлшегіш трансформатордың бос жүріс режимі авариялық болып табылады?

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. Төмендеткіш трансформатордың бірінші және екінші реттік орамының айналымы $w_1=300$ және $w_2=50$. Трансформатордың трансформация коэффициенті неге тең?
Жауабы: 6.
2. Артыратын трансформатордың бірінші және екінші реттік айналымының саны $w_1=40$ және $w_2=120$ тең. Трансформатордың трансформация коэффициенті неге тең?
Жауабы: 3.

СИНУСОИДАЛЫҚ ТОКТЫҢ ЭЛЕКТР МАШИНАЛАРЫ

8.1. ЖАЛПЫ МАҒЛҰМАТТАР

Синусоидалық токтың электр машиналары (асинхронды және синхронды) оларда айналмалы магнит өрісінің қозуымен сипатталады.

Асинхронды машина (қозғалтқыш пен генератор) – қозғалмалы бөлігі *асинхронды* айналатын, яғни магнит өрісінің айналу жиілігінен өзгеше айналу жиілігі бар машина. Асинхронды машиналар негізінен қозғалтқыштар ретінде пайдаланылады. Асинхронды қозғалтқыштың негізгі артықшылығы – конструкциясының қарапайымдылығы және төмен құны. Машинада қандай да бір тез зақымданатын не тез тозатын электр бөлшектері жоқ. Негізгі кемшілігі – жұмыс режимдерінің қиын әрі үнемсіз реттелуі.

Синхронды машина (қозғалтқыш пен генератор) – қозғалмалы бөлігі синхронды айналатын, яғни айналу жиілігі магнит өрісінің айналу жиілігіне сәйкес келетін машина. Синхронды машиналар негізінен электр станцияларында электр энергиясын өндіруге арналған генераторлар ретінде пайдаланылады. Қазіргі электр генераторларының бірлік қуаты $1500 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ мәніне жетеді.

8.2. ҮШ ФАЗАЛЫҚ АСИНХРОНДЫ МАШИНАНЫҢ ҚҰРЫЛЫСЫ

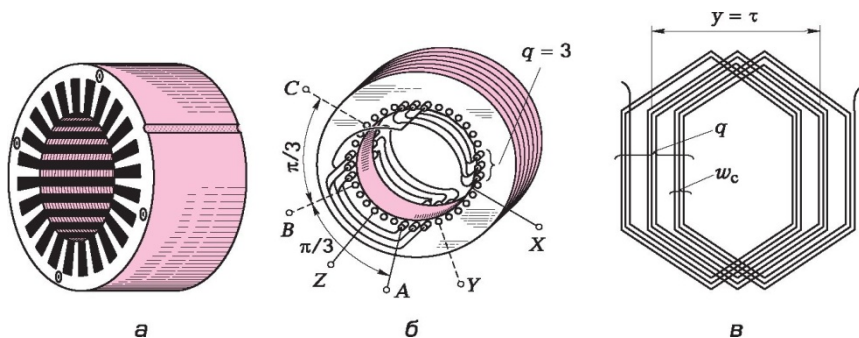
Үш фазалық асинхронды машина қозғалмайтын статордан және айналмалы ротордан тұрады.

Статордың конструкциясы. Асинхронды машинаның статоры бір-бірінен лак қабатымен оқшауланған электртехникалық болат

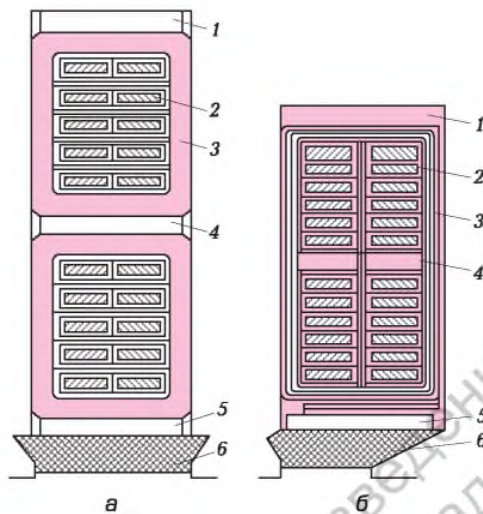
табақтарынан жиналған толық цилиндр болып есептеледі (8.1-сурет, а). Статордың ішкі жағындағы ойықтарда үш фазаның орамасы орналасады. Әрбір фазаның орамасы кезек-кезекпен жалғанған және статор шеңберін бойлай бір-бірінен бірдей қашықтықта орналасқан бір немесе бірнеше катушка топтарын қамтиды. 8.1, б суретінде статор ойықтарында екі катушка тобынан тұратын бір фаза орамасының орналасуы көрсетілген. Мұндағы A – ораманың басы, ал X – соңы.

Фаза орамалары өз арасында жұлдызшамен не үшбұрышпен жалғанады да, үш фазалық желіге қосылады. Фаза орамаларындағы токтар машинада полюс жұптарының p бір фаза орамасындағы катушка топтарының санына тең саны бар статордың айналмалы магнит өрісін қоздырады. Бұған фаза орамаларының өзара орналасуы арқылы қол жетеді, бұл ретте бір фаза орамасының катушка топтары статор шеңберін бойлай көршілес фаза орамасының катушка топтарына қатысты $(2/3\pi)/p$ бұрышына жылжиды. Сонымен қатар, төрт жолақты машинаның орамасы үшін ($p = 2$) бұл бұрыш $\pi/3$ -ке тең (8.1, б суретінде B және C фазаларының орамаларына арналған статор ойықтары штрих сызықпен белгіленген).

Көп орамды катушка тобын статордың ойықтарына орналастыру үшін оны әрбір секцияда w_c орамнан кезек-кезекпен жалғанған секцияларға q бөледі. Орамының қадамы y бірдей не әркелкі секциялар болуы мүмкін. Бірінші жағдайда әрбір секцияның жақтары статор шеңбері бойынша π/p бұрышына жылжыған, бұл бір полюстік бөлініске $y = \tau$, статор шеңберінің бір полюске келетін ұзындығына сәйкес келеді (8.1-сурет, в).



8.1-сурет



8.2-сурет.

$$\tau = \pi D / (2p),$$

(8.1)

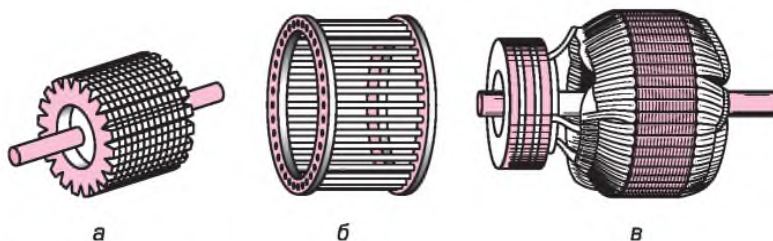
мұндағы D – статор білігінің ішкі диаметрі.

Екінші жағдайда катушка тобының секциялары бір-біріне салынған (8.1-сурет, б), яғни олардың орамының қадамы айнымалы $\tau < y < \tau$.

Фаза орамдарының бірнеше ойық бойынша орналасуы статордың цилиндрлік конструкциясының пайдаланылуын жақсартып қана қоймай, сонымен қатар статор мен ротордың арасындағы ауа саңылауында магнит өрісінің қажетті бөлінуіне негіз болады.

Статордың өзекшесі ашық не жартылай ашық ойықтармен жасалады (8.2-сурет, а және б). Суретте: 1, 4, 5 – оқшаулағыш аралықтар; 2 – өткізгіштер; 3 – оқшаулау; 6 – сына көрсетілген. Жартылай ашық ойықтарды қолдану магниттік кедергіні және, сәйкесінше, магниттеуші токты азайтады. Ашық ойықтарда секцияларды салу жеңілдеп, оларды оқшаулау сенімділігі артады.

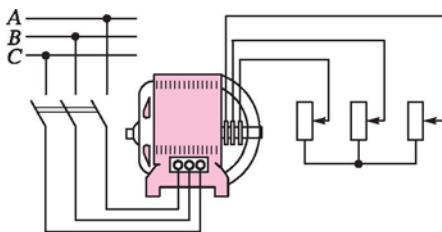
Ротордың конструкциясы. Асинхронды машинаның роторы бір-бірінен лакпен оқшауланған электртехникалық болат табақтарынан жиналған цилиндрлік өзекше болып есептеледі (8.3-сурет, а). Ротордың өзекшесі мойынтіреппен бекітілген білікке салынған. Ротор өзекшесінің ойықтарында ротор орамасының орамдары орналасады. Ротор қысқа тұйықталған орамалы және фазалық ротор болып бөлінеді.



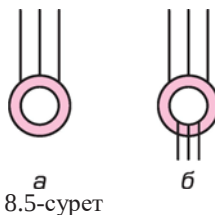
8.3-сурет

Қысқа тұйықталған орамалы ротор қозғалтқыштардың көбінде қолданылады. Оның құны төмен және қызмет көрсету жеңіл. Мұндай ротордың орамасы мыс не алюминий өзектерден цилиндрлік тор түрінде орындалады (8.3-сурет, б), оларды ротор өзекшесінің ойықтарына оқшауламай орналастырады. Өзектердің ұштарын ротордың шет жақтарында өзектердің материалы сияқты материалдан жасалған шығыршақтармен тұйықталады («тиін дөңгелегі»). Көбінесе, мұндай орама ротор өзекшесі ойықтарын балқытылған алюминиймен құю арқылы дайындалады.

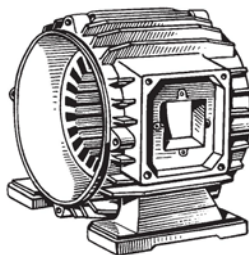
Фазалық ротордың орамасы (8.3-сурет, в) оқшауланған жетекпен жасалады. Көп жағдайда ол үш фазалық болады, катушка саны қозғалтқыш статорының орамасындағыдай. Ротордың үш фазасының орамасы жұлдызша түрінде жалғанады және машина білігіне бекітілген, бірақ одан оқшауланған үш контактілі сақинаға қосылады. Сақиналар бойынша қозғалмайтын қылшақ ұстағышта орнатылған қылшақтарды жылжытады. Сақина мен қылшақ арқылы ротор орамасы үш фазалық реостатқа қосылады (8.4-сурет). Реостатты ротор тізбегіне қосу қозғалтқышты іске қосу жағдайын жақсартады – іске қосу тогын азайтып, іске қосатын айналу моментін ұлғайтады, сондай-ақ ротордың айналу жиілігін бірқалыпты реттеуге мүмкіндік береді.



8.4-сурет



8.5-сурет



8.6-сурет

8.5, *a* және *б* суреттерінде қысқа тұйықталған орамалы роторы және фазалық роторы бар асинхронды машиналардың шартты белгілері келтірілген.

Статор өзекшесімен бекітілген, бірақ орамасыз асинхронды машина корпусының жалпы көрінісі 8.6-суретте келтірілген.

8.3. ҮШ ФАЗАЛЫҚ АСИНХРОНДЫ МАШИНАНЫҢ ЖҰМЫС РЕЖИМІ

Үш фазалық асинхронды машинаның жұмыс режимі статор мен ротор орамаларындағы токтардың өзара электрмагниттік әрекеттесуімен анықталады.

Статор фазаларының орамаларындағы токтармен жасалатын айналмалы магнит өрісінің ротор орамасындағы токтармен өзара әрекеттесуі роторды өрістің айналу бағыты бойынша айналуға мәжбүр етеді. Алайда ротор неғұрлым тез айналса, оның орамасында индукцияланатын ЭҚК, сәйкесінше, токтар соғұрлым аз болады. Егер статор өрісінің айналу жиілігі n_1 , ал ротордың айналу жиілігі n болса, онда асинхронды машинаның жұмысын *жылжумен* сипаттауға болады:

$$s = (n_1 - n) / n_1 \quad (8.2)$$

немесе

$$n = n_1 - n_1 s.$$

8.7-суретте (8.2) бойынша сызықтық сипаттама $n(s)$ құрылған. Жылжу мәніне s байланысты үш фазалық асинхронды машина қозғалтқыш, генератор не электрмагниттік тежеуіш режимінде жұмыс істейді.

Қозғалтқыш режимінде ($0 < s < 1$) үш фазалық асинхронды машина электр энергиясын механикалық энергияға айналдырады.



8.7-сурет

Қозғалтқыш роторы магнит өрісінің айналу бағытында өрістің айналу жиілігіне қарағанда аз жиілікпен айналады. Бұл ретте ротор орамасындағы токтар статор орамасындағы токтармен жасалатын айналмалы магнит өрісімен өзара әрекеттесіп, үйкеліс күшінің тежеуіш моменті мен білікке механикалық жүктемені теңестіретін айналу моментін тудырады.

Генератор режимінде ($s < 0$) үш фазалық асинхронды машина механикалық энергияны электрлік энергияға айналдырады. Генератор роторы статордың орамдарындағы токтармен жасалатын магнит өрісінің айналу бағытында өрістің айналу жиілігіне қарағанда көп жиілікпен айналады.

Электрмагниттік тежеуіш режимінде ($s > 1$) үш фазалық асинхронды машинаның роторы статор орамдарында жасалатын магнит өрісінің айналу бағытына қарама-қарсы бағытта айналады. Бұл ретте машинада орамалар мен магниттік сымда гистерезис пен құйынды токтарға біраз энергия таралады.

Асинхронды машиналар көбінесе қозғалтқыштар ретінде қолданылатындықтан, бұдан әрі олардың жұмысын талдаумен ғана шектелеміз.

8.4. АСИНХРОНДЫ МАШИНА СТАТОРЫНЫҢ АЙНАЛМАЛЫ МАГНИТ ӨРІСІ

Үш фазалық желіге қосылған статор фазалары орамаларының токтары қозғалтқышта *статордың айналмалы магнит өрісін* қоздырады, ол ротор фазаларының орамаларында ЭҚС индуцирлейді. Осы ЭҚК әсерісен туындайтын ротор фазаларының орамаларындағы токтар *ротордың айналмалы магнит өрісін* қоздырады. Осы өрістердің айналу жиілігі мен бағыты бірдей, бұл қозғалтқыштың қорытқы не *жұмыс, айналмалы магнит өрісін* негіздейді.

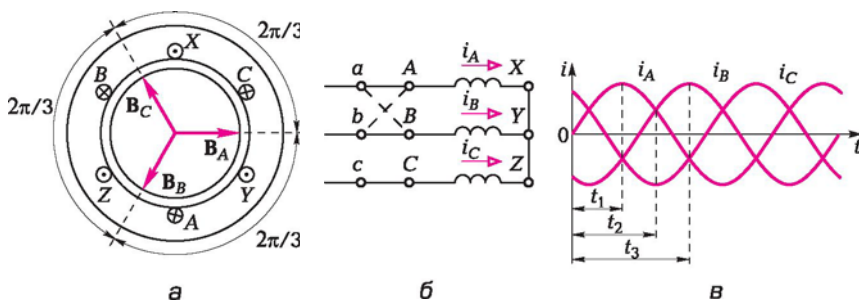
Ротор тізбегі ажыратылған деп шамалап, статордың айналмалы магнит өрісінің сипаттамаларын қарастырайық. Бұл өрістің сипаттамалары қозғалтқыш статорында орамалардың геометриялық орналасуына байланысты болады.

Статордың екі полюсті айналмалы өрісі. Екі полюсті айналмалы магнит өрісін алу үшін үш бірдей ораманы, яғни фазаларды, статорда олардың осьтерінің арасындағы бұрыштар $2/3\pi$ -ге тең болатындай етіп орналастыру қажет. 8.8, *а* суретінде әр фазаның орамалары шартты түрде бір орамды секциялар түрінде көрсетілген және былай белгіленген: *A*, *B*, *C* – ораманың басы, *X*, *Y*, *Z* – ораманың соңы. Егер фаза орамалары жұлдызшамен (8.8-сурет, *б*) (немесе үшбұрыштап) жалғанса және үш фазалық қуаттау желісіне қосылса, онда катушка орамдарындағы токтар (8.8-сурет, *в*) мынаған тең болады:

$$i_A = I_m \sin \omega t; \quad i_B = I_m \sin \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi \right); \quad i_C = I_m \sin \left(\omega t - \frac{4}{3}\pi \right).$$

Фаза орамаларының токтары магнит өрістер тудырады. 8.8, *а* суретінде қол бұрғы ережесі бойынша (3.23-суретті қараңыз) әр катушкамен уақыт бойынша синусоидальдық өзгеретін, өз осын бойлай жасалатын B_A , B_B , B_C өрістерінің магниттік индукциялары векторларының бағыттары көрсетілген:

$$\left. \begin{aligned} B_A &= B_m \sin \omega t; \\ B_B &= B_m \sin (\omega t - 2/3\pi); \\ B_C &= B_m \sin (\omega t - 3/4\pi). \end{aligned} \right\} \quad (8.3)$$



8.8-сурет

Осы магниттік индукциялар векторларының лездік мәндерінің қосындысы кеңістікте және уақыт бойынша статордың магниттік индукциясын тудырады.

Катушкалардағы токтар ораманың басынан бастап соңына дейін бағытталса, оларды оң деп, ал кері бағытталса сол деп есептейміз.

Статордың магнит өрісінің әртүрлі уақыт тұстарындағы бағытын анықтаймыз.

t_1 уақыт моментінде A фазасындағы ток оң, ал B және C фазаларындағы ток теріс болады (8.8-сурет, в). Бұған 8.9, а суретінде белгіленген катушкалардағы токтардың бағыты сәйкес келеді.

Қол бұрғы ережесі бойынша магнит өрісі сызықтарының бағытын анықтағаннан кейін, статор өрісінде екі полюстің: солтүстік N және оңтүстік S бар екенін көреміз.

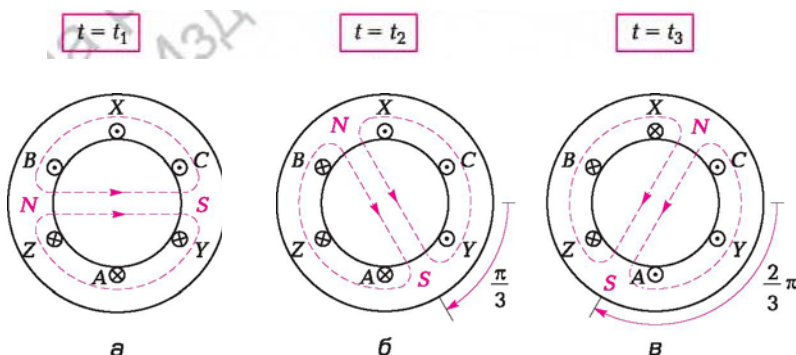
t_2 уақыт моментінде C фазасындағы ток теріс, ал B және A фазаларындағы ток оң болады (8.8-сурет, в). Осы уақыт үшін катушкалардағы токтардың бағыты 8.9, б суретінде көрсетілген.

Магнит өрісінің күш сызықтарының бағытын анықтағаннан кейін, статор өрісінің полюстері бастапқы қалпына қарағанда $\pi/3$ бұрышына жылжығанын көреміз.

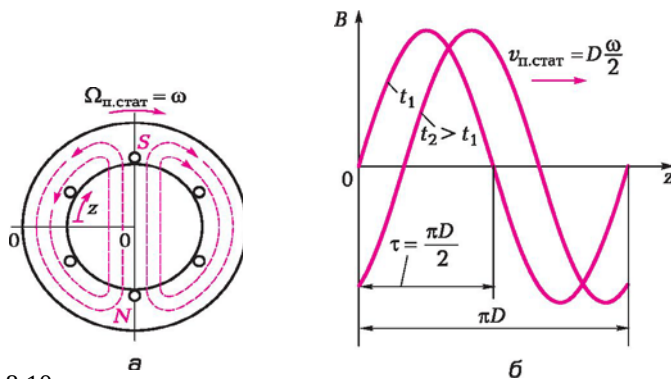
t_3 уақыт моментінде A және C фазаларындағы ток теріс, ал B фазасындағы ток оң болады. 8.9, в суретінде катушкалардағы токтар мен катушка айналасындағы магниттік өрістердің күш сызықтарының бағыты көрсетілген. Статордың магнит өрісі полюстерінің орны өзінің бастапқы орнына қарағанда $2\pi/3$ бұрышына жылжыған.

Одан әрі құрылымды жалғастыратын болсақ, бір кезеңдегі уақытта статор өрісі 2π -ға бұрылатынына көз жеткізуге болады.

Сәйкесінше, статордың екі полюсті магнит өрісі сағат тілінің қозғалу бағыты бойынша статор орамаларындағы токтардың бұрыш-



8.9-сурет



8.10-сурет

тық жиілігіне ω тең $\Omega_{п.стат}$ бұрыштық жылдамдықпен айналады. Өрістің магниттік индукциясының векторы сәйкесінше тогы ең жоғары мәнге жететін фазадағы орама осымен бағыты бойынша сәйкес келеді, яғни өріс статор фазаларының орамаларындағы ток фазаларының реттілік бағытында айналады.

Статордың магнит өрісінің айналу бағытын өзгерту үшін, оның кез келген екі фазасының орамаларын үш фазалық электр энергиясының көзіне қосу тәртібін, мысалы, 8.8, б суретінде көрсетілгендей штрих сызықтармен, өзгерту жеткілікті.

8.10, а суретінде t_1 уақыты үшін екі полюсті асинхронды қозғалтқыш статорының айналмалы магнит өрісінің магниттік сызықтарын кеңістікте бөлу көрінісі келтірілген. Ол осы уақыт үшін және $t_2 > t_1$ уақыты үшін 8.10, б суретінде 0 – 0 сызығынан есептелетін шеңберлерінің бойындағы z қашықтыққа байланысты статор мен ротор арасындағы саңылаудағы B магниттік индукциясының қалыпты құраушысының бөлінуі келтірілген. Саңылауды бойлай магнит өрісі қозғалысының сызықтық жылдамдығы статордың D ішкі диаметрімен анықталады және ол $v_{п.стат} = D\omega/2$ тең. Синусоидалық токтың жиілігі $f = 50$ Гц болғанда, екі полюсті асинхронды машина статорының магнит өрісінің айналу жиілігі $n_1 = f \cdot 60 = 3\,000$ ай/мин болады. Іс жүзінде көбінесе қозғалтқыштардың айналу жиілігі аз болады. Бұған статордың көп полюсті орамаларын қолдану арқылы жетеді.

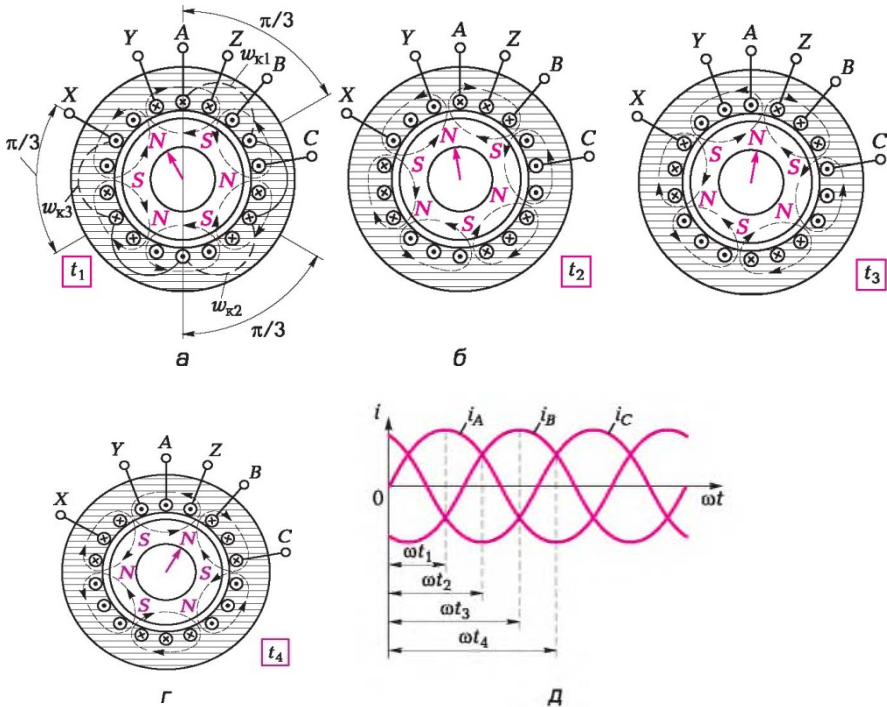
Статордың көп полюсті айналмалы өрісі. Егер көп полюсті айналмалы өрісте p полюстер жұбы болса, онда статордың барлық үш фазасының әрбір орамасы тең бөліктерге, яғни катушка топтарына бөлінуі тиіс (8.1-сурет, б):

$$k = p,$$

$$(8.4)$$

8.11, а суретінде әрбір фазаның орамасы үш бөлікке бөлінетін алты полюсті машина статоры орамасының ($p = 3$) жеңілдетілген схемасы берілген. Әрбір катушка тобы бір орамды секция түрінде бейнеленген, бұл ретте w_{k1} , w_{k2} және w_{k3} катушка топтарын жалғау А фазасы үшін ғана берілген. Мұндай катушка тобының жақтары статор шеңбері бойынша $\pi/p = \pi/3$ бұрышына жылжыған, бұл τ бір полюсті бөлінісіне сәйкес келеді. Статордың магниттік сызықтары бөлу 8.11, а-г суреттерінде $t_1 — t_4$ уақыттарындағы i_A , i_B , i_C ток мәндері үшін бейнеленген (8.11-сурет, д).

t_1 уақыт моментінде А фазасының тогы амплитудалық пәнге ие. Токтардың бағыттарына сәйкес статор өрісінің магниттік сызықтары үш жерде ротор өзекшесіне кіріп, үш жерде одан шығып, сол арқылы үш полюс жұбын тудырады ($p = 3$).



8.11-сурет

Келесі t_2 уақыт моментінде токтардың бағыттары, ал олармен бірге статордың магнит өрісінің бөлінуі сәйкесінше өзгереді және т.б. Статордың магнит өрісі синусоидалық токтың бір кезеңінің уақыт моментінде шеңбердің үштен бір бөлігіне, яғни статордағы фаза орамаларының катушка топтарының алып жатқан доғасына сәйкес келетін қашықтыққа бұрылады. Статор шеңберінің бұл бөлігі статордың айналмалы магнит өрісінің екі полюсіне сәйкес келеді ($2p/3$) және *қосарлы полюсті бөлініс* деп аталады (2τ).

Статордың көп полюсті магнит өрісі p кезеңдері үшін бір толық айналым, секундына — $1/(pT) = f/p$ айналым жасайды, ал оның айналу жиілігі, ай/мин мынаны құрайды:

$$n_1 = f \cdot 60/p. \quad (8.5)$$

8.5. РОТОРДЫҢ АЙНАЛМАЛЫ МАГНИТ ӨРІСІ ЖӘНЕ АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ АЙНАЛМАЛЫ МАГНИТ ӨРІСІ

Қысқа тұйықталған орамалы ротордың орамы N өзектен тұрады. Екі іргелес өзектегі статордың айналмалы магнит өрісімен индукцияланатын ЭҚК арасында фазалардың жылжуы $2\pi p/N$ -ге тең. Қысқа тұйықталған орамалы ротор фазаларының саны өзектердің санына, яғни т.е. $m_2 = N$ тең деп, ал әрбір фазадағы өзекше саны — $w_2 = 1/2$ деп санауға болады.

Осы сияқты фазалық ротордың тізбегі әрбіз фазада w_2 өзекше санымен $m_2 = 3$ үш фаз орамаларын қамтиды. Бұл жерде және бұдан әрі ротор фазасына қатысты барлық шамалар 2 индексмен, ал статор шамасына қатысты барлық шамалар 1 индексмен белгіленеді.

Ротор тізбегі ажыратылған деп есептейік, яғни онда ток жоқ дейік, онда роторға электрмагниттік күштер әсер етпейді және қозғалмайды. Бұл жағдайда қозғалтқыштың магнит өрісі статордың айналмалы магнит өрісі болып есептеледі.

Қозғалмайтын ротор жағдайында оның орамасының орамында индукцияланатын ЭҚК жиілігі статор тізбегіндегі токтардың f жиілігіне тең болады. Егер ротор n_1 жиілігімен айналатын статор өрісінен кейін $n < n_1$ жиілігімен айланса, онда оның орамасының орамдарында индукцияланатын ЭҚК жиілігі азаяды. Бұл f_2 жиілігін (8.5) өрнегінен ондағы n_1 статор өрісінің айналу жиілігін статордың айналмалы магнит өрісі ротор орамаларының орамдарын кесіп өтетін $n_1 - n$ әртүрлі жиіліктерімен алмастыру арқылы анықтауға

болады:

$$f_2 = p (n_1 - n)/60.$$

Егер ротор тізбегі тұйықталған болса, онда ротор фазаларының орамаларындағы токтар статор фазаларының орамаларындағы токтар сияқты айналмалы магнит өрісін қоздыратын болады.

Роторға қатысты бұл өрістің $n_{\text{кат}}$ айналу жиілігі көп полюсті өрістің айналу жиілігінің (8.5) жалпы өрнегімен анықталады:

$$N_{\text{кат}} = f_2 \cdot 60/p.$$

Ротордың өзі n жиілігімен сол бағытта айналатындықтан, оның өрісі кеңістікте мына жиілікпен айналады:

$$n_{\text{кат}} + n = (n_1 - n) + n = n_1,$$

яғни ротор мен статордың өрістері синхронды айналады және бір-біріне қозғалыссыз қалады. Статор мен ротордың айналмалы магнит өрістері жинақталып, асинхронды қозғалтқыштың *айналмалы магниттік жұмыс өрісін* тудырады, ол энергияны бірінші реттік орамадан екінші реттік орамаға беретін трансформатордың магниттік сымындағы синусоидалық магнит өрісі сияқты, статор мен ротор фазалары орамаларының арасындағы байланыстырғыш буын рөлін атқарады.

Бұдан әрі *айналмалы магниттік жұмыс өрісі* терминін қысқартылған күйінде – асинхронды қозғалтқыштың *айналмалы магнит өрісі* деп пайдаланамыз. Дәл осы өрісті статор мен ротор тізбектеріндегі есептеулерде ескеру қажет.

Асинхронды қозғалтқыш жұмысының бірнеше режимдері бар:

- *номиналды режим*, $U = U_{1\text{ном}}$ номиналды кернеуінде және $I_1 = I_{1\text{ном}}$ қуаттау желісінің тогында $s = s_{1\text{ном}}$ ротордың номиналды жылжуына сәйкес келеді;
- *жұмыс режимі*, бұл кезде қуаттау желісінің кернеуі номиналды мәнге жақын не тең болады, $U_1 \approx U_{\text{ном}}$, ал қозғалтқыштың жүктемесі $s \leq s_{\text{ном}}$ жылжуында және $I_1 \leq I_{1\text{ном}}$ тогында біліктің тежеуіш моментімен анықталады;
- *қозғалтқышты іске қосу режимі*, қуаттау желісінің кернеуін қосқан кезде және $s = 1$ болғанда ротор қозғалыссыз болғанда туындайды.

Үш фазалық асинхронды қозғалтқыштың кешенді қуаты мына формула бойынша анықталады:

$$\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 + j \cdot 3U_1 I_1 \sin \varphi_1,$$

мұндағы P_1 және Q_1 — қозғалтқыштың активті және реактивті қуаты.

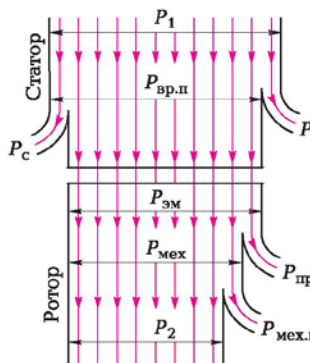
Қозғалтқыштың активті қуаты P_1 қозғалтқышта үш фазалық желіден алынатын электрлік энергияны механикалық, жылулық және басқа да энергияларға қайтымсыз түрлендіретін орта қуатқа тең, ал реактивті қуат Q_1 — қозғалтқыштың көзі мен магнит өрісінің арасындағы энергия алмасудың ең жоғары қуатына (4.38-сурет) тең (4.14-бөлімшені қараңыз).

Қозғалтқыштың активті қуаты және ПӘК. Қозғалтқыштағы энергияның қайтымсыз айналу диаграммасы 8.12-суретте көрсетілген, ондағы P_1 — қозғалтқыштың желіден энергия тұтыну қуаты; $P_{\text{пр1}}$ — статор орамасының сымдарын жылытуға кететін шығын қуаты; $P_{\text{ай.л}}$ — айналмалы магнит өрісінің қуаты; P_c — статор өзекшесінің болатындағы гистерезис пен құйынды токтарға шығын қуаты (айналмалы магнит өрісі тұйықталатын ротор өзекшесіндегі шығын қуаты, практикалық мәні жоқ, себебі ротор тізбегіндегі токтың f_2 жиілігі аз (1-3 Гц), ал гистерезис пен құйынды токтарға шығын қуаты мардымсыз); $P_{\text{эм}} = P_{\text{ай.л}} - P_c$ — ротордың электрмагниттік қуаты; $P_{\text{пр2}}$ — ротор орамасының сымдарын жылытуға кететін шығын қуаты; $P_{\text{мех}} = P_1 - P_{\text{пр1}} - P_c - P_{\text{пр2}}$ — ротордың механикалық қуаты; $P_{\text{мех.п}}$ — қозғалтқыштағы механикалық шығындардың қуаты; $P_2 = P_{\text{мех}} - P_{\text{мех.п}}$ — қозғалтқыш білігіндегі пайдалы механикалық қуат.

Қозғалтқыш білігіндегі P_2 пайдалы механикалық қуатының желіден энергия тұтынатын P_1 активті қуатына қатынасын асинхронды қозғалтқыштың ПӘК-і анықтайды:

$$\eta = (P_2/P_1)100 \, \%.$$

Заманауи үш фазалық асинхронды қозғалтқыштардың ПӘК-і номиналды жұмыс режимінде 80—95%-ды құрайды.



8.12-сурет

Қозғалтқыштың реактивті қуаты және қуат коэффициенті.
 Q_1 реактивті қуаты қозғалтқыштың магнит өрісі мен көз арасындағы қайтымды энергия алмасу процесін сипаттайды.

Асинхронды қозғалтқыштарды жобалау және пайдалану кезінде активті және реактивті қуаттардың арасындағы арақатынасты есептейді, ол *қуат коэффициенті* деп аталады:

$$\cos\varphi = P_1 / \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}. \quad (8.6)$$

Статор фазаларының орама шықпаларының арасында тұрақты U_1 кернеуінде және $I_1 \leq I_{1\text{ном}}$ тогында қозғалтқыштың айналмалы өрісінің магниттік ағыны да $\Phi_{\text{май}}$ тұрақты болады (3.20) және оның жүктемесіне байланысты болмайды. Бұл дегеніміз асинхронды қозғалтқыштың магнит өрісінде қорланатын реактивті қуат пен энергияның да тұрақты болатынын және оның жүктемесіне байланысты болмайтынын білдіреді.

Алайда жүктеме артқан сайын қозғалтқыштың активті қуаты мен қозғалтқыштың қуат коэффициенті ұлғаяды. Егер қозғалтқыш білігінде жүктеме жоқ кезде асинхронды қозғалтқыштың қуат коэффициенті 0,1-0,15-ке тең болса, онда номиналды жүктеме кезінде қуат коэффициенті 0,8-0,95-ке жетеді.

8.7. АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ АЙНАЛУ МОМЕНТІ ЖӘНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ СИПАТТАМАСЫ

Қозғалтқыштың айналмалы магнит өрісі ротор орамасының өткізгіштеріндегі токтармен өзара әрекеттескен кезде асинхронды қозғалтқыштың $\Phi_{\text{май}}$ магниттік ағынға және I_2 ротор орамасының өткізгіштеріндегі токқа тәуелді болатын айналу моментін тудыратын электрмагниттік күштер туындайды. Айналу қуаты қозғалтқыштың активті қуатымен анықталатынын ескере отырып, айналу моменті үшін былай жазуға болады:

$$M_{\text{ай}} = c_k \Phi_{\text{май}} I_2 \cos \varphi_2, \quad (8.7)$$

мұндағы c_k — берілген қозғалтқыш үшін тұрақты шама; φ_2 — ротор орамасындағы ЭҚК пен ток арасындағы жылжу бұрышы; $\cos \varphi_2$ — ротор фазасының қуат коэффициенті.

Қозғалтқыштың *айналу моменті* айналмалы өрістің магнит өрісі мен ротор фазасының орамасындағы токтың активті құрауышының

көбейтіндісіне тең.

Қозғалтқыштың тұрақты жұмысы үшін айналу және тежеу моменттерінің тепе-теңдігінің автоматты түрде орнатылуы маңызды болмақ. Асинхронды қозғалтқышта бұл тепе-теңдік былай жүзеге асырылады: біліктегі жүктеме ұлғайған кезде тежеу моменті айналу моментінен көбірек болады, оның салдарынан ротордың айналу жиілігі азаяды, яғни жылжу ұлғаяды. Бұл айналу моментінің ұлғаюына әкеледі, ал моменттердің тепе-теңдігі үлкен жылжу жағдайында қалпына келеді. Алайда айналу моментінің жылжуға тәуелділігі айтарлықтай күрделі, себебі айналу моментінің (8.7) тендеуінде оған I_2 , $\Phi_{\text{т.ай}}$ және $\cos \varphi_2$ шамалары тәуелді.

Ротор фазасының I_2 тогы жылжу ұлғайған сайын жылжуға пропорционал ЭҚК E_2 ұлғаю салдарынан ұлғаяды. Әуелі, ротор фазасы орамасының индуктивті сөйліс кедергісі $s\Phi L_{\text{шам2}}$ оның активті $R_{\text{в2}}$ кедергісімен салыстырғанда аз болады, ток мәні жылжу ұлғайған кезде тез ұлғаяды, одан кейін $s\Phi L_{\text{шам2}} \geq R_{\text{в2}}$ болғанда баяу ұлғаяды.

Ротор тізбегінің қуат коэффициенті:

$$\cos \varphi_2 = R_{\text{в2}} / \sqrt{R_{\text{в2}}^2 + (s\Phi L_{\text{шам2}})^2}$$

жылжудың ұлғаю салдарынан әуелі баяу, одан кейін тез азаяды.

Қозғалтқыштың $\Phi_{\text{май}}$ магниттік ағыны аз деңгейде болса да, жылжуға тәуелді болады. Жылжу ұлғайған сайын, статор фазасының тогы ұлғаяды, сәйкесінше ЭҚК азаяды (7.10):

$$E_1 = U_1 - Z_{\text{об1}} i_1$$

және оған пропорционал магниттік ағын да азаяды (7.11-сурет):

$$\Phi_{\text{т.ай}} = E_1 / 4,44 f w_1.$$

I_2 , Φ_m және $\cos \varphi_2$ шамалары жылжуға әрқалай байланысты болады: олардың бірі (I_2) жылжу ұлғайған сайын ұлғаяды, қалған екеуі ($\Phi_{\text{т.ай}}$ және $\cos \varphi_2$) азаяды. Сәйкесінше, *сыни жылжу* $s_{\text{кр}}$ деп аталатын жылжудың белгілі бір мәніне айналу моментінің ең жоғары мәні сәйкес келуі тиіс.

Әдетте, қозғалтқыштың ең жоғары айналу моменті жоғары қуатты қозғалтқыштарда біраз жылжуға, шамамен 0,4-ке және төмен қуатты қозғалтқыштарда 0,14-ке сәйкес келеді.

Айналу моментінің жылжуға тән тәуелділігінің графигі $M_{\text{ай}}(s)$ (8.13-сурет) қозғалтқыштың тұрақты $0 < s < s_{\text{кр}}$ және тұрақсыз $s_{\text{кр}} < s < 1$ жұмыс облысына бөлінеді.

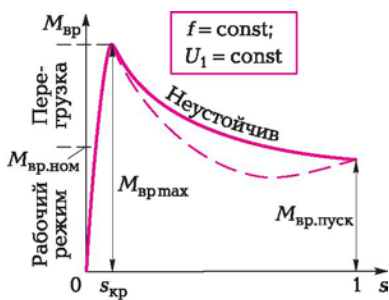


Рис. 8.13

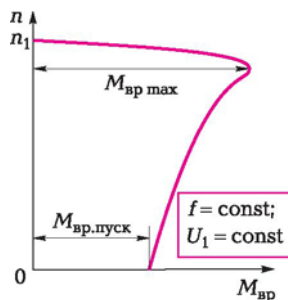


Рис. 8.14

8.13-сурет: Рабочий режим – жұмыс режимі; Перегрузка – артық жүктеме; Неустойчив – тұрақсыз

8.14-сурет.

Тұрақты жұмыс облысында қозғалтқыш білігіндегі тежеу моментінің ұлғаюы (азаюы) жылжудың ұлғаюына (азаюына) және сонымен қатар айналу моментінің ұлғаюына (азаюына) әкеледі. Өтпелі процесс нәтижесінде моменттердің тепе-теңдігі жылжу мәні жаңа болған кезде қалпына келеді.

Қозғалтқыштың *тұрақсыз* жұмыс облысында біліктегі тежеу моментінің ұлғаюы жылжудың ұлғаюына және сонымен қатар айналу моментінің азаюына әкеледі, бұл жылжуды одан сайын ұлғайтып, қозғалтқыштың тоқтап қалуына әкелуі мүмкін ($s = 1$).

Ең жоғары айналу моменті асинхронды қозғалтқыштың артық жүктелу қабілетін анықтайды. Оның типтік мәні номиналды мәнен 2-2,5 есеге үлкен. Айналу моменті ротор тізбегінің активті кедергісіне тәуелді емес, сонымен бірге сыни жылжу $s_{кр}$ активті кедергіге пропорционал болады. Сәйкесінше, ротор тізбегінің активті кедергісінің ұлғаюы ең жоғары айналу моментін өзгертпестен, сыни жылжудың ұлғаюына әкеледі. Бұл фазалық роторы бар қозғалтқышты іске қосу жағдайларын жақсарту үшін пайдаланылады.

Ең жоғары айналу моменті U_1^2 пропорционал болады, бұл асинхронды қозғалтқышты қуаттау желісінің кернеуінің төмендеуіне сезімтал етеді.

Кейбір асинхронды қозғалтқыштарда $M_{ай}(s)$ тәуелділігі $s_{кр} < s < 1$ бөлігінде төмендейді (8.13-суретте штрих сызықпен көрсетілген, бұл тісшелі өрістердің жоғары үйлесімді құраушыларымен туындайды.

Асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы $n(M_{\text{ай}})$ 8.14-суретте келтірілген. Айалу моментінің мәндері $0 < M_{\text{ай}} < M_{\text{ай.мах}}$ болған кезде асинхронды қозғалтқыш роторының айалу жиілігі болар-болмас өзгереді. Сәйкесінше, асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы қатаң болады.

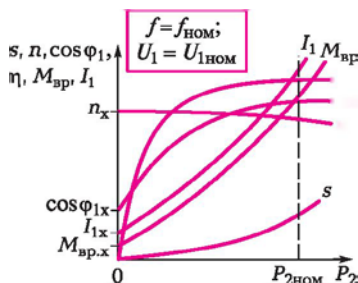
8.8. АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ ЖҰМЫС СИПАТТАМАЛАРЫ

Жұмыс сипаттамалары n деп айалу жиілігінің, $M_{\text{ай}}$ айалу моментінің, $\cos\varphi_1$ қуат коэффициентінің және қозғалтқыш η ПӘК-н білігіндегі P_2 пайдалы механикалық қуатқа тәуелділігін айтады (8.15-сурет). Жұмыс сипаттамалары қуаттау желісі f жиілігінің және статор фазалары шықпаларының арасындағы кернеудің $U_1 = U_{1\text{ном}}$ номиналды мәндерінде алынады.

Қуаттардың мәні $P_2 \approx P_{\text{мех}} = M_{\text{ай}}\Omega_p$ болғандықтан, жылдамдық сипаттамасы деп аталатын $n(P_2)$ тәуелділік қозғалтқыштың $n(M_{\text{ай}})$ механикалық сипаттамасынан аса өзгешеленбейді (8.14-сурет). Ол қатаң деп аталуы мүмкін, бұл ретте жылжу $s(P_2) = (n_x - n)/n_x$.

Қозғалтқыш тудыратын $M_{\text{ай}}$ айалу моменті қозғалтқыш білігіндегі жүктемеден асатын $M_{\text{ай2}} = P_2/\Omega_p$ пайдалы моментінен және $M_{\text{ай.б}}$ бос жүріс моментінен тұрады, ол қозғалтқыштағы механикалық шығындармен анықталады және оның жүктемесіне тәуелді болмайды.

$M_{\text{ай}}(P_2)$ тәуелділігінің сызықсыздығы P_2 қуаты ұлғайған сайын ротордың айалу жиілігінің азаюымен түсіндіріледі. $I_1(P_2)$ тәуелділігі де осыған ұқсайды. $\cos\varphi_1(P_2)$ тәуелділігінің сызықсыздығы қозғалтқыш тогының активті құрауышының оның механикалық жүктемесіне пропорционал болуымен, ал реактивті индуктивті құраушының оған мүлдем тәуелді болмауымен түсіндіріледі.



8.15-сурет

Асинхронды қозғалтқыштардың толық емес жүктелуі — өнеркәсіптік кәсіпорындардың қуат коэффициентінің ($\cos\varphi$) аз мәнінің басты себептерінің бірі. Қуат коэффициентін арттырудың табиғи жолы асинхронды қозғалтқыштарды толығымен жүктеу және жоғары қуатты қозғалтқыштарды пайдалану болып табылады. Қозғалтқыштың магниттену тогы оның магниттік тізбегінің басым бөлігін статор мен ротордың арасындағы ауа саңылауының кедергісі құрайтын магниттік кедергісіне кері пропорционал. Қозғалтқыштың номиналды қуаты ұлғайған сайын, ауа саңылауының биіктігі де ұлғаяды, бірақ салыстырмалы түрде баяу болады. Сондықтан қозғалтқыштың номиналды қуаты ұлғайған сайын оның қуат коэффициенті $\cos\varphi_1$ ұлғаяды. Қозғалтқыштың номиналды айналу жиілігі азайған сайын, оның магниттену тогы және ол қоздыратын магниттік ағын ұлғаяды, себебі айналу жиілігі аз болған кезде статор фазасының орамасында индукцияланатын ЭҚК азаяды. Сәйкесінше, жай жүрісті қозғалтқыштарда магниттену тогы көбірек, ал қуат коэффициенті азырақ болады.

Асинхронды қозғалтқыштың пайдалы әсер коэффициенті оның білігінің P_2 пайдалы қуатының $P_1 = P_2 + P_{\text{тұт}}$ желіден энергия тұтыну қуатына арақатынасымен анықтайды:

$$\eta = (P_2/P_1)100 \%,$$

мұндағы $P_{\text{тұт}}$ — қозғалтқыштағы барлық шығын түрлерінің қуаты.

8.1-кесте. АИ сериясындағы асинхронды қозғалтқыштар параметрлерінің типтік мәндері

Параметрлер	Полкостер саны			
	2p = 2	2p = 4	2p = 6	2p = 8
Қуат, кВт	0,04—315	0,025—315	0,18—200	0,25—160
ПӘК, %	45—93	42—94,5	56—94	56—94
$\cos\varphi_1$	0,70—0,91	0,60—0,90	0,62—0,90	0,65—0,85
$M_{\text{ай.іск}} / M_{\text{ай. ном}}$	1,90—0,75	2,00—0,75	1,70—0,75	1,50—0,75
$M_{\text{ай. max}} / M_{\text{ай. ном}}$	2,0—1,6	2,0—1,6	1,7—1,6	1,6—1,6

Тұрақты және айнымалы, яғни қозғалтқыш жүктемесіне тәуелді емес және тәуелді шығын қуатының құрауыштары бар.

Тұрақты шығындар қуаты гистериз бен құйынды токтарға статор өзекшесіндегі шығын қуаты мен механикалық шығын қуатының қосындысына тең.

Айнымалы шығындар қуаты статор мен ротор орамасының сымдарын жылытуға кететін шығын қуатына тең:

$$P_{np1} = 3R_B I_1^2, P_{np2} = m_2 R_B I_1^2$$

Қозғалтқыш ПЭК-ң ең жоғары мәні 65-95%.

8.1-кестеде АИ сериясының асинхронды қозғалтқыштарының кейбір параметрлерінің номиналды қуаттағы типтік мәндері келтірілген.

8.9.

АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫ ІСКЕ ҚОСУ

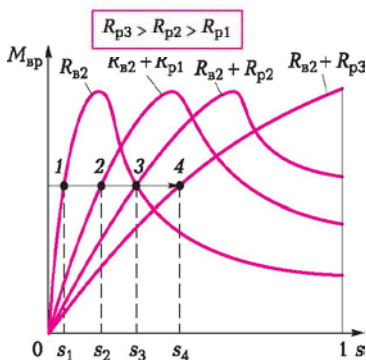
Асинхронды қозғалтқыштар үшін олардың іске қосу қасиеттері маңызды практикалық мәнге ие, олар: $I_{іск}$ іске қосу тогымен және $M_{іск ай}$ бастапқы іске қосатын айналу моментімен, іске қосу процесінің бірқалыптығымен және үнемділігімен, іске қосу ұзақтығымен сипатталады. Каталогтарда шаманың іске қосу мәнінің номиналды мәнге қатынасы («еселік») көрсетіледі ($I_{іск}/I_{ном}$ және $M_{іск ай}/M_{ном. ай}$).

Асинхронды қозғалтқыштың іске қосу қасиеттері оның конструкциясына, сонымен қатар ротордың құрылысына байланысты болады.

Фазалық роторлы асинхронды қозғалтқыштарды іске қосу. Фазалық роторлы асинхронды қозғалтқыштарды іске қосу шарттарын іске қосу реостатын пайдалану (8.4-суретті қараңыз) пайдалану арқылы жақсартуға болады. Іске қосу реостатын қолдану бастапқы іске қосушы айналу моментін ұлғайтып, іске қосу тогын азайтуға мүмкіндік береді.

Ротор тізбегіне қосымша резисторларды қосу $M_{ай}$ айналу моментінің s жылжуға тәуелділігінің сипатын өзгертеді. Бұл ретте $M_{max, ай}$ максималды айналу моментінің мәні ротор тізбегінің активті кедергісінің мәніне тәуелді болмайды, ал оның ұлғаюы (азаяуы) тек s_c сыни жылжу мәнінің ұлғаюына (азаяуына) әкеледі (8.16-сурет).

Ротор айнала бастаған бетте, жылжу, сонымен бірге ЭҚК және ротор фазасының токтары, сәйкесінше айналу моменті азаяды. Қозғалтқыш максималды моментке жақын айналу моментін өрбітуді жалғастыруы үшін, іске қосу реостатының кедергісін біртіндеп азай-



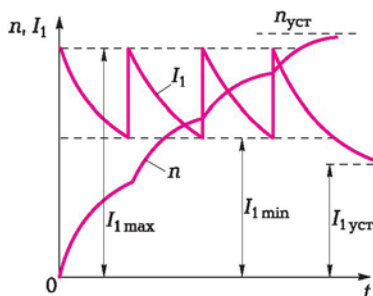
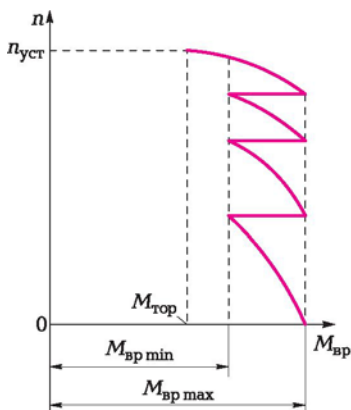
8.16-сурет

ту қажет. Сол кезде ғана қозғалтқыш номиналды жиілікке жақын айналу жиілігіне жетіп, іске қосу реостаты қысқа тұйықталады. Әдетте, іске қосу реостатының кедергісін өзгерту сатылап жүзеге асырылады, сондықтан асинхронды қозғалтқышты іске қосқан кезде оның айналу моменті мен тогы сатылап өзгереді (8.17-сурет, а және б).

Іске қосу реостаты іске қосу кезінде қызып кетпеу үшін, оның қуаты шамамен қозғалтқыштың қуатына теңестірілуі тиіс. Жоғары қуатты қозғалтқыштар үшін майлы салқындатылған іске қосу реостаттарын қолданады, басқа жағдайларда сулы реостаттарды қолданады.

Фазалық роторды іске қосу реостатымен бірге қолдану сонымен қатар асинхронды қозғалтқыш құнының ұлғаюына, қызмет көрсетудің қиындауына және ПӘК-ң төмендеуіне әкеледі. Сондықтан фазалық ротор қуаты 10 кВт-тан жоғары қозғалтқыштарда қолданылады.

Қысқа тұйықталған орамалы роторы бар асинхронды қозғалтқышты іске қосу. Көп жағдайда қысқа тұйықталған орамалы роторы бар қозғалтқышты тікелей іске қосу қолданылады.



8.17-сурет

Ол айырғы, магниттік іске қосқыш, контактор не майлы ажыратқыш (жоғары кернеулі қозғалтқыш үшін) сияқты электрлік басқару аппараттарының көмегімен жүзеге асырылады. Типтік еселік мәні 5,5-7 болған кезде іске қосу тогы қозғалтқыш үшін қауіпсіз, бірақ желіде кернеудің азаюына әкеліп, басқа тұтынушылардың жұмысына теріс әсер етуі мүмкін. Сондықтан төмен қуатты желілерде қуаты 100 кВт-қа дейінгі қозғалтқыштарды тікелей іске қосуға рұқсат етіледі.

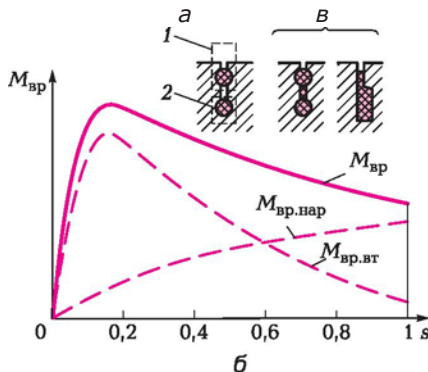
Қысқа тұйықталған орамалы роторы бар асинхронды қозғалтқыштарда іске қосу тогы үлкен болған жағдайда іске қосу моментінің еселігі үлкен болмайтынын назарға алған жөн: 1-2 (8.13-сурет).

Іске қосу тоны азайту үшін қозғалтқышты іске қосу кезінде статор фазалары орамаларының шықпалары арасындағы кернеуді, олармен біртіндеп үш фазалық индуктивтілік катушкасын қосу немесе оларды үшбұрыш схемасынан жұлдызша схемасына ауыстыру арқылы азайтуға болады (6.5-бөлімшені қараңыз). Алайда бұл ретте сонымен қатар кернеу шаршысына пропорционал бастапқы іске қосу моментінің мәні азаяды. Сондықтан мұндай іске қосу қуатты шағын (20 кВт дейін) қысқа тұйықталған орамалы роторы бар асинхронды қозғалтқыштар үшін ғана қолданылады.

Қысқа тұйықталған орамалы роторы бар асинхронды қозғалтқышты іске қосу жағдайын ротор орамасын қосарлы цилиндрлік тор (қосарлы тиін дөңгелегі) түрінде пайдаланған жағдайда жақсартуға болады. Мұндай ротордың бірі екіншісінің ішінде орналасқан екі торы болады: сыртқы – іске қосу және ішкі – жұмыс. Ішкі тордың өзектері мыстан, сыртқы тордың өзектері меншікті кедергісі жоғары марганецті жезден жасалады. Сонымен қатар, ішкі тор өзегінің көлденең қимасының ауданы үлкенірек болады, сондықтан сыртқы тор өзегінің активті кедергісі ішкіге қарағанда 4-5 есеге жоғары болады. Екі тордың да шет жақтарында тұйықтаушы сақиналары болады.

Торлардың өзектері ойықтың сыртқы және ішкі бөліктерінде орналасқан.

Мұндай орналасу жағдайында сыртқы (ішкі) өзектің сейілу өрісінің магниттік сызықтары ауада көп (аз) жол жүреді (8.18-сурет, *a*, *1* және 2-сызықтар), сондықтан ротор фазасының сыртқы орамасының сейілу индуктивтілігі $L_{\text{сыр. сей.}}$ және оның индуктивті сейілу кедергісі $X_{\text{сыр. сей.}} = s f L_{\text{сыр. сей.}}$ ротор фазасының ішкі орамасы үшін аттас $L_{\text{іш. сей.}}$ және $X_{\text{іш. сей.}}$ шамаларына қарағанда азырақ мәндерге ие, яғни $X_{\text{сыр. сей.}} \gg X_{\text{іш. сей.}}$



8.18-сурет

Қозғалтқышты іске қосу уақытының алғашқы кезінде ($s = 1$) ротор фазасының ішкі орамасының үлкен индуктивті кедергісі тоқты ішкі тор өзегінен сыртқы тор өзегіне ығыстырады. Бұл ретте бастапқы іске қосу моменті ұлғаяды, себебі сыртқы тор өзегінің активті кедергісі үлкен болады, бұл фазалық роторлы асинхронды қозғалтқышты іске қосу реостатын қосқанға ұқсайды.

Ротордың айналу жиілігінің ұлғаю шамасына қарай оның орамасының фазаларындағы токтардың жиілігі, сәйкесінше, олардың индуктивті сейілу жиілігі азаяды. Ротордың айналу жиілігі номиналды болған кезде токтардың жиілігі аз болады (2-3 Гц), сәйкесінше, индуктивті $X_{\text{іш.сей}}$ және $X_{\text{сыр.сей}}$ сейілу кедергілері де аз болады; тор өзектерінің арасында токтардың орналасуы олардың активті кедергілерінің арақатынасымен анықталады. Сондықтан сыртқы тордың өзектеріндегі ток ішкі тордың өзектеріндегі токтан аз болады, олардың активті және толық кедергілері де бұл жағдайда аз болады.

Қосарлы цилиндрлік тор түріндегі ротор орамасы бар қозғалтқыштың $M_{\text{ай}}(s)$ тәуелділігін ротор фазалары орамаларының үлкен және кіші активті кедергілері бар екі қозғалтқыштың сипаттамаларының қосындысы ретінде қарастыруға болады (8.18-сурет, б – штрих сызықтар).

Кей конструкцияларда екі тор да ротор ойықтарын тікелей балқытылған алюминий құю арқылы дайындалады (8.18-сурет, в). Бұл ретте алюминий жоғарғы және төменгі торлар өзектерінің арасындағы саңылауды толтырып, фасонды қима өзегін жасайды.

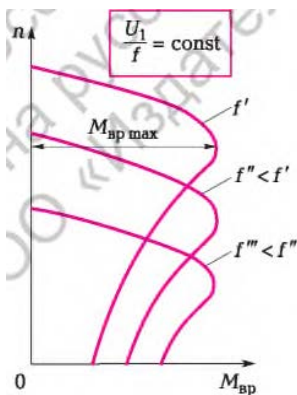
Қысқа тұйықталған орамалы роторы бар асинхронды қозғалтқыштардың айналу жиілігін реттеу үшін жиілікті реттеу әдісі және айналмалы магнит өрісі полюстері жұптарының санын өзгерту арқылы реттеу әдісі қолданылады.

Фазалық роторлы асинхронды қозғалтқыштардың айналу жиілігін реттеу үшін реостатты реттеу әдісі қолданылады.

Жиілікті реттеу. Асинхронды қозғалтқыштың айналу жиілігін реттеудің бұл әдісі статор фазаларының орамаларындағы токтардың жиілігін өзгерту арқылы магнит өрісінің айналу *жиілігін реттеуден* (8.5) тұрады. Алайда токтардың жиіліктерін реттеген кезде және максималды айналу моментінің мәнін өзгеріссіз қалдырған кезде (8.13-суретті қараңыз) статор фазалары шықпаларының арасындағы кернеуді қатар реттеу қажет.

Токтың (f) жиілігі өзгерген жағдайда максималды айналу моментінің мәні тұрақты болады, ал қозғалтқыштың механикалық сипаттамасы $U_1/f = \text{const}$ шарты орындалған жағдайда қатаң болады. Сонымен бірге қозғалтқыштың қуаты ток жиілігіне пропорционал өзгереді: $P_2 = M_{\text{ай}} \Omega_p$

Полюс жұптарының санын өзгерту арқылы реттеу. Қуаттау желісінің тұрақты жиілігі мен кернеуінде асинхронды қозғалтқыштың магнит өрісінің айналу жиілігінің полюс жұптарының санына p тәуелділігі (8.5) формула бойынша анықталады.



8.19-сурет

Двигатель - Қозғалтқыш
8.20-сурет



8.21-сурет.

Двигатель – қозғалтқыш;
Генератор - генератор

Егер статорда екі бөлек орама – p жұбын құрайтын бір орама және p' полюстер жұбын құрайтын екінші орама орналастырылса, онда желіге бірінші не екінші орама қосу арқылы, магнит өрісінің айналу жиілігін салыстырмалы түрде өзгерте аламыз:

$$n_1/n'_1 = p'/p.$$

Сәйкесінше қозғалтқыш роторының айналу жиіліктері де өзгешеленеді. Бұл ретте қозғалтқыш роторының орамасы тиін дөңгелегі түрінде қысқа тұйықталуы тиіс (8.3-сурет, б).

Полнос жұптарының санын өзгерту арқылы реттеу магнит өрісінің айналу жиілігінің секіріс тәрізді өзгеруіне әкеледі, бұл электр жетегінің механикалық жүйесінің инерциясына байланысты өтпелі процеспен қатар жүреді. Осы өтпелі процесті көрнекі етіп көрсету үшін, асинхронды машинаның екі механикалық сипаттамасын құрастырамыз – p полюс жұптарындағы және $p' = 2p$ жұптарындағы. Қозғалтқыш білігіндегі тежеу моменті магнит өрісінің жиілігі өзгерген кезде тұрақты болып қалады дейік. p' полюс жұптарынан p жұптарына өткен кезде (8.20-сурет) магнит өрісінің айналу жиілігі ұлғаяды, қозғалтқыш әуелі іске қосуға жақын жағдайда болады, ток секірісі орын алады. p полюс жұптарынан p' жұптарына өткен кезде (8.21-сурет) магнит өрісінің айналу жиілігі азаяды, машина әуелі генератор режимінде болады және желіге энергия бере отырып жұмыс жасайды. Мұндай режим кейде электр жетегін тез әрі үнемді тежеу үшін пайдаланылады.

Екі бөлек орама төмен қуатты қозғалтқыштардың статорларында орналастырылады. Жоғары қуатты қозғалтқыштарда әдетте 1:2 қатынасымен полюстер жұптарының әртүрлі санын алу үшін статор фазалары орамаларының катушка топтарын ауыстыру үшін пайдаланылады.

Өрқайсысы полюстер жұптарының саны 1:2 қатынасында өшіріп-қосылатын статордағы екі тәуелсіз орамасы бар асинхронды қозғалтқыштың айналу жиілігінің төрт сатысы болады, мысалы 3000, 1500, 1000 және 750 ай/мин.

Реостатты реттеу. Айналу жиілігін реостатты реттеу әдісі фазалық роторлы үш фазалық асинхронды қозғалтқыштарда қолданылады. Бұл ретте магнит өрісінің айналу жиілігі тұрақты болып қалады. Бұған іске қосу реостатына қарағанда тоқты қысқа

емес, ұзақ жүктеуге есептелетін қозғалтқышты іске қосқандағы сияқты (8.4-суретті қараңыз), ротор фазалары ормаларының тізбегіне үш фазалық реостатты қосу арқылы жетеді. Ротор тізбегінің активті реостатының өзгеруі қозғалтқыштың $M_{\text{ай}}(s)$ сипаттамасына және біліктегі берілген тежеу моментіндегі жұмыс нүктесінің орнына әсер етеді. Мысалы, реостат кедергісі ұлғайған кезде ($R_{p1} < R_{p2} < R_{p3}$) және біліктегі тежеу моменті тұрақты болған кезде жұмыс нүкте орнының өзгеруі (8.16-суретті қараңыз, 1-4-нүктелер) жылжудың ұлғаюымен, яғни ротордың айналу жиілігінің азаюымен қатар жүреді.

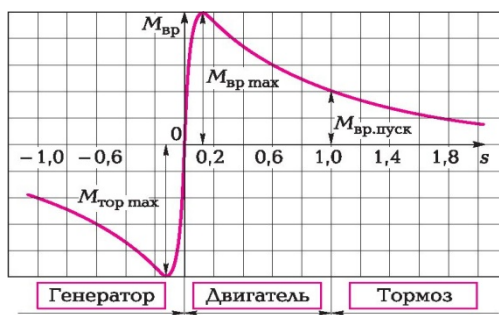
Реостатты реттеу әдісінің кемшілігі энергияның көп шығыны болып табылады.

8.11. ҮШ ФАЗАЛЫҚ МАШИНАНЫҢ ГЕНЕРАТОР ЖӘНЕ ЭЛЕКТРМАГНИТТІК ТЕЖЕУІШ РЕЖИМДЕРІНДЕГІ ЖҰМЫСЫ

Үш фазалық асинхронды машинаның қозғалтқыш, генератор және электрмагниттік тежеуіш режимдеріндегі жұмысын (8.3-бөлімшені қараңыз) 8.22-суретте берілген $M_{\text{ай}}(s)$ әмбебап сипаттамасы көрсетеді.

Қозғалтқыштың режимі жоғарыда толығырақ қаралған болатын, бұл бөлімшеде генератор және электрмагниттік тежеуіш режимдеріне тоқталамыз.

Генератор режимі. Асинхронды генератордың жұмысы үшін ($s < 0$), асинхронды қозғалтқыштың жұмысы сияқты, реактивті индуктивтік ток, яғни магниттену тогы қажет. Реактивті қуаттардың



Генератор – генератор; Двигатель – қозғалтқыш; Тормоз – тежеуіш
8.22-сурет

теңгерімі асинхронды генераторды синусоидалық ток желісіне қосқан кезде немесе автономды жұмыс кезінде – статор фазаларына параллель конденсаторларды қосу арқылы мүмкін болады. Соңғы жағдайда асинхронды генераторды іске қосқан кезде 9.9-бөлімшеде сипатталған жағдайға ұқсас өздігінен қозу құбылысы орын алады.

Электрмагниттік тежеуіш режимі. Электрмагниттік тежеуіш режимінде ($s > 1$) ротор орамасындағы токтың бағыты қозғалтқыш режимімен салыстырғанда өзгермейді. Сондықтан айналу моменті тежеуіш моментіне $M_{\text{ай}} < M_{\text{теж}}$ қатынасында қарсы әрекеттеседі. Сәйкесінше, машина білік жақтан өтетін механикалық энергияны және желіден электр энергиясын алып, екеуінің бірін жылулық шығын энергиясына айналдырады.

Қозғалтқышты электрмагниттік тежеуіш режиміне ауыстыру үшін, кері қосу, яғни статордың кез келген екі фазасын желіге қосу тәртібін өзгерту қолданылады (8.8-сурет, б). Бұл ретте машинаның магнит өрісінің айналу бағыты қарама-қарсы бағытқа өзгереді. Ротор тоқтаған кезде, машинаның қозғалтқыш режиміне ауысып кетуіне жол бермеу үшін, оны желіден ажырату қажет.

Электрмагниттік тежеуіш режимі, мысалы, жетек механизмін тежеу үшін, көтергіш құрылғыларда жүктерді түсірген кезде қолданылады.

8.12.

ЕКІ ФАЗАЛЫҚ ЖӘНЕ БІР ФАЗАЛЫҚ АСИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАР

Бір фазалық қуаттау көзінен жұмыс істеу үшін бастапқы моментті құру тәсілі бойынша екі фазалық және бір фазалық деп бөлінетін асинхронды қозғалтқыштар қолданылады.

Екі фазалық асинхронды қозғалтқыштар. Мұндай қозғалтқыштардың статор ойықтарында осьтері кеңістік бойынша $\pi/2$ бұрышына жылжитындай етіп орналасқан екі орамасы болады. w_1 орамасы желіге тікелей қосылады, ал w_2 орамасы фаза қозғайтын құрылғы арқылы қосылады, мұндай құрылғы ретінде С конденсаторы пайдаланылады (8.23-сурет). Бұл ретте айналмалы магнит өрісін жасау шарты орындалады: кеңістікте араласқан және фаза бойынша жылжыған екі синусоидалық магнит ағынының болуы.

Шеңбер айналатын магнит өрісін алу үшін ораманың МҚК-і мәндері өзарасында тең болуы $I_1 w_1 = I_2 w_2$ және I_1 мен I_2 токтарының арасындағы фазалық жылжу $\pi/2$ -ге тең болуы қажет. Бұл ретте магнит өрісінің B_x және B_y құраушылары синусоидалы және конусо-

идалы өзгертін болады.

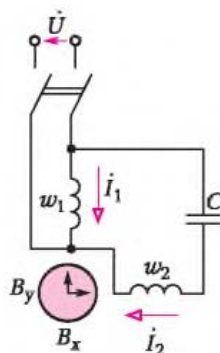
Егер таңдалған конденсатор қозғалтқыш іске шеңбер айналатын магнит өрісін қамтамасыз етсе жүктемеде w_1 және w_2 орамаларындағы I_1 және I_2 токтары өзгереді де, айналмалы магнит өрісі сопақ болады, бұл айналу моментінің азаюына негіз болады.

Бұл кемшілікті іске қосу режимінен жұмыс режиміне көшкен кезде конденсаторлардың бөліктерін ажырату арқылы жоюға болады.

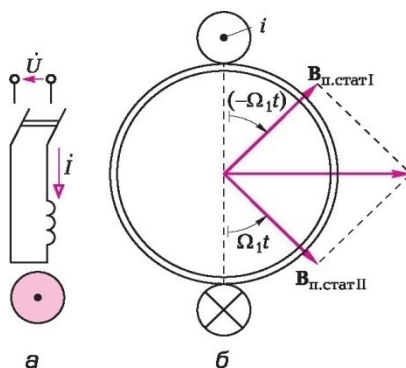
Бір фазалық асинхронды қозғалтқыштар.

Мұндай қозғалтқыштардың статор ойықтарында орналасқан және жалпы жағдайда $k = p$ катушка топтарынан (8.4) және тиін дөңгелегі тәрізді қысқа тұйықталған орамалы ротордан (8.3, б суретін қараңыз) тұратын бір орамасы (8.24-сурет, а) болады. Статор орамасындағы ток $i_{ст} = I_m \sin \omega t$ болған кезде, оның магниті өрісі кеңістікте қозғалмайды, ал индукция синусоидалы өзгереді.

Бір фазалық екі полюсті қозғалтқыштың жұмысын қарастырайық ($p = 1$). Үш фазалық қозғалтқыштың А фазасының магнит өрісі сияқты (8.8-сурет, а), бір фазалық қозғалтқыш статоры өрісінің магниттік индукциясының векторы $B_{п,стат}$ статор орамасының осын бойлай $i = I_m \sin \omega t$ тогымен бағытталған және синусоидалы өзгереді: $B_{п,стат} = B_m \sin \omega t$ (8.24-сурет). Статордың магнит өрісін $B_{п,статI} = B_{п,статII} = B_m/2$ бірдей индукциялы және n_1 айналу жиілігімен кері бағытта, яғни $\Omega_1 = \omega$ бұрыштық жылдамдығымен айналатын $B_{п,статI}$ және $B_{п,статII}$ екі магнит өрістерін қосу нәтижесі ретінде қарастырайық. Бұл ретте қозғалмайтын роторда қарсы бағытталған



8.23-сурет



8.24-сурет

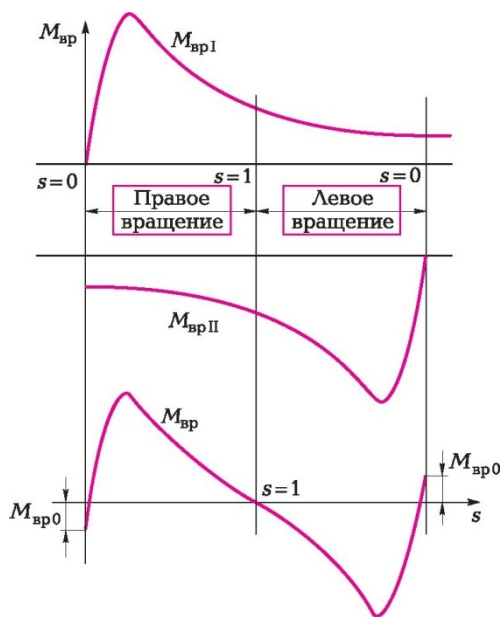
және бір-біріне теңестірілген екі бірдей айналу моменті әрекет етеді. Роторды кез келген бағытта айналдырса, моменттердің теңдігі бұзылады. Ротормен бірдей бағытта айналатын өрістің тудыратын моменті айналмалы өріске кері өрбитін моменттен үлкен бола түседі.

Бір фазалық қозғалтқыштың $M_{\text{ай}}$ айналу моментін түзу $M_{\text{ай1}}$ және $M_{\text{ай11}}$ айналу моменттерінің әртүрлілігі ретінде қарастыруға болады (8.25-сурет). Бір фазалық қозғалтқыштың айта кетерлік ерекшелігіне түзу айналатын өріске қатысты ротордың айналу синхронды жиілігінде шағын теріс $M_{\text{ай0}}$ айналу моменті жатады.

Жүктеме ұлғайған кезде жылжудың ұлғаюы бір фазалық қозғалтқышта айналу моментіне кері тежеу моментінің ұлғаюына әкеледі, оның салдарынан қозғалтқыш жұмысының тұрақтылығы үш фазалыға қарағанда аз болады.

Бірқатар қосымша шығындардың салдарынан бір фазалық қозғалтқыштың ПӘК-і үш фазалық қозғалтқыштың ПӘК-іне қарағанда біршама төмен болады.

Бір фазалық қозғалтқыштың іске қосуы іске қосу құрылғысын қолдану арқылы жүзеге асырылады. Көбінесе бұл: токпен қысқа мер-



Правое вращение – оңға жылжу; левое вращение – солға жылжу
8.25-сурет

зімді жүктемеге есептелген және іске қосу аяқталғаннан кейін өшірілетін екі фазалық қозғалтқыштың екінші орамасына ұқсас қосымша орама. Қосымша орамамен қатар фаза қозғаушы құрылғы қосылады.

Бір фазалық қозғалтқыш жұмысының жағдайларына ұқсас жағдайлар үш фазалық қозғалтқышта фазалардың бірін өшірген кезде жасалады. Бір фазалық қуаттау жағдайында үш фазалық қозғалтқыш жұмысын жалғастырады. Бұл ретте қосулы күйде қалатын екі фаза орамаларының қатты қызуыға жол бермеу үшін, қозғалтқыштың жүктемесін номиналды мәннен 50-60%-ға дейін азайту қажет.

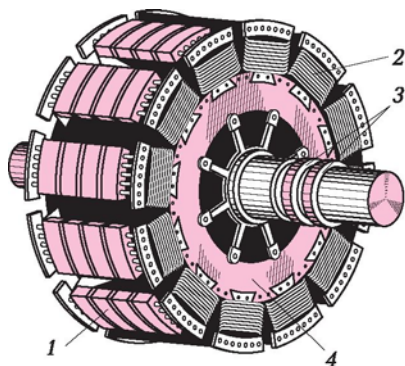
8.13. ҮШ ФАЗАЛЫҚ СИНХРОНДЫ МАШИНАНЫҢ ҚҰРЫЛЫСЫ

Үш фазалық синхронды машинаның негізгі бөліктері статор мен ротор болып табылады, бұл ретте статор үш фазалық асинхронды машинаның статорынан өзгешеленбейді (8.1-суретті қараңыз). Статордың өзекшесі бір-бірінен лак қабаттарымен оқшауланған электртехникалық болат табақтарынан жиналған және массивті корпус ішінде бекітілген. Статордың ішкі жағындағы ойықтарда үш фазалық орама орналастырылған.

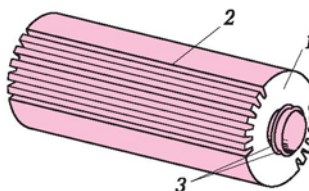
Синхронды машинаның роторы тұрақты токтағы *айқын полюсті* (8.26-сурет, мұндағы 1 — полюстер; 2 — полюс катушкалары; 3 — контактілік сақиналар; 4 — ротордың өзекшесі) немесе *айқын емес полюсті* (8.27-сурет, мұндағы 1 — ротордың өзекшесі, 2 — орамалы ойықтар; 3 — контактілік сақиналар) *электр магниті* болып есептеледі. Ротор орамалары контактілік сақиналар мен қылшақтар арқылы тұрақты токтың сыртқы көзіне – қоздырғышқа, яғни роторы синхронды машинаның роторымен бірге айналатын, төмен қуатты тұрақты ток генераторына не түзеткішке қосылады.

Статор фазалары орамаларының сымдарында синусоидалық ЭҚК алу үшін ротор тогының магнит өрісімен жаласатын ауа саңылауындағы магниттік индукция ротор шеңберін бойлай синусоидалы бөліну қажет. Айқын полюсті машинада бұған ауа саңылауының енін полюс ортасынан бастап шеттеріне қарай ұлғайту арқылы жетеді. Айқын емес полюсті машиналарда қозу орамасын ротор шеңберінің бойымен сәйкесінше үлестіру пайдаланылады.

Көп полюсті синхронды машинаның роторында p полюстер жұбы болады, ал статор фазаларының орамаларындағы токтар айналмалы



8.26-сурет



8.27-сурет

магнит өрісінің p полюстер жұбын жасайды (8.11-суретті қараңыз). Бұл ретте өрістің айналу жиілігі (8.5) бойынша ротордың айналу жиілігіне тең:

$$n = 60/p. \quad (8.8)$$

Статор фазаларының орамаларындағы синусоидалық токтардың өнеркәсіптік жиілігі $f = 50$ Гц болған кезде екі полюсті машинаға сәйкес келетін ($p = 1$) ротордың максималды айналу жиілігі 3000 ай/мин тең болады. Заманауи *турбоагрегаттың* роторы осындай жиілікпен айналады, ол бастапқы қозғалтқыштан – бу турбинасынан және айқын емес полюсті синхронды генератордан (турбогенератордан) тұрады.

Гидроагрегаттың гидравликалық турбинасы баяу айналады, сондықтан гидрогенераторларды көп полюсті, айқын полюсті және көп жағдайда тік білікті етіп жасайды. Гидрогенератор роторларының айналу жиілігі – минутына оннан бірнеше жүздеген айналымға дейін болады, оған полюстердің бірнеше ондаған жұптары сәйкес келеді. Гидрогенераторлардың бірлік қуатына шаққанда біршама үлкен салмағы болады – $8 \text{ кг}/(\text{kB} \cdot \text{A})$, турбогенераторларға қарағанда — $2,5 \text{ кг}/(\text{kB} \cdot \text{A})$ аз.

8.14. ҮШ ФАЗАЛЫҚ СИНХРОНДЫ МАШИНА ЖҰМЫСЫНЫҢ РЕЖИМДЕРІ

Үш фазалық синхронды машина генератор және қозғалтқыш режимдерінде жұмыс жасауы мүмкін.

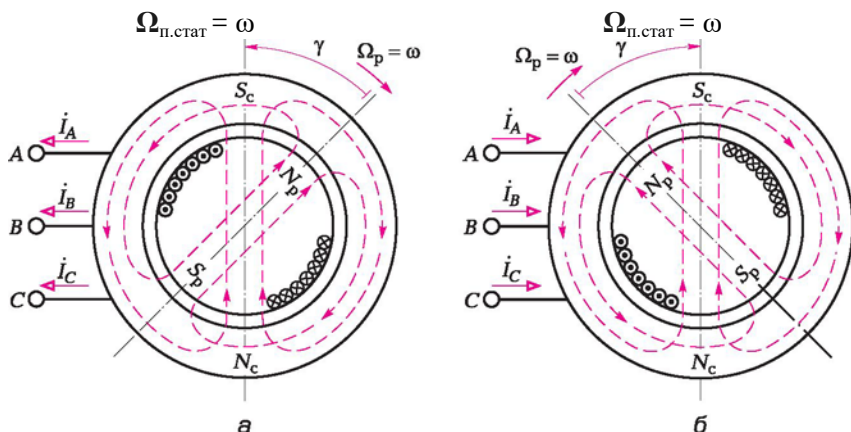
Екі полюсі машина жұмысының режимдерін қарастырайық. Статор фазаларының орамаларында магниттік ток өрістерін қабаттастыру асинхронды машинадағы сияқты синхронды машинада да статордың орамасындағы токтардың ω бұрыштық жиілігіне тең $\Omega_{п.стат} = \omega$ бұрыштық жылдамдығымен айналатын магнит өрісін қоздырады (8.10-суретті қараңыз).

Синхронды машинаның магниттік сымында генератор және қозғалтқыш режимдеріндегі статордың айналмалы магнит өрісінің магнит сызықтарының жақын бөлінуі 8.28, *а* және *б* суреттерінде штрих сызықпен келтірілген. Статордың айналмалы магнит өрісінің бөлінуі оны $\Omega_{п.стат} = \omega$ бұрыштық жылдамдығымен айналатын, статорда орналасқан S_c және N_c магнит полюстерінің жұптары түрінде жақындастырып ұсынуға болады.

Сол сияқты $\Omega_p = \omega$ бұрыштық жылдамдығымен айналатын ротор орамасындағы тұрақты ток тудыратын магнит өрісін роторда орналасқан S_p және N_p магнит полюстерінің жұптары түрінде жақындастырып ұсынуға болады.

Егер синхронды машинада энергия шығындарының барлық түрлерін елемесе, онда білікте момент болмаған жағдайда ротор мен статордың магнит полюстерінің осьтері сәйкес келетін болады.

Генератор режимі. Егер машина білігіне бастапқы қозғалтқыштан айналу моментін салсақ, онда ротордың магнит полюстерінің осы статордың магнит полюстерінің осыне қатысты айналу бағытында біраз γ бұрышына бұрылады (8.28, *а* суретін қараңыз). Бұл ретте статор фазаларының орамаларында айналмалы ротордың магнит өрісімен индукцияланатын ЭҚК мен машина қосылған желінің фазалық кернеулерінің арасындағы фазалардың



8.28-сурет

қозғалысы өзгереді. Соңғысы статор фазаларында токтардың өзгеруімен қатар жүреді. Статор фазаларындағы өзгерген токтардың ротордың магнит өрісімен электрмагниттік өзара әрекеттесуі роторға әсер ететін тежеу моментін тудырады. Бұл дегеніміз бастапқы қозғалтқыштың механикалық қозғалыс энергиясының генератордың электр энергиясына айналғанын білдіреді. Ротордың магнит полюстері артынан статордың магнит полюстерін тартатын болады.

Қозғалтқыш режимі. Егер машина білігіне механикалық жүктеменің тежеу моментін қосатын болсақ, онда ротордың магнит полюстерінің осы статордың магнит полюстерінің осыне қатысты айналу бағытында біраз у бұрышына бұрылады (8.28, б суретін қараңыз). Статор фазаларының орамаларындағы токтар қайтадан өзгереді де, осы токтар мен ротордың магнит өрісінің өзара әрекетінен электрмагниттік күштер туындайды. Алайда енді электрмагниттік күштер роторға әсер ететін айналу моментін тудырады. Бұл дегеніміз желінің электр энергиясының қозғалтқыштың механикалық энергиясына түрленгенін білдіреді. Статордың магнит полюстері артынан ротордың магнит полюстерін тартатын болады.

Синхронды машина машина білігіне механикалық әсерге байланысты генератор не қозғалтқыш режимінде жұмыс істейді, бұл ретте электрмагниттік күштер ротор мен статордың арасында өзіндік бір берік байланыс рөлін ойнайды.

8.15. СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОР ФАЗАСЫНЫҢ ЭЛЕКТРЛІК КҮЙІНІҢ ТЕНДЕУІ

Жүктелген синхронды машинаның магнит өрісі ротор орамасындағы тұрақты токпен ғана емес, сондай-ақ статор (зәкір) фазаларының орамаларындағы синусоидалық токтармен де қозады. Сәйкесінше, синхронды машиналарда, тұрақты ток машиналарындағы сияқты (9.6-бөл. қараңыз), *зәкір реакциясы* – зәкір тізбегінің МҚШ-ң машинаның магнит өрісіне әсері орын алады.

Физикалық тұрғыда синхронды машинада айналмалы ротордың тұрақты магнит өрісінен, статордың магниттік сейілу өрісінен және зәкір реакциясының ротормен синхронды айналатын магнит өрісінен тұратын бір қорытқы өріс бар. Алайда гистерезис әсері мен магнит өткізгіштің қанықтануын (сызықтық тізбек) елеместен, осы магнит өрістерін бір-бірінен тәуелсіз әрекет ететін, статор фазаларының орамаларында ағын іліністері мен индукцияланатын сәйкес ЭҚК

туды-

ратын өрістер ретінде қарастырамыз. Синхронды машина фазасының электрлік күйін талдау үшін кешенді әдісті пайдаланамыз.

Жүктелген синхронды генераторда ротордың магнит өрісінің ψ_0 статор фазасының орамасымен ағын ілінісі онда бос жүрісті ЭҚК-ке тең ЭҚК-ті индуцирлейді:

$$E_0 = -j\omega\psi_0, \quad (8.9)$$

$\Psi_{\text{шаш}}$ ағынды сейілу ілінісі статор фазасының орамасында ЭҚК индуцирлейді:

$$E_{\text{шаш}} = -j\omega\psi_{\text{шаш}} = -jX_{\text{шаш}}I^1,$$

мұндағы I – статор фазасының орамасындағы ток; $X_{\text{шаш}}$ – индуктивті сейілу кедергісі.

$\Psi_{3,p}$ зәкір реакциясының ағын ілінісі статор фазасының орамасында ЭҚК индуцирлейді:

$$E_{3,p} = -j\omega\psi_{3,p} = -jX_3I^1,$$

мұндағы X_3 — зәкірдің индуктивті кедергісі.

Фаза орамаларында ψ_0 ағынды ілінісімен индукцияланатын E_0 ЭҚК процестерінің мұндай көрінісінде индуктивті $X_{\text{шаш}}$ және X_3 және фаза орамасының активті R_B кедергілеріндегі $jX_{\text{шаш}}I$, jX_3I және $R_B I$ кернеулері мен U синхронды генератор фазасы орамасы шықпаларының арасындағы кернеудің қосындысына тең. Сәйкесінше, синхронды генератор статоры фазасының электрлік күйінің теңдеуі былай болады:

$$E_0 = U + [R_B + j(X_{\text{сей}} + X_3)]I = U + (R_B + jX), \quad (8.10)$$

мұндағы $X = X_{\text{сей}} + X_3$ — статор фазасы орамасының индуктивті кедергісі, ол *синхронды реактивті (индуктивті) кедергі* деп аталады. Қанық емес магнит өткізгіштік синхронды машинада ол тұрақты болады.

Айқын емес полюсті синхронды машиналарда XI синхронды реактивті кедергісіндегі кернеудің азаюы номиналды жүктеме кезінде номиналды фазалық кернеудің 20%-ына дейін құрайды. Статор фазасы орамасының активті кедергісі және ондағы кернеудің номиналды жүктеме кезінде азаюы номиналды фазалық кернеудің 1-2%-ына дейін құрайды. Сондықтан оны кейбір жағдайларда ғана ескереміз.

Жоғары қуатты үш фазалық электр жүйесі көптеген үш фазалық көздер мен электр энергиясын қабылдағыштардың жиынтығы болып есептеледі. Жоғары қуатты жүйеде көздер мен қабылдағыштар санының ішінара өзгеруі оның жұмыс режиміне әсер етпейді. Сондықтан кернеудің әрекет етуші мәні мен оның жиілігін осындай жүйенің жалпы шиналарында тұрақты деп санайды.

8.29-суретте $E = U = \text{const}$ ЭҚК шексіз қуат көзі мен Z_n жүктеме кедергісі бар қабылдағышты қамтитын жоғары қуатты жүйенің фазасын ауыстырудың балама схемасы және жүйенің жалпы шиналарына қосылған синхронды генератор фазасын ауыстырудың балама схемасы келтірілген. Синхронды генератор фазасының электрлік күйінің теңдеуі (8.10) фаза орамасының R_b активті кедергісін есептемегенде мынадай көрініске ие:

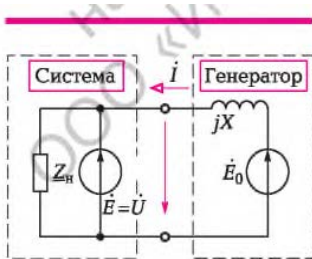
$$E_0 - E = jXI,$$

немесе

$$E_0 = E + jXI = U + jXI. \quad (8.11)$$

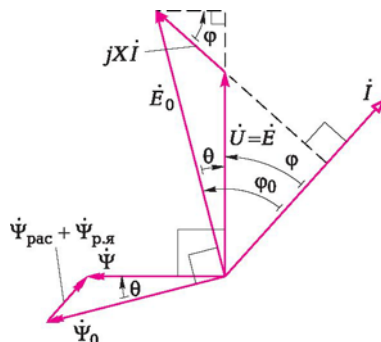
Жоғары қуатты электр жүйесіне қосылған синхронды генераторда болатын процестерді векторлық диаграмма көрсетеді (8.30-сурет) Бастапқы вектор ретінде жорамал мәндердің осы бойынша бағытталған $U = E$ жүйесінің шиналарындағы кернеудің векторы таңдап алынған.

Бұл кернеу статор фазасының орамасында ψ_0 ағын ілінісімен индукцияланатын E_0 ЭҚК бөлігімен теңестіріледі. U кернеуінің векторына I тоқының векторына перпендикуляр jXI кернеуінің



векторын қосу арқылы E_0 ЭҚК векторын аламыз. ψ_0 ағын ілінісі векторының орны оның индуцирлейтін E_0 ЭҚК-тен 2π бұрышына алда болатынымен анықталады. $jXI = -E_{\text{шаш}} - E_{\text{з.р}}$ кернеуін өрнектеп (8.15-бөлімшені қараңыз) және оны (8.11) теңдеуіне қойып, мынаны аламыз:

8.29-сурет: Система - жүйе



8.30-сурет

$$E_0 + E_{\text{сей}} + E_{\text{з.р}} = U = E.$$

Синхронды генератор фазасының кернеуі фаза орамасында ψ_0 , $\psi_{\text{сей}}$, $\psi_{\text{з.р}}$ үш ағын ілінісімен индукцияланатын ЭҚК қосындысына тең, бірақ физикалық тұрғыда бұл ағын іліністері фаза орамасымен бір қорытқы ағын ілінісін тудырады: $\psi = \psi_0 + \psi_{\text{сей}} + \psi_{\text{з.р}}$. Сәйкесінше, синхронды генератор фазасы шықпаларының арасындағы кернеуді фаза орамасында ψ қорытқы ағын ілінісімен индукцияланатын ЭҚК қосындысына тең деп есептеуге болады. Бұл векторлық диаграммада фаза бойынша $U = E$ векторынан 2π бұрышына алда болатын ψ ағын ілінісі векторының бағытын анықтайды. $\Psi_{\text{сей}}$ және $\Psi_{\text{з.р}}$ ағын іліністері векторларының бағыты I тогы векторының бағытымен сәйкес келеді. U және E_0 ЭҚК кернеуі векторларының арасындағы және ψ және ψ_0 ағын іліністері векторларының арасындағы фазаның жылжу бұрыштары θ өз арасында тең болады. θ фазаның жылжу бұрышының мәнін E_0 ЭҚК және ψ_0 ағын ілінісі векторларының бағытынан есептеу қабылданған. Генератор режимінде жұмыс жасайтын синхронды машина үшін бұл бұрыштың мәні ылғи да нөлден төмен ($\theta < 0$).

Ағын іліністері векторларының арасындағы θ фаза жылжуына ротордың магнит полюстері мен синхронды генератордың қорытқы магнит өрісінің осы арасындағы θ/p бұрышына кеңістіктік жылжу сәйкес келеді.

Қорытқы ағын ілінісінің жоғары қуатты электр жүйесіне қосылған синхронды генератор фазасының орамасымен әрекет ететін мәні ($U = \text{const}$), — тұрақты шама ($\psi = \text{const}$) және ол жүктемеге тәуелді емес.

СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРДЫҢ ЭЛЕКТРМАГНИТТІК МОМЕНТІ ЖӘНЕ БҰРЫШТЫҚ СИПАТТАМАСЫ

Синхронды генератордың P қуаты мен $M_{эм}$ электрмагниттік моментінің $\theta < 0$ бұрышына тәуелділігін талдайық. Ол үшін векторлық диаграмманы пайдаланамыз (8.30-суретті қараңыз).

Синхронды генератордың үш фазасының қуаты:

$$P = 3UI\cos\varphi = 3E_0I\cos\varphi_0 = 3E_0I\cos(\varphi - \theta). \quad (8.12)$$

Векторлық диаграммадан тепе-теңдік алынады:

$$XI \cos \varphi = E_0 \sin |\theta|,$$

ол синхронды генератордың қуатын мына түрде өрнектеуге мүмкіндік береді:

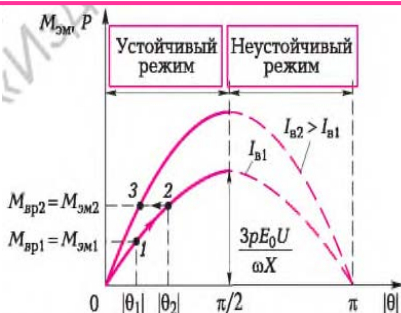
$$P = 3UI\cos \varphi = 3E_0U\sin |\theta|/X. \quad (8.13)$$

Зәкір тогының $\Omega_p = 2\pi n/60 = 2\pi f/p = \omega/p$ синхронды бұрыштық жылдамдығымен айналатын ротордың магнит өрісімен өзара әрекеттесуінен туындайтын электрмагниттік момент статор орамасын жылытуға кететін қуат шығынын есептемегенде:

$$M_{эм} = P / \Omega_p,$$

немесе (8.13) есептегенде:

$$M_{эм} = \frac{3p}{\omega} E_0 U \frac{\sin|\theta|}{X}. \quad (8.14)$$



Устойчивый режим – тұрақты режим; неустойчивый режим – тұрақсыз режим
8.31-сурет

Жоғары қуатты электр жүйесінде кернеу $U = \text{const}$ және жиілік $f = \text{const}$ болатындықтан, осы жүйеге қосылған синхронды генератордың қуаты мен электромагниттік моменті тұрақты қозу тогында ($I_b = \text{const}$) $|\theta|$ бұрышына тәуелді болады. $M_{эм}(|\theta|)$ және $-P(|\theta|)$ тәуелділіктері *синхронды генератордың бұрыштық сипаттамалары* деп аталады (8.13-сурет) (қуат пен электромагниттік момент үшін олар масштабпен өзгешеленеді).

Бұрыштық сипаттамалар синхронды генераторда жүктеме өзгеріссіз кезде болатын процестерді талдауға мүмкіндік береді.

Бастапқы қозғалтқыш жасайтын жұмыс генератордың желіге беретін электр энергиясына айналады. Бастапқы қозғалтқыш тудыратын айналу моменті роторға жететін тездету салдарынан ұлғайған кезде ($M_{ай} > M_{ай1} = M_{эм1}$, 1 нүктесі) $|\theta|$ бұрышы ұлғаяды. Синхронды айналу жиілігінің мәніне жуық бірнеше ауытқудан кейін генератордың айналу моменті мен электромагниттік моментінің тепе-теңдігі ($M_{ай2} = M_{эм2}$, 2 нүктесі) $|\theta_2| > |\theta_1|$ бұрыштың жаңа мәнінде қалпына келеді.

Синхронды генератор $|\theta|$ бұрышы $0 \rightarrow \pi/2$ шегінде өзгерген кезде тұрақты жұмыс жасайды. $|\theta|$ бұрышының мәніне $= \pi/2$ (8.13) және (8.14) бойынша максималды қуат:

$$P_{max} = 3E_0U/X \quad (8.15)$$

және максималды электромагниттік момент сәйкес келеді:

$$M_{эм max} = 3pE_0U/\omega X. \quad (8.16)$$

$\pi/2 - |\theta|$ бұрышының мәні синхронды генератордың *тұрақтылық запасы* деп аталады.

$|\theta| > \pi/2$ бұрыштарында синхронды генератор тұрақсыз жұмыс жасайды. Бұл жағдайда бастапқы қозғалтқыштың $M_{ай}$ айналу моменті генератордың максималды тежеуіш электромагниттік моментінен асып түседі.

Артық айналу моменті ($M_{ай} > M_{эм}$) ротордың одан әрі тездетуіне әкеледі, бұл генератор синхронизмнен шығып қалғанға дейін, $|\theta|$ бұрышының одан әрі ұлғаюына және тежеу моментінің қайтадан азаюына және т.б. негіз болады. Ұлғайған жүктеме кезінде синхронды генератордың $\pi/2 - |\theta|$ тұрақтылық запасын қалпына келтіру үшін, қозу тогын ұлғайту қажет (3-нүкте).

Жоғары қуатты электр жүйесіне қосылған синхронды генератордың реактивті тоғын қозу тоғын өзгерту арқылы реттеуге болады. Синхронды генератор фазасының векторлық диаграммасын қарастырайық (8.30-суретті қараңыз). Егер синхронды генератордың қуаты $P = M_{эм} \Omega_p$ және электр жүйесінің шиналарындағы кернеу U тұрақты болса, онда (8.13) өрнектегі көбейткіштер көбейтіндісінің мәні:

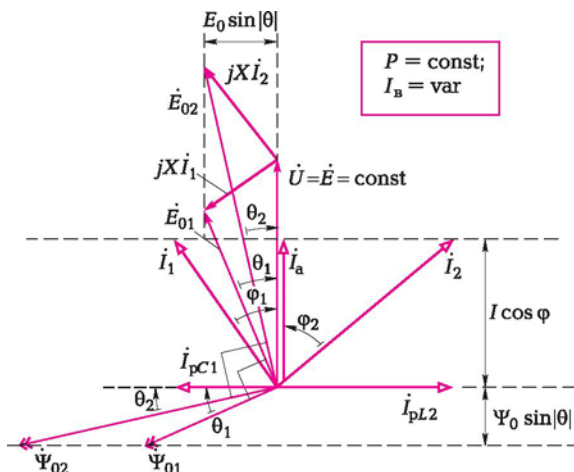
$$\left. \begin{aligned} I \cos \varphi &= I_a = \text{const}; \\ E_0 \sin |\theta| &= \omega \psi_0 \sin |\theta| = \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (8.17)$$

қозу тоғына тәуелді емес. Алайда қозу тоғы өзгерген кезде ол тудыратын статор фазасының орамасымен ψ_0 ағын ілінісі және осы ағын ілінісі фаза орамасында индуцирлейтін ЭҚК E_0 өзгереді (8.9). Статор фазасының электрлік күйінің теңдеуінен (8.11) бұл фаза орамасында $I = I_a + I_p$ ток өзгергенде, нақтырақ айтқанда токтың реактивті құрауышы I_p өзгерген кезде мүмкін болады. $I_p = 0$ болатын қозу тоғы генератордың қуатына байланысты болады және ол *шекаралық* $I_{в.ш}(P)$ деп аталады.

Қозу токтары шекаралық токтан $I_a < I_{в.ш}(P)$ [$I > I_{в.ш}(P)$] аз (үлкен) болған жағдайда, синхронды генератордың тоғында сыйымдылықты I_{pc} (индуктивті I_{pl}) реактивті құрауышы $\varphi < 0$ ($\varphi > 0$) болады.

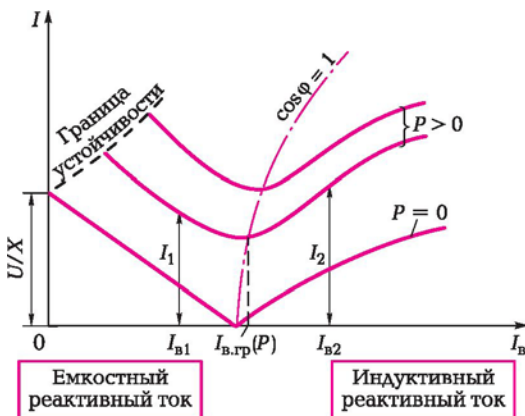
8.32-суретте (8.17) өрнегін сақтаған жағдайда генератордың индуктивті және сыйымдылықты реактивті құрауыштарының жағдайлары үшін статор фазасының кернеулері мен токтарының векторлық диаграммасы келтірілген. ЭҚК E_{01} және E_{02} фаза бойынша тиісті ψ_{01} және ψ_{02} нағын іліністерінен $\pi/2$ бұрышына артта қалып тұр. Олардың U кернеуімен айырымы jXI_1 және jXI_2 , кернеулерін, сәйкесінше, I_1 және I_2 токтарын анықтайды. Фаза бойынша токтардың активті (реактивті) құрауыштары U кернеуімен сәйкес келеді (I_1 тоғы үшін $\pi/2$ бұрышына алда, I_2 тоғы үшін $\pi/2$ бұрышына артта). Сәйкесінше, жете қозбаған кезде (артық қозған кезде) генератордың реактивті қуаты сыйымдылықты ($Q_C = -3UI_{pc1}$) [индуктивті ($Q_L = 3UI_{pl2}$)] сипатта, ал бұрыш $\varphi_1 < 0$ ($\varphi_2 > 0$) болады.

Синхронды генератордың U-тәрізді сипаттамасы деп бастапқы қозғалтқыштың айналу моменті тұрақты $M_{ай} = \text{const}$ бол-



8.32-сурет

ғанда, статор тогының қоздыруға тогына тәуелділігін $I(I_k)$ айтады (8.33-сурет). Қозу тогының мәні біраз аз болған жағдайда $|\theta|$ бұрышы (8.31-суретті қараңыз) $\pi/2$ мәнінен асып кетуі мүмкін және синхронды генератор жұмысының тұрақтылығы бұзылуы мүмкін. Синхронды генератордың активті қуатының мәні неғұрлым үлкен болса, қозу тогы соғұрлым үлкен мәндерде тұрақтылығын жоғалып алады. 8.33-суретте синхронды генератор тұрақтылығының шекарасы штрих сызықпен көрсетілген.



Емкостный реактивный ток – сыйымдылықты реактивті ток;
Индуктивный реактивный ток – индуктивті реактивті ток

8.33-сурет

Егер бастапқы қозғалтқыштың айналу моменті нөлге тең болса ($M_{\text{ай}} = 0$), онда барлық шығын түрлерін елеместен, синхронды генератордың тогы реактивті деп санауға болады ($P = 0$):

$$\tilde{I}(I_B) = \tilde{I}_p(I_B) = \frac{\tilde{E}_0 - \tilde{U}}{jX} = \frac{-j\omega\tilde{\Psi}_0(I_B) - \tilde{U}}{jX}. \quad (8.18)$$

Генератор тогы бұл жағдайда сызықтық қозу тогына тәуелді болады.

$I(I_K)$ тәуелділігінің сызықтылығы машинаның магниттік сымының қанығу салдарынан ток мәндері үлкен болған жағдайда бұзылады.

8.19. СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРДЫҢ АКТИВТІ ЖӘНЕ РЕАКТИВТІ ҚУАТЫН РЕТТЕУ

Жоғары қуатты жүйеге ($U = \text{const}$) қосылған *синхронды генератордың активті қуаты* $P = 3UI\cos\varphi = 3UI_a$ бастапқы қозғалтқыштың $P_{\text{мех}} = M_{\text{ай}} \Omega_p$ қуатымен реттеледі. Бастапқы қозғалтқыштың қуаты, яғни бастапқы қозғалтқыштың (булы не гидравликалық турбина) айналу моменті $M_{\text{ай}}$ ұлғайған кезде генератор тогының активті құрауышы $I_a(M_{\text{ай}})$ ұлғаяды, сонымен қатар $|\theta|$ бұрышы да ұлғаяды, бұл генератордың тұрақтылық запасын $\pi/2 - |\theta|$ азайтады.

Синхронды генератор активті қуат ұлғайған кезде тұрақтылық запасын жоғалтпауы үшін, қозу тогын ұлғайту қажет. Электр энергиясының өнеркәсіптік синхронды генераторлары генератордың активті қуаты өзгерген кезде қажетті тұрақтылық запасын қамтамасыз ететін арнайы реттегіш аппаратурамен жабдықталған.

Жоғары қуатты жүйеге ($U = \text{const}$) қосылған *синхронды генератордың реактивті қуаты* $Q = 3UI\sin \varphi$ $P = \text{const}$ тұрақты активті қуат жағдайында I_K қозу тогын өзгерту арқылы реттеледі. Егер қозу тогы шекаралық $I_{K,\text{ш}}(P)$ токқа тең болса, онда синхронды генератордың реактивті қуаты нөлге тең болады. $I_K > I_{K,\text{ш}}(P)$ ($I_K < I_{K,\text{ш}}(P)$) болғанда синхронды генератордың реактивті қуаты индуктивті ($Q_L = 3UI_{pL}$) (сыйымдылықты ($Q_C = -3UI_{pC}$)) сипатта болады. Әдетте, синхронды генераторларды қоздыру режимі асинхронды қозғалтқыштардың жұмысы үшін қажетті индуктивті реактивті қуатқа сәйкес келеді.

Синхронды генераторды электр жүйесіне параллель қосудың екі тәсілі қолданылады: дәл синхрондау және өздігінен синхрондалу.

Дәл синхрондау тәсілімен (8.34-сурет) генератор желіге генератор фазаларының аттас ЭҚК-ң лездік мәндері тепе-тең болған кезде қосылады, мысалы $e_{A1} = E_{mA1} \sin(\omega_{A1}t + \psi_{A1})$ және жүйе фазасы, мысалы $e_A = E_m \sin(\omega_A t + \psi_A)$. Бұл ретте ажыратқыш фазаларында кернеу болмауы тиіс, мысалы:

$$u_{AA1} = e_A - e_{A1} = 0,$$

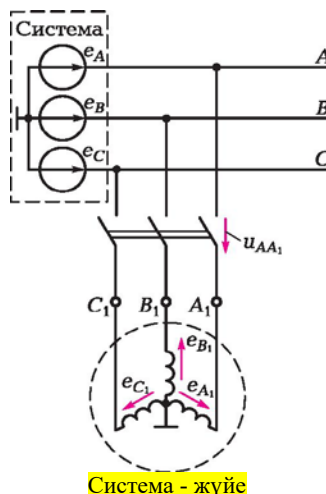
немесе, $E_{mA} = E_{mA1} = E_m$, $\psi_A = \psi_{A1}$ және $\omega_A = \omega_{A1}$ кезінде:

$$u_{AA1} = 2E_m \cos\left(\frac{\omega_A t + \omega_{A1} t + \psi_A + \psi_{A1}}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega_A t - \omega_{A1} t + \psi_A - \psi_{A1}}{2}\right) = 0.$$

Осы шарттарды орындау үшін генератордың роторы алдын ала синхронды айналу жиілігіне дейін тарқатылады, ал оны қоздыру генератор мен жүйенің аттас фазаларының шықпаларындағы кернеулер бірдей болатындай етіп реттеледі.

Дәл реттеу үшін синхроскоптар қолданылады.

Өздігінен синхрондалу тәсілімен генератор желіге қоздырмастан қосылады. Ротор орамасы (қоздыру орамасы) мұндай қосу кезінде резистормен тұйықталуы тиіс. Ротордың айналу жиілігі синхронды жиіліктен 2-3%-ға өзгешеленген кезде, оның орамасы тұрақты қозу тогына қосылады да, генератор электрмагниттік күштердің әсерімен синхрондалады. Бұл ретте статор фазасының орамаларында токтың қысқа мерзімді секірісі пайда болады. Мұндай токтың мәні генератордың номиналды тогынан бірнеше есе асып түсуі мүмкін. Алайда, тәжірибе көрсеткендей, ток секірісі де, осы кезде туындайтын генератор білігіндегі механикалық күш те агрегат (турбогенератор не гидрогенератор) үшін қауіпті емес. Өздігінен синхрон-



Система - жүйе

8.34-сурет

дану әдісі қуаты 50 МВ . А дейінгі генераторларды қосу үшін қолданылады.

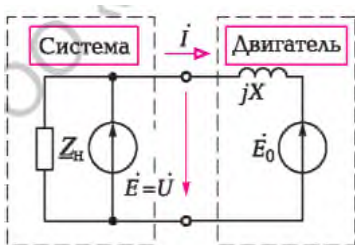
8.21. СИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШ ФАЗАСЫНЫҢ ЭЛЕКТРЛІК КҮЙІНІҢ ТЕНДЕУІ, АЛМАСТЫРУ СХЕМАСЫ ЖӘНЕ ВЕКТОРЛЫҚ ДИАГРАММАСЫ

Синхронды генератордан айырмашылығы синхронды қозғалтқышта ротордың магнит полюстерінің осы статордың айналмалы магнит өрісі полюстерінің осынен артта қалады (8.28, б суретін қараңыз). Осы кезде пайда болатын электромагниттік момент қозғалтқыш білігіндегі механикалық жүктеменің қарсы әрекет ететін тежеу моментіне тең болады: $M_{эм} = M_{теж}$. Синхронды қозғалтқышта электр энергиясы механикалық энергияға айналады. 8.35-суретте жоғары қуатты электр жүйесіне қосылған синхронды қозғалтқыш фазасын алмастыру схемасы келтірілген ($U = \text{const}$). Бұл алмастыру схемасы жоғары қуатты электр жүйесіне қосылған синхронды генератор фазасын алмастыру схемасымен сәйкес келеді (8.29-суретті қараңыз), айырмашылығы – бірінші жағдайда электр энергиясы жүйеден қозғалтқышқа, ал екінші жағдайда генератордан жүйеге келіп түседі.

Алмастыру схемасынан синхронды қозғалтқыш фазасының электрлік күйінің теңдеуі шығады:

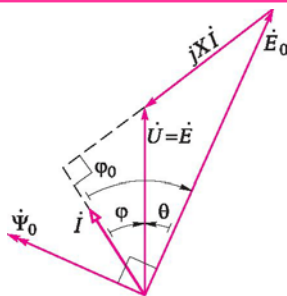
$$E_0 = U - jXI, \quad (8.19)$$

мұндағы $E_0 = -j\omega\psi_0$ және $X = X_{ссь} + X_s$ (8.15-бөлімшені қараңыз).



8.35-сурет

Система – жүйе; Двигатель – қозғалтқыш



8.36-сурет

(8.19) теңдеуіне синхронды қозғалтқыш фазасының веткорлық диаграммасы сәйкес келеді (8.36-сурет). U және ЭҚК E_0 кернеуі векторларының арасындағы θ фазаның жылжуына ротордың магнит полюстерінің осы мен синхронды қозғалтқыштың қорытқы магнит өрісі осының арасындағы θ/p бұрышына геометриялық жылжу сәйкес келеді. Қозғалтқыш режимінде жұмыс жасайтын синхронды машина үшін бұл бұрыш ылғи да нөлден үлкен болады ($\theta > 0$).

8.22. СИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ ЭЛЕКТРМАГНИТТІК МОМЕНТІ, БҰРЫШТЫҚ ЖӘНЕ U-ТӘРІЗДІ СИПАТТАМАСЫ

Үш фазалық синхронды қозғалтқыштың қуаты үш фазалық синхронды генератордың қуаты сияқты анықталады (8.12):

$$P = 3UI \cos \varphi = 3E_0 I \cos \varphi_0 = 3E_0 I \cos (\varphi - \theta), \quad (8.20)$$

мұндағы бұрыш $\theta > 0$.

Статордағы энергия шығындарының барлық түрлерін елемей және $\theta > 0$ кезінде (8.20) өрнегін (8.12) өрнегін түрлендіріп, синхронды қозғалтқыштың электрмагниттік моменті үшін синхронды генератордың электрмагниттік моментінің өрнегімен (8.14) сәйкес келетін өрнек $M_{эм} = P/\Omega_p$ аламыз:

$$M_{эм} = \frac{3p}{\omega} E_0 U \frac{\sin \theta}{X}. \quad (8.21)$$

Синхронды қозғалтқыш қуаты (8.21) өрнегін ескергенде:

$$P_{мех} = M_{эм} \Omega_p = P = 3UI \cos \varphi = 3E_0 U \frac{\sin \theta}{X}. \quad (8.22)$$

Жоғары қуатты электр жүйесінде кернеу ($U = \text{const}$) және жиілік ($f = \text{const}$) тұрақты болады, сондықтан $M_{эм}$ электрмагниттік моменті мен осындай жүйеге қосылған синхронды қозғалтқыштың P қуатының мәндері тұрақты қозу тогында ($I_b = \text{const}$) θ бұрышына тәуелді болады.

Синхронды қозғалтқыштың *бұрыштық сипаттамалары* деп синхронды генератордың бұрыштық сипаттамаларына ұқсас $M_{эм}(\theta)$ және $P(\theta)$ тәуелділіктерін айтады (8.31-суретті қараңыз).

Бұрыштық сипаттамалар өзгеріссіз жүктеме кезіндегі синхронды қозғалтқыштағы процестерді талдауға мүмкіндік береді. Синхронды

қозғалтқыш білігіндегі тежеу моменті ұлғайған жағдайда $M_{\text{теж}2} > M_{\text{теж}1} = M_{\text{эм}1}$ машина роторының айналу жиілігі азаяды және θ бұрышы мен $M_{\text{эм}}$ электромагниттік моментінің мәндері ұлғая бастайды. Тежеу моменті мен электромагниттік моменттің тепе-теңдігі ($M_{\text{теж}2} = M_{\text{эм}2}$) біраз уақыт өткеннен кейін бұрыш мәні $\theta_2 > \theta_1$ болған кезде қалпына келеді.

Тежеу моменті ұлғайған кезде $\pi/2 - |\theta|$ тұрақтылық запасын сақтап қалу үшін, қозу тогын ұлғайту қажет.

Қозу тогы синхронды қозғалтқыштың тұрақтылық запасына ғана емес, сонымен қатар оның реактивті тогына да әсер етеді.

Синхронды қозғалтқыштың *U-тәрізді сипаттамасы* қуат тұрақты $P = \text{const}$ болғанда, статор тогының қоздыруға тогына тәуелділігін $I(I_k)$ айтады. Ол синхронды генератордың U-тәрізді сипаттамасына ұқсайды (8.33-суретті қараңыз), одан айырмашылығы жете қозбаған кезде $I_k < I_{k\cdot\text{ш}}(P)$ қозғалтқыштың реактивті тогы индуктивті сипатта, ал артық қозған кезде $I_k > I_{k\cdot\text{ш}}(P)$ — сыйымдылықты сипатта болады.

8.23. СИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ АКТИВТІ ЖӘНЕ РЕАКТИВТІ ҚУАТЫН РЕТТЕУ

Жоғары қуатты электр жүйесіне ($U = \text{const}$) қосылған синхронды қозғалтқыштың *активті қуаты* $P_{\text{мех}} = P = 3UI \cos \varphi = 3UI_a = M_{\text{тежр}} \Omega_r$, біліктегі тежеу моментін өзгерту арқылы реттеледі ($M_{\text{теж}} = \text{var}$). Тежеу моменті ұлғайған кезде синхронды қозғалтқыштың қуаты ұлғаяды, сонымен қатар θ бұрышы да ұлғаяды, бұл қозғалтқыштың $\pi/2 - |\theta|$ тұрақтылық запасын азайтады.

Синхронды қозғалтқыш $P_{\text{мех}}$ активті қуат ұлғайған кезде тұрақтылық запасын жоғалтпауы үшін, I_k қозу тогын қатар ұлғайту қажет. Жоғары қуатты синхронды қозғалтқыштар оның активті қуаты өзгерген кезде қажетті тұрақтылық запасын қамтамасыз ететін арнайы реттегіш аппаратурамен жабдықталған.

Жоғары қуатты жүйеге ($U = \text{const}$) қосылған *синхронды қозғалтқыштың реактивті қуаты* $Q = 3UI \sin \varphi$ ($P = \text{const}$) тұрақты активті қуат жағдайында I_k қозу тогын өзгерту арқылы реттеледі. $I_k < I_{k\cdot\text{ш}}(P)$ [$I_k > I_{k\cdot\text{ш}}(P)$] болғанда қозғалтқыштың реактивті қуаты индуктивті ($Q_L = 3UI_{pL}$) [сыйымдылықты ($Q_C = -3UI_{pC}$)] сипатта болады.

Әдетте, асинхронды қозғалтқышты қоздыру режимі сыйымдылықты реактивті қуатқа сәйкес келеді, бұл асинхронды қозғалтқыштардың индуктивті реактивті қуатының орнын толтырып, сол арқылы электр жүйесін реактивті токтан кемітуге мүмкіндік береді.

Синхронды қозғалтқышты реттелетін сыйымдылықты элемент, *синхронды компенсатор* режимінде қолдану ($P = 0$ және $I_k > I_{k,ш}$) практикалық қызығушылық тудырады. Синхронды компенсаторлар электр жүйесінің қуат коэффициентін ($\cos\phi$) ұлғайтуға мүмкіндік береді (4.14-бөлімшені қараңыз).

8.24. СИНХРОНДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫ ІСКЕ ҚОСУ

Статордың айналмалы магнит өрісінің қозғалыссыз қозған ротормен өзара әрекеттесуінің нәтижесінде туындайтын синхронды қозғалтқыштың айналу моменті қозғалтқышты іске қосқан кезде нөлге тең болады. Сондықтан қозғалтқыш роторын сол не басқа тәсілмен синхронды жиілікке жақын айналу жиілігіне дейін тарқату қажет.

Синхронды қозғалтқышты *асинхронды іске қосу* жиі пайдаланылады. Бұл мақсатта айқын полюсті ротор жағдайында полюсті ұштықтарға асинхронды машинаның тиін дөңгелегіне ұқсас мыс не жез өзектер түріндегі іске қосатын қысқа тұйықталған орама салынады (8.3, б суретін қараңыз).

Қозғалтқышты іске қосу екі кезеңнен тұрады: қозу жоқ кезде роторды тарқату және тұрақты қозу тогын қосқаннан кейін синхронизмге тарту.

Бірінші кезеңде қозу орамасы тұрақты ток көзінен ажыратылады да, резистор арқылы оның меншікті активті кедергісінен 8-10 есе асатын кедергімен тұйықталады.

Қозу орамасын ажыратылған күйде қалдыруға болмайды, өйткені статордың айналмалы өрісі онда оқшаулау тұтастығына қауіп төндіретін біршама ЭҚК индуцирлеуі мүмкін.

Бұл ораманы қысқа тұйықтаған да дұрыс емес. Онда пайда болатын бір фазалық ток роторды синхронды айналу жиілігінің жартысына жеткеннен кейін тежейтін болады.

1. Синусоидалық токтағы асинхронды және синхронды электр машиналарының айырмашылығы неде?
2. «Асинхронды машина роторының жылжуы» ұғымына анықтама беріңіз.
3. Асинхронды машина $0 < s < 1$; $s < 0$; $s > 1$ жылжуы кезінде қандай режимде жұмыс жасайды?
4. Асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамасын бейнелеңіз және ондағы номиналды жүктеме мен іске қосу нүктелерін көрсетіңіз.
5. Фазалық роторлы асинхронды қозғалтқыштар қандай жағдайда қолданылады?
6. Қысқа тұйықталған орамалы роторы бар асинхронды қозғалтқыштың айналу жиілігін қандай әдістермен реттеуге болады?
7. Синхронды машиналар қолданылатын негізгі саланы атаңыз.
8. Электр жүйесінде жұмыс жасайтын синхронды генератордың активті қуаты қалай реттеледі?

ТҰРАҚТЫ ТОКТЫҢ ЭЛЕКТР МАШИНАЛАРЫ**9.1. ЖАЛПЫ МАҒЛҰМАТТАР**

Тұрақты токтың электр машиналары (қозғалтқыштар мен генераторлар) әртүрлі техника салаларында қолданылады: қуаты аз машиналар – атқарушы механизмдер жетегіне арналған автоматты реттеу жүйелерінде және қозғалмалы бөліктердің айналу жиілігінің датчиктері ретінде; жоғары қуатты машиналар – электр көлігіндегі тарту қозғалтқыштары, әртүрлі техникалық жабдықтың жетегі (мысалы, илемдік орнақтар, шахталық көтергіштер) және арнайы жабдықты электрмен қуаттау жүйелеріндегі тұрақты ток генераторлары үшін (мысалы, радиотехникалық қондырғыларда, аккумуляторларды зарядтау кезінде, электролитикалық ванналарды қуаттау үшін және т.б.)

Тұрақты ток қозғалтқыштарының негізгі артықшылықтарына айналу жиілігін біркелкі реттеу және жоғары іске қосу моменттерін алу мүмкіндігінен тұратын жақсы іске қосу және реттеу қасиеттері жатады.

Тұрақты ток қозғалтқыштарының кемшіліктеріне олардың жоғары құны, дайындау қиындығы және жеткіліксіз сенімділігі жатады.

Электр машинасының тізбектерінің тұрақты қайта коммутациясы жүзеге асырылатын қылшақты-коллекторлық аппараттың күрделі конструкциясы тұрақты токтың электр машиналарының жалпы кемшілігі болып табылады. Осы кезде пайда болатын ұшқындау радиокедергілер мен өрт қаупінің көзі болып табылады, ол машиналардың сенімділігін төмендетіп, олардың қолданылу саласын шектейді. Сонымен қатар, тұрақты ток қозғалтқыштары үшін синусоидалық токтағы электр энергиясын тұрақты токтың электр энергиясына түрлендіру қажет.

9.2. ТҰРАҚТЫ ТОКТЫҢ ЭЛЕКТР МАШИНАСЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫСЫ

Тұрақты токтың электр машинасы қозғалмайтын және айналатын бөліктерден тұрады. Қозғалмайтын бөлігінде – тұғырында (9.1-сурет) – магнит ағынын қоздыруға арналған басты полюстер және машинадағы коммутацияны жақсартуға арналған қосымша полюстер бекітілген.

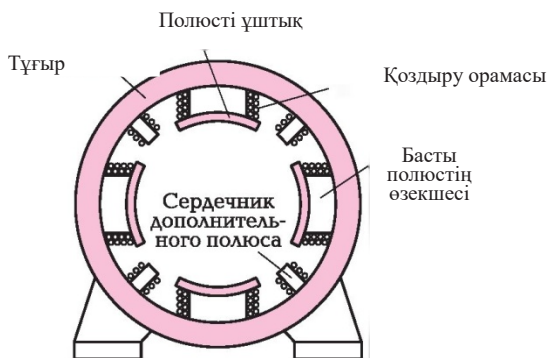
Басты полюс өзекшеден және қоздыру орамасынан тұрады. Өзекшенің бос ұшына магнит ағынының қажетті бөлінісін жасауға арналған полюсті ұштық орнатылады. Басты полюстер жұбының минималды саны $p = 1$ (бір оңтүстік S және бір солтүстік N).

Тұғыр машинаның бұғауы, яғни басты полюстердің магнит ағынының магнитті тізбегін тұйықтайтын бөлігі болып табылады (9.2-сурет).

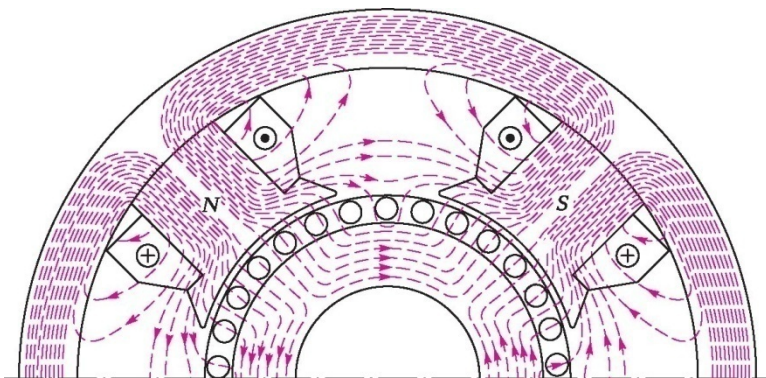
Қосымша полюстер басты полюстердің арасындағы тұғырда орнатылады. Қосымша полюстердің өзекшелерінде зәкір орамасымен кезектесіп жалғанатын орамалар орналасады.

Зәкір деп машинаның айналмалы бөлігін айтады. Зәкір (9.3-сурет) ойықтарында салынған 2 орамалы 1 өзекшеден, 4 жалпы білікке салынған коллектордан 3 тұрады.

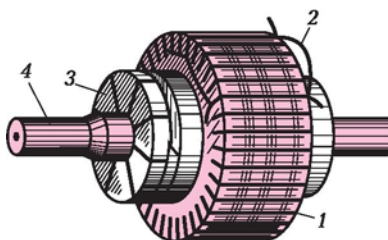
Зәкір мен полюстердің өзекшелері бір-бірінен лак жабынымен оқшауланған, қалыңдығы 0,5 мм электртехникалық болат табақтардан жиналады. Тұғырды құйылған болаттан дайындайды, себебі ондағы магнит ағыны тұрақты.



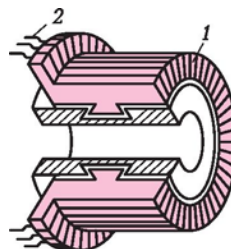
Сердечник дополнительного полюса – қосымша полюстің өзекшесі
9.1-сурет



9.2-сурет



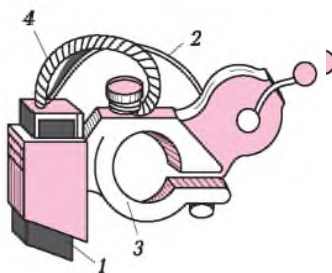
9.3-сурет



9.4-сурет

Коллектор бір-бірінен және машина білігінен оқшауланған сына тәрізді 1 мыс тілімдерінен жиналған толық цилиндр болып есептеледі (9.4-сурет). Олар 2 сымдар арқылы зәкір ойықтарында орналасқан орама орамдарымен жалғанады. Айналмалы орама 3 қылшақ ұстағыштарда орнатылған 1 қылшақтардың арасында өтпелі контакті арқылы сыртқы тізбекпен (9.5-сурет) және коллектормен жалғанады. Қылшақты коллекторға 2 серіппе қысады. Қылшақтан ток 4 созылмалы кабельмен тартылады. Қылшақ ұстағыштар траверсаға кигізіледі, одан электрлік тұрғыда оқшауланады. Траверса зәкірмен оны, қылшақтардың машина полюстеріне қатысты орнын өзгерте отырып, бұруға болатындай етіп осьтес жалғанған.

Коллектордың және қылшақтардың көмегімен зәкірдің айналмалы орамасы сыртқы электр тізбегімен жалғанады.



9.5-сурет

Қазіргі тұрақты ток машиналарында атанақты зәкір қолданылады (9.3-суретті қараңыз). Зәкір өзекшесінің ойықтарындағы барлық өткізгіштерде, оны v шеңберлі жылдамдығымен айналдырған кезде басты полюстердің магнит өрісінде ЭҚК индуцирленеді. Зәкір орамасының бір орамының екі жағында e_z ЭҚК қосындылануы үшін, орамның ені *полюсті бөлініске*, яғни орталық $2\pi/2p$ бұрышын тартатын зәкір шеңберінің ұзындығына теңестірілуі тиіс. Іс жүзінде зәкір ойықтарынан тыс орналасқан ораманың маңдай бөліктерін кішірейту үшін ораудың қысқартылған адымы қолданылады.

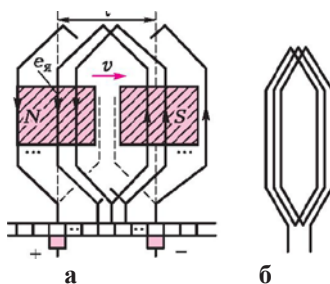
Зәкір орамасын төсеудің екі тәсілі бар.

Жай *ілімекті* немесе *параллель*, орама ілгерілемелі-қайтымды қозғалыс кезінде және зәкірді екі рет айналу кезінде алынады (9.6-сурет, *а*). ЭҚК-ті ұлғайту үшін ойықтарға секциялар салынады (9.6-сурет, *б*). Қылшақтар бүкіл ораманы параллель тармақтарға бөледі. Оң және теріс полярлы қылшақтар машинаның аттас шықпаларымен жалғанады. Қылшақтар саны $2a$ жай ілімекті ораманың параллель тармақтарының санына тең және $2p$ полюстерінің санына тең.

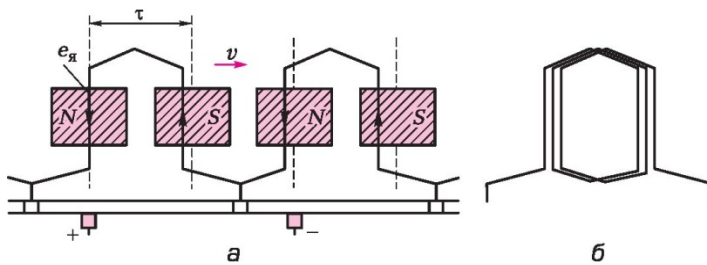
9.6, *а* суретінде секциялары зәкірді бір айналғанда өзекшенің барлық ойықтарына салынып, коллектордың барлық тілімдерінің жартысына қосылған екі полюсті машинаның ($2p = 2$) ілімекті орамасының екі параллель тармақтарының ($2a = 2$) бірі біртұтас сызықпен көрсетілген. Ораманың екінші параллель тармағының басы мен соңы штрих сызықпен көрсетілген. Оның секциялары зәкірді екінші рет айналған салынады да, коллектор тілімдерінің

екінші жартысына қосылады. Екі параллель тармақтың секциялары да конструкциясына байланысты зәкір өзекшесінің бірдей не әртүрлі ойықтарына салынады.

Жай *толқынды* не *тізбекті*, орама зәкірді бір бағытта бірнеше рет айналғанда алынады (9.7-сурет, *а*). ЭҚК-ті ұлғайту үшін ойықтарға секциялар салынады (9.7-сурет, *б*). Қылшақтар мен толқынды ораманың параллель тармақтарының саны екіге тең ($2a = 2$).



9.6-сурет



9.7-сурет

Жай ілмекті орама аз (1 кВт дейін) және жоғары (500 кВт жоғары) қуатты екі полюсті машиналарда қолданылады.

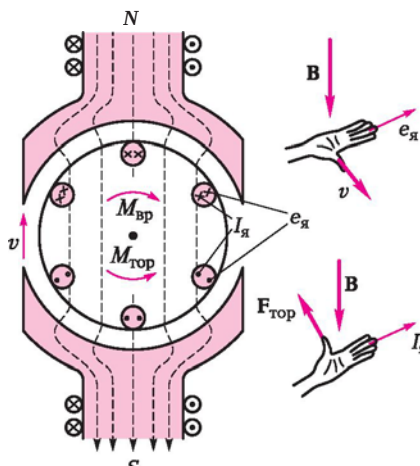
Жай толқынды орама аз және орта қуатты (500 кВт дейін) машиналарда қолданылады.

9.4. ТҰРАҚТЫ ТОК МАШИНАСЫНЫҢ ЖҰМЫС РЕЖИМДЕРІ

Тұрақты ток машинасы, барлық электр машиналары сияқты, генератор не қозғалтқыш режимінде жұмыс істей алады.

Басты полюстерінің магнит өрісі және екі қылшақтың арасына қосылған екі параллель тармақтан тұратын зәкірдің жай ілмекті орамасы берілген тұрақты токтағы екі полюсті машинаның жұмыс режимін қарастырайық (9.6-суретті қараңыз).

Генератор режимі. Машина зәкірінің жазылған күйдегі орамасын елестетейік (9.8-сурет). 9.9, а суретінде бір параллель тармақтың фрагменттері тұтас сызықпен және екінші тармақтың басы мен соңы штрих сызықпен көрсетілген. Зәкір білігіне қосылған $M_{\text{ай}}$ айналу моментінің әсерімен механикалық энергияның сыртқы көзінен (бастапқы қозғалтқыштан) зәкір сағат тілінің бағыты бойынша n тұрақты айналу жиілігімен, яғни $\Omega_{\text{ай}}$ тұрақты бұрыштық және v шеңберлі жылдамдықтармен айналады. Ол кезде оның орамасының параллель тармақтарының орамдарында e_z ЭҚК индуцирленеді, олардың бағыты оң қол ережесі бойынша 9.8-суретте көрсетілген. Бір параллель тармақтың барлық орамдарының e_z ЭҚК қосындысы зәкір орамасының қылшақ шықпаларының арасындағы U_x бос жүріс кернеуіне тең e_z ЭҚК-ті анықтайды. Егер енді қылшақ шықпаларына қабылдағыш – $R_{\text{ж}}$ жүктеме кернеуі бар пассивті қосполюсті П қосылса (9.9-сурет, б), онда қабылдағыш бен зәкір тізбектерінде I_z тогы пайда болады, ал қылшақтардың арасындағы кернеу $U < E_z$ болады. Зәкір орамасында ток пен ЭҚК

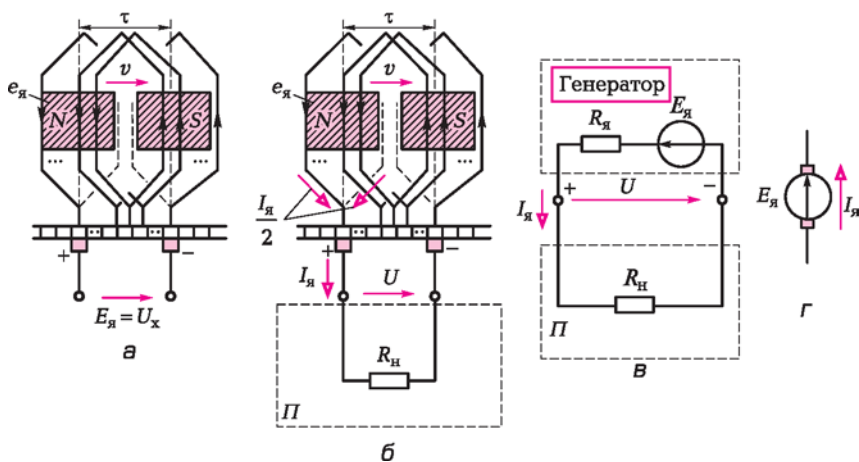


9.8-сурет

бағыты сәйкес келеді.

Зәкір орамасындағы токтың басты полюстердің магнит өрісімен сол қол ережесі бойынша өзара әрекеттесуі айналу моментіне қарсы бағытталған тежеу моментін тудырады.

Зәкірдің n айналу жиілігі тұрақты болған кезде айналу және тежеу моменттері тең болады: $M_{\text{ай}} = M_{\text{теж}}$.



9.9-сурет

Зәкір тізбегінің электрлік күйін мына теңдеу сипаттайды:

$$E_3 - R_3 I_3 = U, \quad (9.1)$$

бұған 9.9-суреттегі алмастыру схемасы сәйкес келеді, бұл теңдеудегі R_3 және I_3 – зәкір тізбегінің кедергісі мен тогы, олар қылшақтардың арасына қосылған зәкір орамасының параллель тармақтарының жалпы кедергісі мен токтарының қосындысына тең.

Құрастырылған (9.1) теңдеуді I_3 көбейту арқылы, зәкір тізбегінің қуаттар теңгерімінің теңдеуін аламыз (2.14-бөлімшені қараңыз).

$$E_3 I_3 = R_3 I_3^2 + U I_3, \quad (9.2)$$

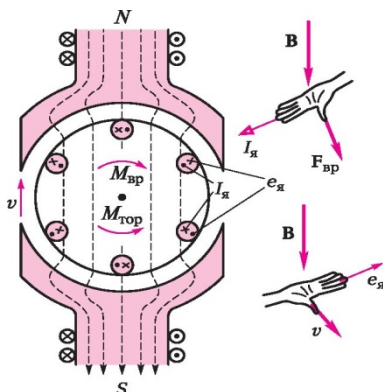
мұндағы $E_3 I_3 = P_E$ — генератор зәкірінің $E_я$ ЭҚК қуаты, ол сыртқы көздің механикалық энергиясын электр энергиясына электромагниттік айналдыру қуатына тең: $P_{эм} = M_{эм} \Omega_{ай} = M_{ай} \Omega_{ай}$; $R_3 I_3^2$ — зәкір орамасының сымдарындағы шығын қуаты; $U I_3 = R_H I_3^2$ — қабылдағыш қуаты.

Генератор механикалық энергияны электр энергиясына айналдырады.

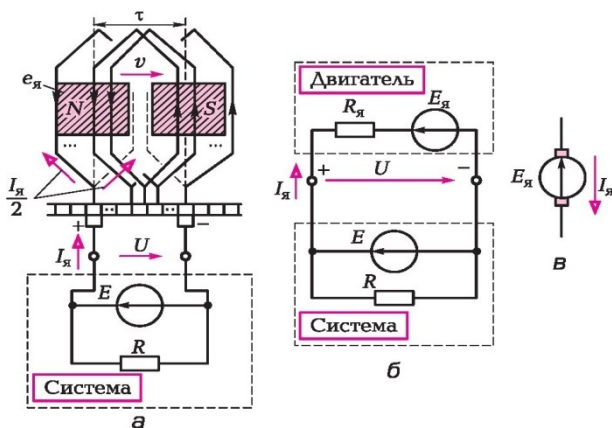
9.9, г суретінде генератор зәкірі тізбегінің электр тізбектерінің принциптік схемаларындағы шартты белгісі келтірілген.

Қозғалтқыш режимі. Машина зәкірінің жазылған күйдегі орамасын қарастырып (9.11-сурет, а), қылшақ шықпаларын жоғары қуатты тұрақты токтың электр жүйесіне қосайық.

Зәкір орамасындағы ток (9.10-суретті қараңыз) басты полюстердің магнит өрісімен сол қол ережесі бойынша өзара әрекеттесіп, сағат тілінің қозғалыс бағытында зәкір өзекшесіне әсер ететін $M_{ай}$ айналу моментін тудырады. Айналу жиілігі тұрақты, яғни зәкірдің бұрыштық



9.10-сурет



Система – жүйе; Двигатель – қозғалтқыш
9.11-сурет

$\Omega_{\text{ай}}$ және шеңберлі ν жылдамдықтары тұрақты болған кезде айналу моменті жұмыс механизмінің тежеу моментімен тең болады: $M_{\text{ай}} = M_{\text{теж}}$.

Басты полюстердің магнит өрісінде айналатын зәкір орамасының орамдарында e_3 ЭҚК индуцирленеді, олардың бағыты оң қол ережесі бойынша 9.10 және 9.11, *а* суреттерінде көрсетілген. Зәкір орамасының орамдарындағы ЭҚК мен ток бағыттары қарама-қарсы, сондықтан қозғалтқыш зәкірінің ЭҚК-ін *қарсы ЭҚК* деп атайды.

Зәкір тізбегінің электрлік күйін мына теңдеу сипаттайды:

$$E_3 + R_3 I_3 = U, \quad (9.3)$$

бұған 9.11, *б* суретіндегі алмастыру схемасы сәйкес келеді, бұл теңдеудегі R_3 , E_3 және I_3 шамалары 9.1-өрнекте сипатталған шамаларға ұқсайды.

Құрастырылған (9.3) теңдеуді I_3 көбейту арқылы, зәкір тізбегінің қуаттар теңгерімінің теңдеуін аламыз:

$$U_3 I_3 = R_3 I_3^2 + E_3 I_3, \quad (9.4)$$

мұндағы $U I_3$ — электр энергиясының сыртқы көзінің қуаты; $R_3 I_3^2$ — зәкір орамасының сымдарындағы шығын қуаты; $E_3 I_3 = -P_{\text{в}}$ — қозғалтқыш зәкірінің ЭҚК қуаты, ол сыртқы көздің электр энергиясын энергиясын механикалық энергияға электромагниттік айналдыру қуатына тең: $P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}} \Omega_{\text{ай}} = M_{\text{ай}} \Omega_{\text{ай}}$.

Қозғалтқыш электр энергиясын механикалық энергияға түрлендіреді.

9.11, *в* суретінде қозғалтқыш зәкірі тізбегінің электр тізбектерінің

принциптік схемаларындағы шартты белгісі келтірілген.

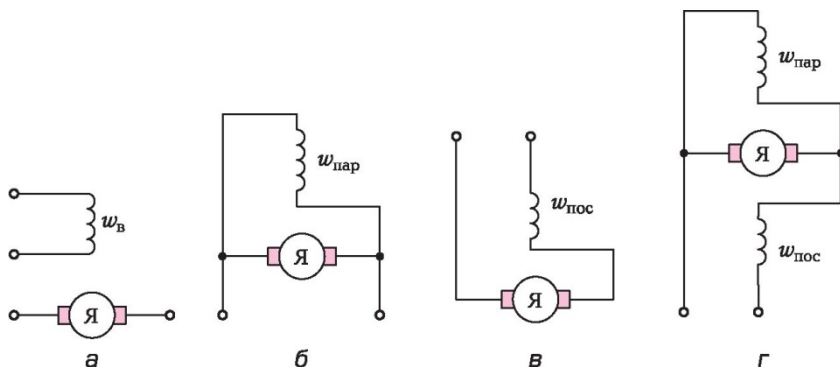
Тұрақты ток машиналарының жұмыс сипаттамалары басты полюстердің электромагниттерінің орамаларын, яғни қоздыру тізбегін, салыстырмалы түрде зәкір тізбегін қосу тәсіліне байланысты. Қоздыру және зәкір тізбектері параллель, тізбектей және аралас жалғануы мүмкін. Қоздыру және зәкір тізбектері бір-бірінен тәуелсіз болуы мүмкін.

Тәуелсіз қозатын машиналарда w_k қоздыру орамасы тәуелсіз көзге қосылады (9.12-сурет, а), ал басты полюстердің магнит өрісі машина жүктемесіне тәуелді болмайды.

Параллель қозатын машиналарда $w_{\text{пар}}$ қоздыру орамасы зәкір тізбегімен параллель жалғанады (9.12-сурет, б), оларда аз қималы сымнан жасалған орамдарының саны көп және біршама активті кедергісі бар. Бұл машиналарда қозу тогы, сәйкесінше, басты полюстердің магнит ағыны машина шықпаларының арасындағы кернеу тұрақты болған кезде оның жүктемесіне тәуелді болмайды. Қозу тогының мәні аз ($I_k < 0,1 I_{\text{з.ном}}$).

Тізбектей қозатын машиналарда $w_{\text{бір}}$ қоздыру орамасы зәкір тізбегімен тізбектей жалғанады (9.12-сурет, в), оларда жоғары қималы сымнан жасалған орамдарының саны аз және шағын активті кедергісі бар. Бұл машиналарда қоздыру басты полюстердің магнит ағыны машина жүктемесіне, яғни қозу тогына тең зәкір тогына тәуелді болады.

Аралас қозатын машиналарда басты полюстің әр өзекшесінде екі орама орналасады (9.12-сурет, г), бірі $w_{\text{пар}}$ зәкір тізбегімен параллель жалғанады, екіншісі $w_{\text{бір}}$ зәкір тізбегімен тізбектей жалғанады. Әдетте орамалар сәйкес қосылады және олардың МҚК қатынасы байланысты параллель не тізбектей қозатын машинаның қасиеттеріне ие.



9.12-сурет

Тұрақты ток машинасының айналмалы зәкірі өзекшесінің ойығындағы сым (9.13-сурет) басты полюстің магнит өрісінің күш сызықтарын қиып өтеді және онда ЭҚК индуцирленеді, оның орташа мәні:

$$E_1 = Blv = \Phi v / \tau$$

мұндағы $B = \Phi v / l\tau$ — τ полюсті бөлініс енінің шегіндегі полюс астындағы магниттік индукцияның орташа мәні; Φ — бір басты полюстің магнит ағыны; l және v — зәкір өзекшесінің ойығындағы сымның ұзындығы мен шеңберлі жылдамдығы.

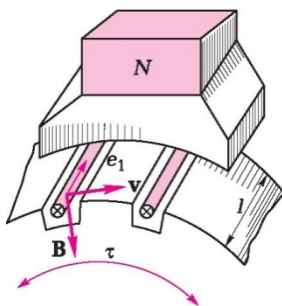
Егер машина зәкірінің айналу жиілігі n_1 болса, ай/мин, онда өзеке ойықтарындағы сымдарының шеңберлі жылдамдығы:

$$v = pDn/60 = 2\pi n/60,$$

мұндағы p — машина полюстері жұптарының саны және сыртқы диаметрі D зәкір шеңберінің ұзындығы $pD = \tau 2p$ деп есептелген.

Зәкір орамасы N активті сымдардан тұрады. Қылшақтар бұл ораманы $2a$ параллель тармақтарға бөледі, олардың әрқайсысында $N/2a$ активті сымдар тізбектей жалғанады.

Сәйкесінше, зәкір ЭҚК-і бір параллель тармақтың ЭҚК-іне тең болады:



9.13-сурет

немесе

$$E_s = E_1 N / (2a),$$

$$E_s = \frac{p}{a} N \Phi \frac{n}{60} = c_E \Phi n,$$

(9.5)

мұндағы c_E — берілген машинаға арналған тұрақты шама.

Генераторда зәкір ЭҚК-і зәкір тізбегінде I_s тогын қоздырады және онымен бағыт бойын-

ша сәйкес келеді (9.9, *г* суретін қараңыз). Қозғалтқышта E_3 ЭҚК I_3 тогына қарсы бағытталған (9.11, *в* суретін қараңыз) және ол *қарсы ЭҚК* деп аталады.

Зәкір ЭҚК-ң мәнін басты полюстердің магнит ағынын немесе зәкірдің айналу жиілігін өзгерту арқылы реттеуге болады.

Тұрақты ток машиналарының генератор (қозғалтқыш) режиміндегі жұмысында зәкір тогының басты полюстердің магнит өрісімен өзара әрекеттесуі тежеу (айналу) моментін тудырады. Бұл режимдерде энергияны беру бағыты әртүрлі болады, бірақ зәкірде әрекет ететін *электрмагниттік моменттердің* табиғаты бірдей болады.

Зәкір орамасының N активті сымдарының әрқайсысында оның машина полюстерінің астында қозғалу уақытының ішінде орташа күш әрекет етеді: $F_1 = BIl$. Бұл күштердің қосындысы зәкірге әсер ететін электрмагниттік момент тудырады:

$$M_{эм} = D N B I l.$$

$I = 4/2$ а, $B = \Phi/l\tau$ және $pD = 2p\tau$ қатынастары алмастырылғаннан кейін мына теңдеуді аламыз:

$$M_{эм} = 1/2\pi p/a N \Phi I_3 = c_m \Phi I_3, \quad (9.6a)$$

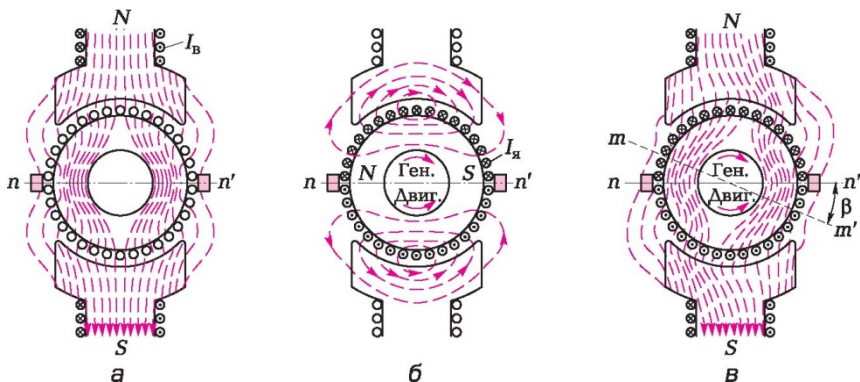
мұндағы $c_m = c_E \cdot 60/(2\pi)$ — берілген машинаға арналған тұрақты шама немесе (9.5) өрнекті ескергенде:

$$M_{эм} = E_3 I_3 / \Omega_{ай} \quad (9.6b)$$

мұндағы $\Omega_{ай} = 2\pi p/60$ — зәкірдің бұрыштық айналу жылдамдығы.

9.6. ТҰРАҚТЫ ТОК МАШИНАЛАРЫНДАҒЫ ЗӘКІР РЕАКЦИЯСЫ

Зәкір реакциясы деп зәкір тізбегіндегі токтың машинаның магнит өрісіне әсерін айтады. Екі полюсті машинадағы зәкір реакциясын байланыстыратын құбылысты қарастырайық. 9.14-суретте зәкір орамасының орамдары емес, секцияларының жақтары және секциялардың коммутацияланатын сымдарының тұсында зәкірге сүйенетін қылшақтар шартты түрде көрсетілген. Шын мәнінде, қылшақтар коллекторға сүйенеді және басты полюстердің симметрия



9.14-сурет

осында орналасқан (9.6 және 9.7-суреттерді қараңыз).

Зәкір тізбегі ажыратылған, яғни ток $I_3 = 0$ болған кезде, машинаның магнит өрісі басты полюстердің орамасында I_k қозу тогымен ғана туады. Ол полюс өзекшелерінің осыне қатысты симметриялы және полюс ұштықтарының астында дерлік біркелкі (9.14-сурет, а). *Геометриялық бейтараптама* $n-n'$ — полюстердің осыне перпендикуляр және зәкірді диаметрі бойынша солтүстік және оңтүстік полюстерге бөлетін сызық бұл жағдайда *физикалық бейтараптамамен* — m' — магниттік индукция нөлге тең болатын зәкір шеңберіндегі нүктелер арқылы өтетін сызықпен сәйкес келеді. Қылшақтар геометриялық бейтараптамада орналасады.

Егер зәкір орамасындағы ток нөлге тең болса, онда зәкір қылшақтар арқылы өтетін симметрия осьті электрмагнит болып есептеледі (9.14-сурет, б). Қылшақтар геометриялық бейтараптамада орналасқан кезде басты полюстер мен зәкірдің магнит өрістерінің симметрия осы перпендикуляр болады. Зәкір реакциясының мұндай өрісі *көлденең* деп аталады. Егер қылшақтар геометриялық бейтараптамаға қатысты жылжыған болса, онда зәкір реакциясының *бойлық* өрісі туындайды.

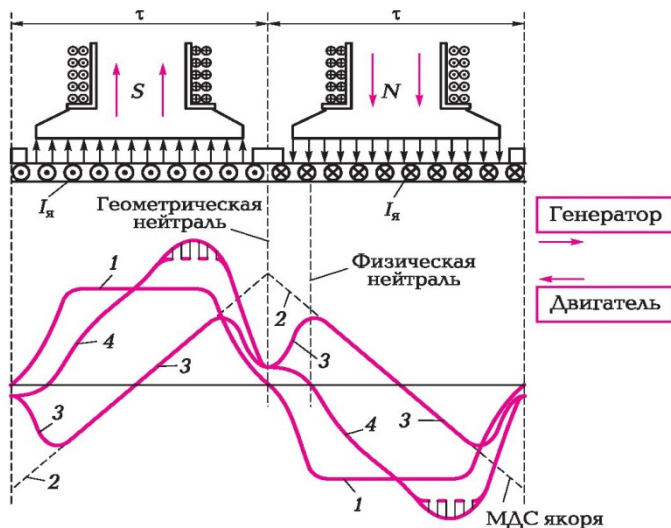
Басты полюстер мен зәкірдің магнитті өрістерін қабаттастыру машинаның қорытқы магнит өрісін тудырады (9.14, в суретін қараңыз), ол басты полюстердің осыне қатысты бейсимметриялы болады. Физикалық бейтараптама геометриялық бейтараптамаға қатысты машина жұмысының генераторлық (қозғалтқыш) режимінде зәкірдің айналу бағытында (бағытына қарсы) β бұрышына жылжиды.

Зәкір реакциясының салдарынан геометриялық бейтараптамада орналасқан полюсті ұштықтар мен қылшақтардың астындағы магниттік индукциясының бөлінуін қарастырайық. Зәкір реакциясы

болмаған жағдайда (9.14, *а* суретін қараңыз), басты полюстер өрісінің магниттік индукциясы полюсті ұштықтардың астында біркелкі орналасады және қылшақтардың астында нөлге тең болады (9.15-сурет, 1-тәуелділік).

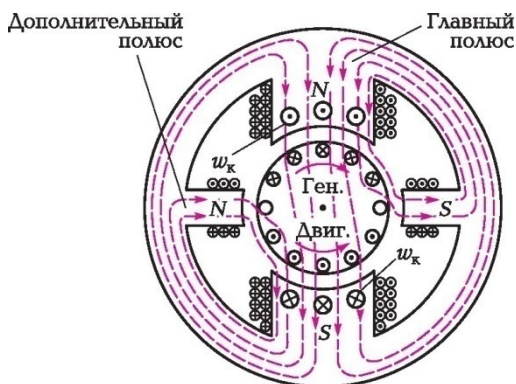
Магнит сызықтары контурларының МҚК-і (9.14, *б* суретінде штрих сызықтар) олардың қамтып жатқан I_z тоқты орамдарының санына пропорционал және зәкір шеңберінің бойымен сызықтық негізде өзгереді (9.15-суретті қараңыз, 2-тәуелділік). Бұл МҚК магнит кернеуін, сәйкесінше, ұзындықтары шағын магнит сызықтарының ауа бөліктерінің бойындағы индукцияны анықтайды, полюсті ұштықтардың астында тұрақты және олардың арасында айтарлықтай өседі. Соның салдарынан зәкір реакциясы өрісінің магниттік индукциясының полюстер арасында орналасуы ершік тәрізді сипатта болады (9.15-сурет, 3-тәуелділік).

Машинаның магнит өткізгіші қанық емес болса, оның қорытқы магнит өрісі басты полюстердің магнит өрістері мен зәкір реакциясын қабаттастыру арқылы анықталады. Бұл ретте зәкір ЭҚК-ін қоздыратын магнит ағыны өзгеріссіз қалады, бірақ зәкір шеңберінің бойындағы магниттік индукцияның орналасуы өзгереді (9.15-сурет, 4-тәуелділік). Физикалық бейтараптама геометриялық бейтараптамаға



Геометрическая нейтраль – геометриялық бейтараптама; физическая нейтраль – физикалық бейтараптама; генератор – генератор; двигатель – қозғалтқыш; МДС якоря – зәкір МҚК-і

9.17-сурет



Дополнительный полюс – қосымша полюс; главный полюс – басты полюс
9.16-сурет

қатысты генератор (қозғалтқыш) режиміндегі зәкірдің айналу бағытында (бағытына қарсы) жылжиды.

Полюсті ұштықтар астында магниттік индукцияның жергілікті артуы зәкір орамасының секцияларында ЭҚК-ң жоғары мәндерін индуцирлейді. Сәйкесінше коллектордың көршілес тілімдерінің арасында кернеу жоғарылайды (30-50 В астам) және олардың арасында доға разрядтардың пайда болу мүмкіндігі артады.

Машинаның магнит өткізгішінің қанықтығын ескеретін болсақ, полюсті ұштықтың бір шетінің астында индукцияның артуы зәкір тісшелерінің қанықтануына, басты полюстердің магнит ағынының әлсіреуіне (9.15-суретті қараңыз, 4-тәуелділік графигінің штрихтелген бөлігі) және зәкір ЭҚК-ң азаюына әкеледі.

Геометриялық бейтараптамада индукцияның нөлден басқа мәні қылшақтардың астында ұшқындануға әкеліп, зәкір орамасы секцияларының коммутациялану жағдайларын нашарлатады.

Зәкір реакциясының машина жұмысына теріс әсерін азайту үшін қосымша полюстер пайдаланылады. Олар тұғырға геометриялық бейтараптама сызықтары бойынша бекітіледі. Қосымша полюстердің орамалары қылшақтар арқылы зәкір орамасымен олардың МКК-і (9.16-сурет) геометриялық бейтараптаманың бойымен қарсы бағытталатындай етіп тізбектей жалғасады. Зәкір реакциясының өтелімі машинаны кез келген жүктеу кезінде автоматты түрде жүзеге асырылады.

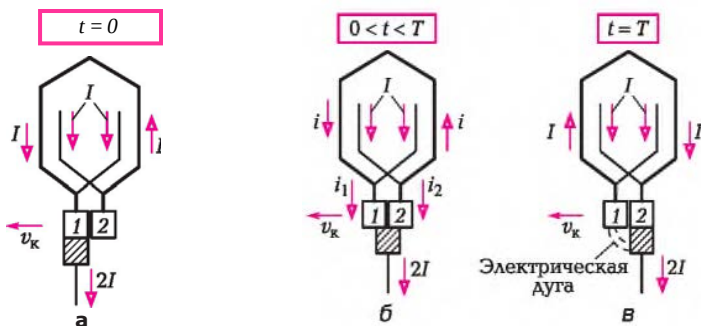
Машинаның генератор (қозғалтқыш) режиміндегі жұмысында қосымша полюстерде зәкір қуалай жүретін (астынан зәкір жүретін) басты полюстердің полярлығы болуы тиіс.

Қосымша полюстер секциялар коммутациясының тар аймағында зәкір реакциясының магнит өрісінің орнын толтырады. Жоғары уақытты машиналарда полюсті ұштықтардың астында индукцияның бөлінуін теңестіру үшін *w₀ өтемдеуші орамасын* пайдаланады. Оның орамдары полюсті ұштықтардың ойықтарында орналасады және қылшақтар арқылы зәкір орамасымен тізбектей жалғанып, онымен бифилярлы орама жасайды (9.16-суретті қараңыз).

9.6. ТҰРАҚТЫ ТОК МАШИНАЛАРЫНДАҒЫ КОММУТАЦИЯ

Тұрақты ток машинасының зәкірі айналған кезде оның орамасының секциялары бір параллель тармақтан екіншісіне кезек-кезекпен өтеді (9.17-сурет). Айналмалы зәкір орамасының жалпақ сызықпен белгіленген секциясы қылшақпен тұйықталатын уақыт T *коммутация кезеңі* деп аталады.

Коммутация талдауын жеңілдету үшін қылшақтың ені коллектордың бір тілімінің еніне тең деп және олардың арасындағы R_0 контакт кедергісі кеңістіктік сәйкестік жағдайында тұйықталған секция тізбегінің басқа элементтерінің кедергісінен өте көп деп аламыз. Коммутацияланатын секция мен қылшақтың бастапқы, яғни $t = 0$ кезіндегі қалпын қабылдаймыз, олардың орналасуы 9.17-суретте көрсетілген, сондай-ақ коммутацияланатын секцияның индуктивті параметрлерін елемейміз. Бұл жағдайда оның коммутация кезеңіндегі электрлік күйі $0 \leq t \leq T$ 9.17, б суретіндегі тізбектің бірінші және екінші Кирхгоф заңдары бойынша теңдеулер жүйесімен анықталады:



Электрическая дуга – электр доғасы
9.17-сурет

$$\begin{aligned} i &= i_1 - I; \\ i_1 &= 2I - i_2; \\ \frac{i_1}{i_2} &= \frac{R_2}{R_1}, \end{aligned} \quad (9.7)$$

мұндағы i_1 және i_2 — v_k тұрақты шеңберлі жылдамдығымен айналатын коллектордың бірінші және екінші тілімдерідегі токтар; i — коммутацияланатын секциялағы ток; I — зәкір орамасының бір тармағындағы тұрақты ток; $R_1 = \frac{R_0}{T-t}T$, $R_2 = \frac{R_0}{t}T$ — коллектордың бірінші

және екінші тілімдері мен қылшақтың арасындағы контакт кедергілері.

(9.7) теңдеу жүйесінің шешімі коммутацияланатын секциядағы ток өзгерісінің сызықтық тәуелділігін анықтайды:

$$i = I \frac{T-2t}{T}$$

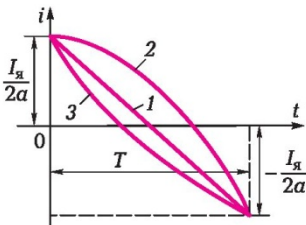
немесе

$$i = \frac{I_{\pi}}{2a} \frac{T-2t}{T}$$

мұндағы I_{π} — зәкір тогы; $2a$ — жай ілмекті ораманың параллель тармақтарының саны (9.18-сурет, түзу 1).

Қаралып отырған жағдайда ток тығыздығы бүкіл қылшақ астында бірдей және бүкіл коммутация кезеңінде тұрақты, сондай-ақ ұшқындауға еш себеп жоқ. Коммутацияланатын секцияның меншікті индуктивтілігін ескеретін болсақ, оның e_L өзіндік индукция ЭҚК-і Ленц принципі бойынша (3.8-бөлімшені қараңыз) ток өзгерісіне қарсы әрекет етіп, баяу коммутация жағдайын тудырады (9.18-сурет, 2-тәуелділік).

Коммутация кезеңінің соңында секция тогы мәжбүрлі түрде ($-I_{\pi}/2a$) мәнін және оның өзгеру жылдамдығын қабылдайды, сәйкесінше, өзіндік индукция ЭҚК-і ұлғаяды, бұл коллектордың кететін тілімі жақтан қылшақтың астында ұшқын түзілуіне әкелуі мүмкін. Коммутация шартын жақсарту үшін, өзіндік индукция ЭҚК-ң әсерінің орнын толтыру қажет. Ол үшін қосымша полюстер пайдаланылады. Олардың магнит өрісі коммутацияланатын секцияда өзіндік индукция ЭҚК әсеріне кедергі болатын коммутациялық e_k ЭҚК индуцирлейді. Идеалды коммутация шартын жазайық:



9.18-сурет

$$e_L - e_K = 0.$$

Егер коммутациялық ЭҚК мәні өздігінен индукцияланатын ЭҚК мәнінен үлкен болса, яғни $e_K > e_L$, болса, онда *тез коммутация* болуы мүмкін (9.18-сурет, 3-тәуелділік). Соңғысы ауыр жағдайларда, мысалы жиі реверстелу жағдайында жұмыс жасайтын машиналарда пайдаланылады.

Қосымша полюстердің магнит өрісі геометриялық бейтараптамада зәкір реакциясының магнит өрісінің де орнын толтырады (9.5-суретті қараңыз), бұл коммутация шартының жақсаруына ықпал етеді. Аз қуатты машиналарда қосымша полюстер көбінесе болмайды, сонымен қатар коммутацияны жақсарту үшін қылшақтарды геометриялық бейтараптамадан физикалық бейтараптамаға *жылжыту* қолданылады (9.15-суретті қараңыз).

Қаралып отырған коммутациялық қылшақтың идеалдандырылған моделінен айырмашылығы – ораманың бірнеше секциясын коммутациялай отырып, коллектордың бір уақытта бірқатар тілімдерін жабады.

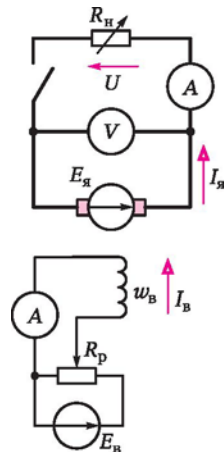
9.8. ТӘУЕЛСІЗ ҚОЗАТЫН ГЕНЕРАТОР

Тәуелсіз қозатын генераторда қоздыру тізбегі мен зәкір тізбегі электрдің тұрғыда ажыратылған (9.19-сурет). Қозу тогының R_p реостатымен өзгеруі басты полюстердің магнит ағынын және зәкірдің ЭҚК-ін пропорционал өзгертеді (9.5)

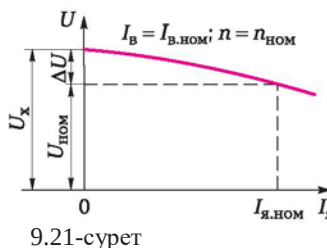
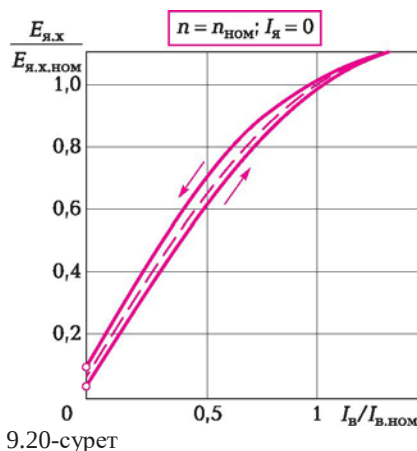
$$E_3 = c_E \Phi n,$$

мұндағы n — зәкірдің айналу жиілігі.

Φ (I_a) немесе $E_{3.ж}$ (I_a) бос жүріс сипаттамасы зәкірдің ажыратылған тізбегіндегі, яғни $I_3 = 0$ тогындағы және $n = n_{ном}$ тұрақты айналу жиілігіндегі генератордың магнит тізбегінің қасиеттерін анықтайды. 9.20-суретте әуелі қозу тогы ұлғайған, одан кейін азайған кездегі генератордың бос жүрісінің үлгілік сипаттамасы келтірілген. Үдемелі тармақта $E_{3.ж}$ ЭҚК мәні мен Φ магнит ағынының сипаттамалары ток болмаған кезде $I_B = 0$ нөлге тең болмайды. Бұл генератордың мас-



9.19-сурет



сивті тұғырында магниттік индукцияның қалғанымен түсіндіріледі.

Бос жүріс сипаттамасының жоғары және төмен тармағының сәйкес келмеуі магниттік гистерезиспен түсіндіріледі (3.10-сурет). Сипаттаманың төмен тармағындағы қалдық магниттелу тұрақсыз және механикалық діріл мен басқа да факторлардың әсерінен бастапқы жағдайларға сәйкес келетін мәндерге дейін азаюы мүмкін.

Қозу тогының $I_{\kappa} > I_{\text{в.ном}}$ мәндерінде Φ және $E_{\text{з.ж}}$ ағыны өзгерістерінің азаюы магнит тізбегінің қанықтануымен түсіндіріледі. Оны 9.20-суретте штрих сызықпен белгіленген бос жүрістің орташа сипаттамасында қозу тогының номиналды мәніне $I_{\kappa} = I_{\text{к.ном}}$ магнит тізбегінің қанық және қанық емес күйінің шекарасындағы номиналды магнит ағыны $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$ сәйкес келетіндей етіп есептейді.

Сыртқы сипаттама (9.21-сурет) шықпаларына қозу тогының номиналды мәндерінде $I_{\text{в}} = I_{\text{к.ном}}$ және зәкірдің айналу жылдамдығы $n = n_{\text{ном}}$ болғанда $R_{\text{ж}}$ жүктеме кернеуі бар қабылдағыш қосылған генератордың қасиеттерін анықтайды:

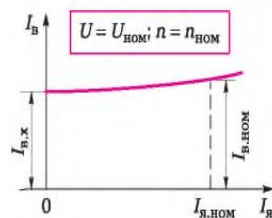
$$U = E_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}$$

мұндағы $R_{\text{з}}$ — зәкір тізбегінің кедергісі.

$U(I_{\text{а}})$ сипаттамасының сызықсыздығы зәкір реакциясының ұлғаю салдарынан жүктеме ұлғайған кезде машинаның басты полюстерінің магнит ағынының азаюымен түсіндіріледі (9.15-суретті қараңыз).

Тәуелсіз қозатын генератор кернеуінің максималды салыстырмалы өзгеруі оның жүктемесі $0 < I_3 < I_{3, \text{НОМ}}$ шегінде өзгерген кезде:

$$\Delta U = \frac{U_x - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} 100\% = \frac{E_{\text{я.х.НОМ}} - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} 100\% \quad (9.8)$$



9.22-сурет

5 —10% мәніне ие.

Генератордың сыртқы сипаттамасы жүктеме тогына тәуелді болмауы үшін, қозу тогын реттеу қажет.

Генератордың реттеуші сипаттамасы деп айналу жиілігінің n — $n_{\text{НОМ}}$ номиналды мәндерінде және оның шықпаларының арасындағы кернеу $U = U_{\text{НОМ}}$ болғанда $I_k(I_3)$ тәуелділігін айтады (9.22-сурет). Зәкір тогы $I_3 > I_{3, \text{НОМ}}$ болған кезде генератордың қозу тогы оның магнит тізбегінің қанығу салдарынан тез ұлғаяды.

Тәуелсіз қозатын генераторлардың негізгі артықшылығы — оның шықпаларының арасындағы кернеуді кең шеңберде реттеу мүмкіндігі.

Негізгі кемшілігі — қоздыру тізбегі үшін қосымша энергия көзіне қажеттілік.

9.9. ПАРАЛЛЕЛЬ ҚОЗАТЫН ГЕНЕРАТОР

Параллель қозатын генераторда қоздыру тізбегі мен зәкір тізбегі параллель жалғанған (9.23-сурет). Қоздыру орамасы $w_{\text{пар}}$ орамдардың көп мөлшерін қамтиды және аз қималы сыммен жасалады.

Генераторды іске қосқан кезде басты полюстердің магнит ағынын тудыру үшін *өздігінен қозу* тәсілі қолданылады. Оның мәнісі мынадан тұрады. Генератордың магнит тізбегінде массивті тұғыр есебінен қалдық магниттену және сәйкесінше басты полюстердің қалдық магнит ағыны сақталады (номиналды мәннің 3%-ына дейін). Генератор зәкірі бастапқы қозғалтқышпен айналған кезде қалдық магнит ағыны оның орамасында шағын E_3 ЭҚК индуцирлейді. ЭҚК әсерімен қоздыру орамасының тогы және оның МҚК-і ұлғаяды. Егер МҚК мен қалдық магнит ағынының әрекет ету бағыттары сәйкес келсе, онда басты полюстердің магнит ағыны ұлғайып, зәкір ЭҚК-ң үлкен мәнін индуцирлейді, аталмыш сәйкестікке қоздыру орамасын тізбекке сәйкесінше қосу арқылы іске асады. E_3 ЭҚК ұлғаюы қозу тогының одан әрі ұлғаюын тудырады және т.б. Өздігінен қозу процесі

генератордың магнит тізбегінің қанығуымен және бос жүріс режимінде шектеледі, яғни жүктеме тізбегі ажыратулы болған кезде мына шартпен анықталады:

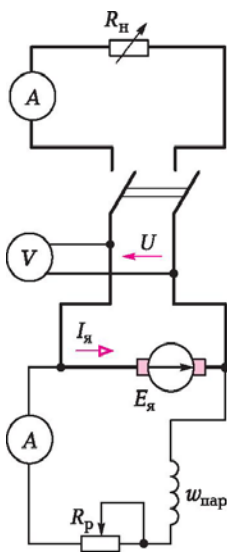
$$E_{3,ж} = (R_K + R_3 + R_p)I_K, \quad (9.9)$$

мұндағы R_K , R_3 және R_p — қоздыру орамасының, зәкір тізбегінің және реттеуші реостаттың кедергілері; $E_{3,ж}$ — бос жүріс режиміндегі зәкір ЭҚК-і.

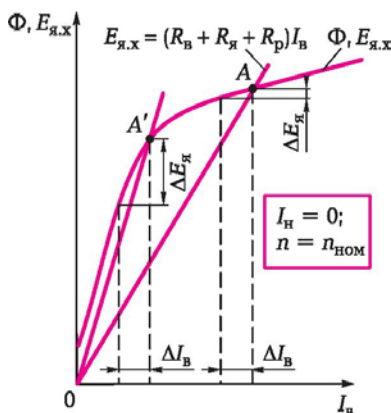
Генератордың бос жүріс сипаттамасы $E_{3,ж}(I_K)$ жылдамдығы $n = n_{\text{ном}}$ болғанда және жүктеме тогы $I_{жс} = 0$ болғанда (9.24-сурет) тәуелсіз қозатын генератордың аттас сипаттамасымен сәйкес келеді (9.20-суретті қараңыз).

Бос жүріс сипаттамасы мен сызықтық тәуелділіктің қиылысы (9.9) бос жүріс режимінде параллель қозатын генератордың жұмыс режимін анықтайды (9.24-суретті қараңыз, A нүктесі).

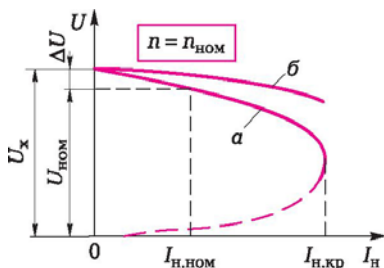
Қоздыру тізбегінің кедергісі ұлғайған кезде $E_{3,ж}$ ЭҚК азаяды. $E_{3,ж}$ ЭҚК-ң біркелкі азаюы A' нүктесіне дейін болады (9.24-суретті қараңыз), ол кезде (9.9) сызықтық тәуелділігі іс жүзінде бос жүріс сипаттамасының бастапқы бөлігімен сәйкес келеді.



9.23-сурет



9.24-сурет



9.25-сурет

Қоздыру тізбегі кедергісінің одан әрі біраз ұлғаюы $E_{з.ж}$ ЭҚК-ң және генератор шықпаларының арасындағы кернеудің күрт азаюына әкеледі. Қоздыру тізбегінің сәйкес кедергісі *сыни кедергі* деп аталады.

Параллель қозатын генератордың $U(I_n)$ *сыртқы сипаттамасы* айналу жиілігі $n = n_{ном}$ өзгеріссіз болғанда, тәуелсіз қозатын генератордың аттас сипаттамасына қарағанда (9.26-сурет, б тәуелділігін қараңыз), жүктеме тогына көбірек тәуелді болады (9.25-сурет, а тәуелділігі). Бұл тәуелсіз қозу кезінде генератор шықпаларының арасындағы кернеудің төмендеуі әзір тізбегі кедергісіндегі кернеудің төмендеуімен және әзір реакциясымен, ал параллель қозу кезінде қозу тогының азаюымен де анықталатынымен түсіндіріледі. Жүктеме тогы жоғарыда қаралған себептерге ұқсас себептер бойынша ұлғайған кезде қозу тогының азаюы (9.24-суретті қараңыз) генератордың өздігінен қозу олқылығына әкелуі мүмкін (9.25-суретті қараңыз, штрих сызық).

Өздігінен қозу олқылығына сәйкес келетін жүктеме тогы *сыни ток* деп аталады. Оның типтік мәні $I_{с.ж} = (2 — 2,5)I_{ж.ном}$.

Параллель қозатын генератор кернеуінің максималды салыстырмалы өзгеруі оның жүктемесі (9.8) бойынша $0 < I_{ж} < I_{ж.ном}$ аралығында өзгерген кезде 10-15%-ға жетеді.

Параллель және тәуелсіз (9.22-суретті қараңыз) қозатын генераторлардың реттеуші сипаттамаларының сипаты ұқсайды.

Параллель қозатын генератордың негізгі артықшылығы – қозу тізбегі үшін қосымша энергия көзінің болмауы және конструкциясының қарапайымдылығы.

Негізгі кемшілігі – тәуелсіз қозатын генератормен салыстырғанда жүктеме ауытқулары кезінде кернеудің көп өзгеруі.

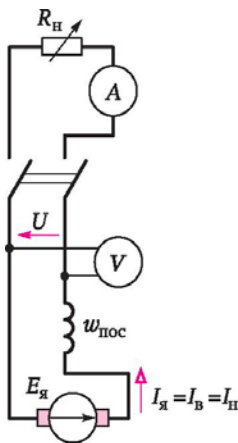
9.10. ТІЗБЕКТЕЙ ЖӘНЕ АРАЛАС ҚОЗАТЫН ГЕНЕРАТОРЛАР

Тізбектей қозатын генераторда зәкір тізбегі қозу орамасымен тізбектей жалғанған, сондықтан жүктеме, зәкір және қозу токтары бірдей болады (9.26-сурет). $w_{\text{тіз}}$ қозу орамасында орамдар саны аз және ол үлкен қималы сыммен жасалады. Тізбектей қозатын генератордың бос жүріс сипаттамалары жоқ, себебі ажыратылған жүктеме тізбегінде қозу тогы жоқ. Реттеуші сипаттама да жоқ.

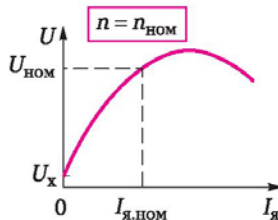
Генератордың айналу жиілігінің номиналды мәні $n = n_{\text{ном}}$ кезіндегі сыртқы сипаттамасы 9.27-суретте келтірілген. $R_{\text{ж}}$ жүктеме кедергісі бар қабылдағышты генератор шықпаларына қосқан кезде соңғысы өздігінен қозады (9.9-бөлімшені қараңыз). Генератор кернеуі жүктеме тогы, сәйкесінше қозу тогы ұлғайған кезде әуелі ұлғаяды, одан кейін азаяды. Бұл генератордың магнит тізбегінің қанығуымен, зәкір реакциясының ұлғаюымен және зәкір мен қозу орамаларында кернеудің төмендеуімен түсіндіріледі.

Тізбектей қозатын генераторлар кернеуінің тұрақсыздығына байланысты арнайы жағдайларда ғана қолданылады.

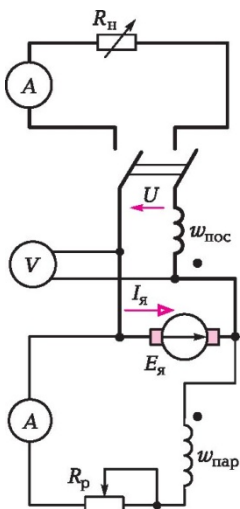
Аралас қозатын генератордың сәйкесінше орам саны көп және аз параллель $w_{\text{пар}}$ және тізбектей $w_{\text{тіз}}$ қозу орамасы болады (9.28-сурет). Екі орама да басты полюстерде орналасады және сәйкес қосылады.



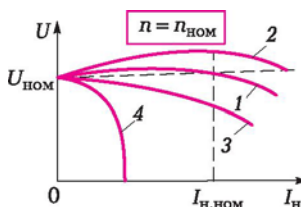
9.26-сурет



9.27-сурет



9.28-сурет



9.29-сурет

Жүктеме тогы ұлғайған кезде тізбектей қозу орамасының МКК-і, басты полюстердің магнит ағыны және E_3 ЭҚК-і ұлғайып, зәкір орамасындағы кернеудің төмендеуі мен оның реакциясы ұлғаюының орнын толтырады.

Қозу орамалары генератордың *сыртқы сипаттамасы* бос жүріс режиміндегі $n = n_{\text{ном}}$ зәкірдің номиналды айналу жиілігінде және номиналды жиілікте номиналды кернеуге сәйкес келетіндей етіп есептеледі (9.29-суре, 1-тәуелділік). Тізбектей ораманың орамдар саны ұлғайған (азайған) кезге сыртқы сипаттама 2-тәуелділік (3-тәуелділік) түрінде болады.

Аралас қозатын генераторлар шағын қуатты электр энергиясының автономды көздері ретінде пайдаланылады. Мұндай генераторларды жалпы желіге қоспаған дұрыс. Бастапқы қозғалтқыштың қуаты кездейсоқ азайған жағдайда зәкірдің айналу жиілігі және оның орамында индукцияланатын E_3 ЭҚК-і азаяды, оның мәні желі кернеуінен аз болуы мүмкін. Бұл тізбектей қозу орамасында ток бағытының өзгеруіне, басты полюстердің магнит ағынының және бастапқы қозғалтқыш білігіндегі тежеу моментінің азаюына, сондай-ақ процесс үдеген жағдайда ауыр аварияларға әкеледі.

Кейбір қабылдағыштардың жұмыс жағдайы – кернеудің үлкен ауытқуларында токтың тұрақтылығы болып табылады. Мысалы, прожекторлық және дәнекерлегіш қондырғылар.

Мұндай қабылдағыштарды автономды қуаттау үшін сыртқы сипаттамасы (9.29-суретті қараңыз, 4-тәуелділік) параллель және тізбектей ораманы қарсы қосу арқылы анықталатын, аралас қозатын генераторлар пайдаланылуы мүмкін.

Аралас қозатын генераторлардың негізгі артықшылығы – параллель қозатын генераторлармен салыстырғанда жүктеме ауытқулары кезінде оның шықпаларының арасындағы кернеудің жоғары тұрақтылығы.

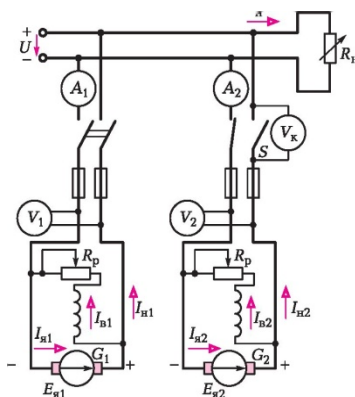
Негізгі кемшілігі – параллель қозатын генераторлармен салыстырғанда жұмыс кезінде жалпы желіге төмен тұрақтылығы.

9.11. ПАРАЛЛЕЛЬ ҚОЗАТЫН ГЕНЕРАТОРЛАРДЫҢ ПАРАЛЛЕЛЬ ЖҰМЫСЫ

Жоғары қуатты желіге $U = \text{const}$ кернеуімен параллель қосылған екі генератордың жұмысын қарастырайық (9.30-сурет). Әуелі желіге бірінші G_1 генераторы қосылған және оның шықпаларының арасындағы кернеу желі кернеуіне тең $U_1 = U$ дейік. Желіге екінші G_2 генераторын қосу үшін:

- G_2 генераторының зәкірін $n = n_{\text{ном}}$ номиналды айналу жиілігіне дейін тарқату;
- $I_{\kappa 2}$ қозу тогын реттей отырып, оның шықпаларының арасында бос жүріс режимінде $U_{26} = U$ желі кернеуіне тең кернеу орнату;
- ажыратылған бір полюсті S ажыратқышындағы G_2 генераторы мен V_{κ} вольтметр желісі кернеулерінің полярлықтарының сәйкестігін тексеру қажет. Полярлықтары сәйкес келген жағдайда V_{κ} вольтметрінің көрсетімі нөлге тең, сәйкес келмесе $2U$ -ға тең.

Жоғарыда аталған шарттар орындалған жағдайда және бір полюсті S ажыратқышы тұйықталған жағдайда G_2 генераторы жүктемесіз G_1 генераторына параллель қосылады. Желінің U тұрақты кернеуінде және $I_{\text{ж}}$ жүктеме тогында G_1 генераторының жүктемесі кеміп, ал G_2 генераторы жүктелу үшін, генератордың қозу тогы мен бастапқы қозғалтқыштың айналу моментін тұрақты айналу жиілігімен біріншісінде бірқалыпты азайтып, ал екіншісінде қажетті мәндерге дейін бір мезетте ұлғайту қажет. G_1 және G_2 генераторларының білік-



9.30-сурет

теріндегі тежеу моменттері сәйкесінше азайып, ұлғаяды.

Бұл ретте жүктеме токтары тең:

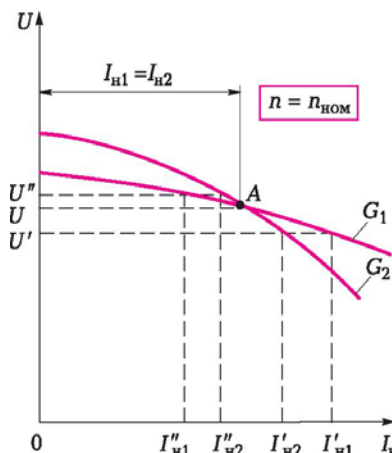
$$I_{ж1} = I_{31} = (E_{31} - U)/R_{31}$$

$$I_{ж2} = I_{32} = (E_{32} - U)/R_{32}$$

мұндағы E_{31} , E_{32} және R_{31} , R_{32} — генератор зәкірлері орамасының ЭҚК-і мен кедергілері.

Келтірілген қатынастардан G_1 генераторын іске қосқан кезде зәкір тогы өз бағытын өзгертетін $E_{31} < U$ шартының мүмкін емес екенін көреміз. Бұл ретте машина генератор режимінен қозғалтқыш режиміне ауысады, бұл ауыр аварияларға әкелуі мүмкін. Оларға жол бермеу үшін генераторларды ток бағыты өзгерген кезде өшіретін кері қуатты автоматты ажыратқыштар (10.6-бөлімшені қараңыз) қолданылады.

Егер желі автономды (9.30-суретті қараңыз) болса, яғни генератордан басқа энергия көздері болмаса, онда оның U кернеуі $I_{ж}$ жүктеме тогына тәуелді болады, ол генераторлардың сыртқы сипаттамалары бірдей болған кезде олардың арасында біркелкі бөлінетін болады. Егер генераторлардың сыртқы сипаттамалары әртүрлі болса, олардың арасындағы жүктеме сыртқы сипаттамаларының қиылысу нүктесіне сәйкес келетін режимде ғана біркелкі бөлінетін болады (9.31-сурет, A нүктесі). Жүктеме тогы ұлғайған (азайған) кезде желі кернеуі азаяды ($U' < U$) (ұлғаяды ($U'' > U$)),



9.31-сурет

көп (аз) жазық сыртқы сипаттамасы бар генератор жүктеменің көп (аз) бөлігін қабылдайды: $I_{ж1} > I'_{ж2}$ ($I_{ж1} < I_{ж2}$). Жүктеме бөлінісінің әркелкілігін генераторлардың қозу тогын реттей отырып, жоюға болады. Ол үшін автоматты реттеуіштер пайдаланылады.

9.12. ТҰРАҚТЫ ТОК ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРЫНЫҢ ЖАЛПЫ ҚАСИЕТТЕРІ МЕН СИПАТТАМАЛАРЫ

Тұрақты ток қозғалтқышында электромагниттік момент (9.6) $M_{\text{ай}}$ айналу моментін тудырады, ол тұрақты n айналу жиілігінде $M_{\text{теж}}$ тежеу моментімен теңеседі. Соңғысы жұмыс машинасының кедергі моментін және коллекторға қатысты үйкеліспен, мойынтіректердегі үйкеліспен байланысты шығын мен басқа да шығын моментін қамтиды. Одан әрі тұрақты ток қозғалтқыштарындағы процестердің талдануын жеңілдету үшін, арнайы ескертпелер болмаса, шығын елемейтін боламыз.

Өзін-өзі реттеу қасиеті. Тұрақты ток қозғалтқыштарының жалпы қасиеті *өзін-өзі реттеу*, яғни біліктегі механикалық жүктеме өзгерген кезде жаңа айналу жиілігімен тұрақты жұмысты автоматты түрде сақтап қалу болып табылады. Реттеуіштің рөлін зәкір орамасында индукцияланатын және зәкір тогына қарсы

бағытталған қарсы ЭҚК атқарады (9.11-суретті қараңыз).

Өзін-өзі реттеу механизмін қарастырайық. Қозғалтқыштың электр тізбегі шықпаларының арасындағы кернеу $U = \text{const}$ деп аламыз. Қозғалтқыш білігіндегі механикалық жүктеме, яғни $M_{\text{теж}}$ тежеу моменті секіріспен ұлғайды (азайды) дейік. Φ басты полюстердің магнит ағыны, $I_{\text{ж}}$ зәкір тогы және $M_{\text{ай}}$ айналу моменті (9.6) секіріспен өзгере алмайды, ал зәкірдің айналу жиілігі біркелкі азая (ұлғая) бастайды. Сонымен қатар, E_3 ЭҚК азая (ұлғая) бастайды және $I_{\text{ж}}$ зәкір тогы ұлғая (азая) бастайды, бұл айналу моментінің ұлғаюына (азаяуына) әкеледі. Өтпелі процесс зәкірдің жаңа аз (көп) айналу жиілігінде моменттердің тепе-теңдігі орнаған кезде $M_{\text{ай}} = M_{\text{теж}}$ аяқталады.

Механикалық сипаттамалар. Тұрақты ток қозғалтқыштарының маңызды сипаттамасы *механикалық сипаттама* $n(M_{\text{ай}})$ болып табылады – зәкірдің айналу жиілігінің механикалық жүктемеге, яғни біліктегі моментке тәуелділігі. Қозғалтқыштың механикалық сипаттамасының теңдеуін (9.3) зәкір тізбегінің электрлік күйінің теңдеуінен алуға болады, бұл ретте ол теңдеуге (9.5)-тегі E_3 ЭҚК өрнегін қою керек:

$$n = \frac{(U - R_3 I_3)}{c_E \Phi} \quad (9.10)$$

және (9.6a)-дағы I_3 ток өрнегін ескеру керек:

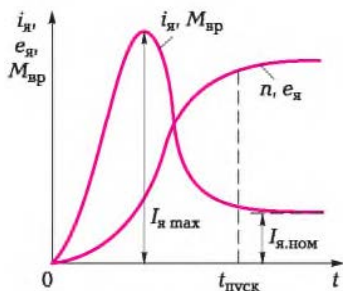
$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_E c_M \Phi^2} M_{\text{вр}}. \quad (9.11)$$

Табиғи және жасанды механикалық сипаттамалар болады.

Табиғи (жасанды) сипаттама деп қосымша резисторларды не реостаттарды қамтымайтын қозғалтқыш, зәкір тізбегі мен қозу тізбегі сипаттамаларын айтады.

Өзін-өзі реттеу нәтижесінде орнаған айналу жиілігі қозғалтқыштың және білігіндегі жұмыс механизмінің механикалық сипаттамаларының қиылысу нүктесімен анықталады.

Қозғалтқыштардың қасиеттері реттеуіш $n(I_{\text{к}})$, жылдамдықты $n(I_3)$, жұмыс n , I , $M_{\text{ай}}$, $\eta(M_{\text{теж}}, \Omega_{\text{ай}})$ және басқа да сипаттамалармен анықталады.



9.32-сурет

токтың максималды мәні $I_{3, \max}$ оның номиналды мәнінен 8-15 есеге асып түсіп, сонымен қатар соққы әсерінің үлкен айналу моментін тудыруы мүмкін (9.32-сурет).

Зәкір екпініне қарай орның орамасында индукцияланатын қарсыЭҚК ұлғайып, зәкір тізбегіндегі ток пен айналу моменті азаяды.

Жоғары іске қосу тогы коллекторда ұшқындануға әкеледі, ал соққы әсерлі жоғары іске қосу моменті механикалық берілістің қозғалмалы бөлшектері мен жұмыс машинасының жұмысына теріс әсер етеді.

Қозғалтқышты іске қосқан кезде токты шектеу үшін зәкір тізбегіне іске қосу реостатын қосады, оның кедергісі зәкірдің екпініне қарай нөлдік мәнге дейін азайтылады. Әдетте үстеме реостаттың кедергісі зәкір тогының максималды мәні іске қосу кезінде оның номиналды мәнінен 1,5-2,5 еседен артық аспайтындай етіп таңдалады.

Жоғары қуатты қозғалтқыштарды іске қосу жағдайларын жеңілдету үшін зәкір тізбегінде іске қосу реостатын пайдаланудан басқа, сонымен қатар қуаттау кернеуін төмендетеді және басты полюстердің магнит ағынын барынша ұлғайтады.

9.13. ПАРАЛЛЕЛЬ ҚОЗАТЫН ҚОЗҒАЛТҚЫШ

Параллель қозатын қозғалтқыштың қағидалық электрлік схемасы 9.33-суретте келтірілген. Зәкір R_n және қозу R_p тізбектеріндегі реостаттар қозғалтқышты іске қосу және оның жұмыс режимін реттеу кезінде пайдаланылады.

Қозғалтқыштарды іске қосу. Іске қосу секундтан бастап бірнеше ондаған секундтарға дейін ұзақтығы $t_{иск}$ өтпелі процестермен қатар жүреді. Алғашқы кезде қозғалтқышты U кернеулі қуаттау көзіне қосқаннан кейін қозғалмайтын зәкір тізбегінде қарсыЭҚК болмайды (9.3) және зәкір тізбегінің аз индуктивтілігінің салдарынан i_3 тогы тез ұлғайып, U/R_3 мәніне қарай ұмтылады. Номиналды қуаттау кернеуінде зәкір тізбегіндегі

Зәкір тізбегіндегі реостаттың R_{Π} кедергісін ескеретін болсақ, (9.10) және (9.11) теңдеулері мынадай болады:

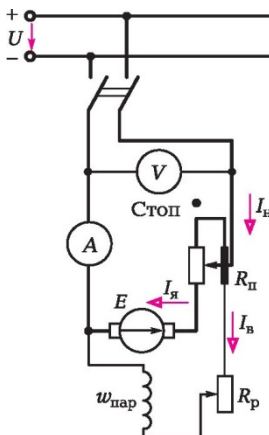
$$n = \frac{U - (R_{\text{я}} + R_{\Pi}) I_{\text{я}}}{c_E \Phi};$$

(9.12)

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\Pi}}{c_E c_M \Phi^2} M_{\text{вр.}}$$

(9.13)

(9.13) теңдеуі қозғалтқыштың жасанды механикалық сипаттамасын, ал $R_{\Pi} = 0$ кезінде табиғи механикалық сипаттамасын анықтайды (9.34-сурет).



Қозғалтқыштың табиғи механикалық сипаттамасы «қатаң» болып табылады, себебі оның білігіндегі жүктеме $0 < M_{\text{ай}} < M_{\text{ай.ном}}$ аралығында өзгерген кезде айналу жиілігін 3-8%-дан артық өзгертпейді (неғұрлым аз болса, қозғалтқыштың номиналды қуаты соғұрлым жоғары болады).

Зәкір тогы нөлге тең болған жағдайда, яғни оның білігінде тежеу моменті болмаған кезде, (9.12) теңдеуі қозғалтқыштың бос жүрісінің n_0 айналу жиілігін анықтайды. Қозғалтқыштың айналмалы бөліктеріндегі үйкеліс ылғи да шығындардың біраз тежеу моментін тудырады. Оны идеалды бос жүріс жағдайын іске асыру үшін көмекші қозғалтқыштың айналу моментімен жеңу қажет.

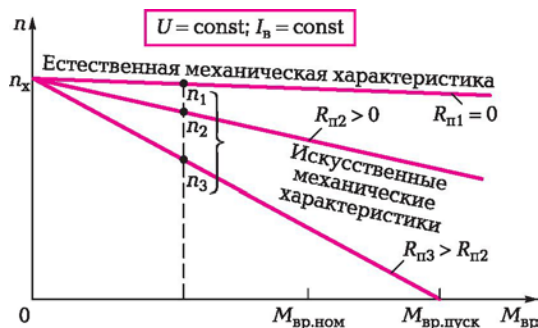


Рис. 9.34

Естественная механическая характеристика – табиғи механикалық сипаттама;
Искусственная механическая характеристика – жасанды механикалық сипаттама
9.34-сурет

(9.13) тендеуден U қуаттау кернеуі тұрақты болған кезде параллель қозатын қозғалтқыштың айналу жиілігін реттеу зәкір тізбегіндегі R_{Π} реостат кедергісін (реостатты реттеу) және басты полюстердің магнит ағынын (полюсті реттеу), яғни қозу тізбегіндегі R_p реостат кедергісін өзгерте отырып, қозу орамасындағы ток пен МҚК-ті өзгерту арқылы мүмкін болады.

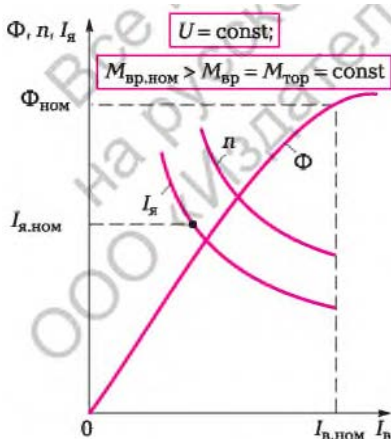
Қозғалтқыш білігіндегі тежеу моменті тұрақты болған кезде айналу жиілігін *реостатты реттеу* 9.34-суретте келтірілген механикалық сипаттамаларды көрсетеді. Айналу жиілігін бұлай реттеу $R_{\Pi} I_3^2$ шығындардың жоғары қуатына байланысты үнемсіз болып табылады және қуаты аз қозғалтқыштарда ғана қолданылады.

Айналу жиілігін *полюсті реттеу* біраз үнемдірек. Қозу тогының мәні зәкір тогының мәнінен 2-3% аспайды. Сондықтан қозу тізбегінде $R_{\Pi} I_3^2$ шығындардың қосымша қуаты аз болады.

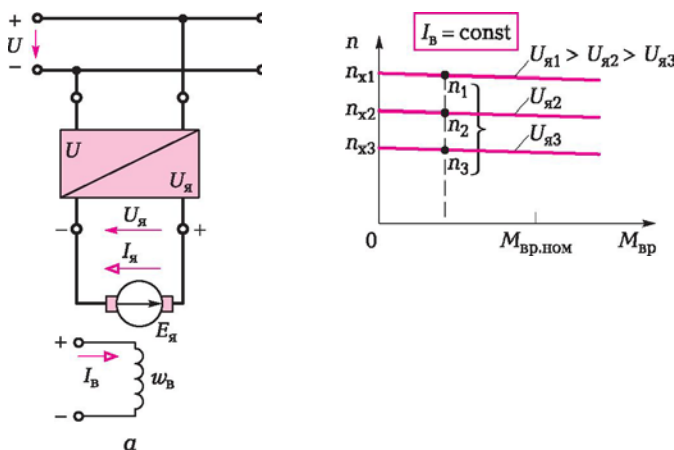
Полюсті реттеудің екі жағдайдағы ерекшеліктерін қарастырайық: тежеу моменті тұрақты болған кезде $M_{теж} = M_{ай} = \text{const}$ және қозғалтқыш білігіндегі қуат тұрақты болған кезде $P_{\Pi} = M_{ай} \Omega_{ай} = \text{const}$.

Бірінші жағдайда басты полюстердің магнит ағынының азаюы (ұлғаюы) айналу жиілігінің (9.13) (9.35-сурет), қозғалтқыш білігіндегі $P_{\Pi} = M_{ай} \Omega_{ай}$ қуаттың және I_3 зәкір тогының (9.6а) ұлғаюымен (азаюымен) қатар жүреді.

Шын мәнінде, R_p реостат кедергісі ұлғайған (азайған) кезде қозу орамасының тогы мен МҚК-і, басты полюстердің Φ магнит ағыны және зәкір орамасында индукцияланатын E_3 ЭҚК азаяды (ұлғаяды). E_3 ЭҚК-ң азаюы (ұлғаюы) $I_3 = (U - E_3)/R_3$ зәкір тогының, айналу моментінің және айналу жиілігінің ұлғаюына (азаюына) әкеледі. Нәтижесінде $M_{ай} = M_{теж}$ моменттерінің тепе-тендігі n айналу жиілігі мен I_3 зәкір тогының ұлғайған (азайған мәндерінде) қалпына келеді. Зәкір тогы айналу жиілігін осылай реттеген кезде және қозғалтқыш білігінде номиналдыға жақын жүктеме болған кезде, оның номиналды мәнінен асып, қылшақтардың асында ұшқындану тудыруы және коллекторды зақымдауы мүмкін.



9.35-сурет



9.36-сурет

Екінші жағдайда қозғалтқыш білігіндегі тұрақты қуат (9.5) және (9.6б) теңдеулерін ескергенде мынаған тең болады:

$$P_n = M_{\text{ай}} \Omega_{\text{ай}} = c_m \Phi I_я 2\pi n / 60 = \kappa_1 \Phi I_я n = \kappa_2 E_я I_з = \text{const},$$

мұнда зәкір тізбегінің $R_з$ кедергісі төмен болғанда $E_з \text{ ЭКК} = U - R_з I_з = U = \text{const}$, сәйкесінше зәкір тогы $I_з = \text{const}$. Сондықтан параллель қозатын қозғалтқыштың айналу жиілігін полюсті реттеу біліктегі тұрақты қуат жағдайында, тұрақты тежеу моментіне қарағанда, тиімдірек болады. Алайда бұл жағдайда да айналу жиілігінің біршама ұлғаюы коллекторда коммутация жағдайларының нашарлауына әкелуі мүмкін. Параллель қозатын қозғалтқыштың айналу жиілігін реттеу диапазоны – 2 : 1 дейін.

Параллель қозатын қозғалтқыштың қозу орамасында орамдар саны көп және индуктивтілігі жоғары. Сондықтан қозғалтқышты электр энергиясы көзінен ажыратқан кезде ол ажыратқыш контактілерінің арасында доға разрядтың түзілуіне жол бермеу үшін зәкір тізбегінде тұйық күйінде қалады.

Тәуелсіз қозатын қозғалтқышта (9.36-сурет, а) басты полюстердің магнит ағыны $\Phi = \text{const}$ тұрақты болған кезде (9.36-сурет б) зәкір тізбегі шықпаларының арасындағы $U_з$ кернеуін өзгерту арқылы (9.11) айналу жиілігін үнемді реттеуге болады.

Тізбектей қозатын қозғалтқышта (9.37-сурет) қозу тогы мынаған тең:

$$I_B = \frac{R_p + R_A}{R_B + R_p + R_A} I_A = c_I I_A, \quad (9.14)$$

мұндағы R_A, R_B, R_p — үлкен қималы сымнан, үстеме резистордан және реттеуіш реостаттан тұратын, орамдар саны аз қозу орамасының кедергілері; $c_I = \frac{R_p + R_A}{R_B + R_p + R_A} = \frac{I_B}{I_A}$ — $0 < c_I < 1$ мәні қозу тогының зәкір

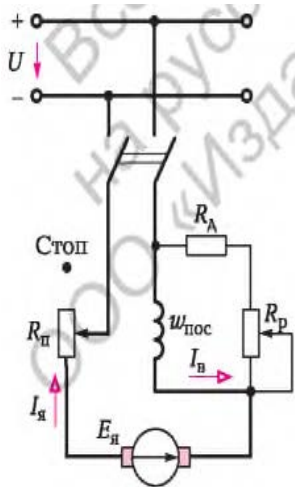
тогындағы үлесін анықтайтын шама.

Магниттік сым қанық болған кезде басты полюстердің магнит ағыны қозу тогына пропорционал болады. (9.14) және (9.6a) теңдеулерін ескере отырып анықтаймыз:

$$\Phi = c_\Phi I_B = c_\Phi c_I I_A = \frac{c_\Phi c_I}{c_M} \frac{M_{вр}}{\Phi}$$

яғни

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \sqrt{\frac{c_\Phi c_I}{c_M}} \sqrt{M_{вр}}; \\ I_A &= \frac{1}{\sqrt{c_M c_\Phi c_I}} \sqrt{M_{вр}} \end{aligned} \right\} \quad (9.15)$$



мұндағы c_Φ — берілген қозғалтқыш үшін тұрақты шама.

(9.15) теңдеуіндегі басты полюстардың магнит ағынының өрнегін (9.11) теңдеуіне қойып және зәкір тізбегінің барлық элементтерінің кедергілерін ескеріп, тізбектей қозатын қозғалтқыштың жасанды механикалық сипаттамасының теңдеуін аламыз:

$$n = \frac{U \sqrt{c_M}}{c_E \sqrt{c_\Phi c_I} \sqrt{M_{вр}}} - \frac{R_A + R_p + R_B c_I}{c_E c_\Phi c_I} \quad (9.16)$$

9.37-сурет

және $R_n = 0$ реостат кедергісі мен максималды R_p реостат кедергісінде, яғни шаманың мәні $c_1 \rightarrow 1$ болған кезде оның табиғи механикалық сипаттамасын аламыз:

$$n = \frac{U\sqrt{c_M}}{c_E\sqrt{c_F}\sqrt{M_{вр}}} - \frac{R_n + R_p}{c_E c_F}.$$

Тізбектей қозатын қозғалтқыштың механикалық сипаттамалары $M_{ай} < M_{ай.ном}$ мәндерінде «жұмсақ» болады (9.38-сурет). Зәкір тогы жүктеме ұлғайған кезде, параллель қозатын қозғалтқыштағы токқа қарағанда (9.6а), аз мөлшерде ұлғаяды (9.15). Номиналды жүктемеден жоғары жүктемелерде қозғалтқыштың магнит өткізгіші қанығады, басты полюстердің магнит ағыны мүлдем өзгермейді, механикалық сипаттамалар түзу сызықта болады.

Тізбектей қозатын қозғалтқышты іске қосу іске қосатын $M_{ай.іск}$ айналу моменті мен тогын шектеу үшін жасанды механикалық сипаттама бойынша жүзеге асырылады. Қозғалтқышты жүктемесіз іске қосуға, сондай-ақ өте аз жүктемемен жұмыс жасауға болмайды, себебі зәкірдің айналу жиілігі рұқсат етілген мәндерден асып кетуі мүмкін (қозғалтқыш «кеңіп кетуі мүмкін»).

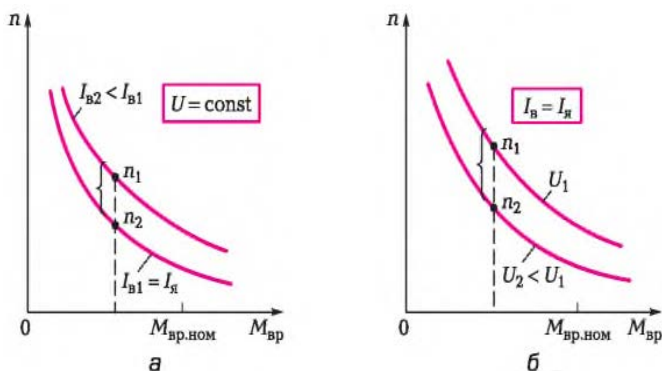
Тізбектей қозатын қозғалтқыштың айналу жиілігін реттеудің үш тәсілі болуы мүмкін.

Реостатты реттеу қуаттау кернеуі тұрақты $U = \text{const}$ және R_p реостат кедергісі максималды болған кезде, яғни шама мәндері $c_1 \rightarrow 1$ (9.14) және ток мәндері $I_k \approx I_3$ болған кезде зәкір тізбегінде R_n реостат кедергісін өзгерту арқылы жүзеге асырылады. R_n реостат кедергісінің



Естественная механическая характеристика – табиғи механикалық сипаттама;

Искусственные механические характеристики – жасанды механикалық сипаттамалар
9.38-сурет



9.39-сурет

ұлғаюы (азаюы) тежеу моменті тұрақты болған кезде (9.15) зәкір тогы өзгерместен айналу жиілігінің азаюына (ұлғаюына) (9.38-суретті қараңыз) әкеледі. $R_{п}$ реостатында жоғары шығын қуатының салдарынан реостатты реттеу қуаты аз қозғалтқыштарда ғана қолданылады.

Полюсті реттеу реостат кедергісі $R_{п} = 0$ және қуаттау кернеуі тұрақты $U = \text{const}$ I_k козу тогын, яғни басты полюстердің магнит ағынын $R_{п}$ реостатымен өзгерту арқылы жүзеге асырылады. Козу тогының азаюы (ұлғаюы), яғни (9.14) шама мәндерінің $c_1 \rightarrow 1$ азаюы (ұлғаюы) тежеу моменті тұрақты болған кезде (9.16) айналу жиілігінің ұлғаюына (азаюына) (9.39, а суретін қараңыз) әкеледі. Сонымен қатар зәкір тогы да ұлғаяды (азаяды) (9.15).

Реостатсыз реттеу қозғалтқыштың қуаттау кернеуін $R_{п}$ реостат кедергісі максималды болған кезде, яғни (9.14) $c_1 \rightarrow 1$ шама мәндерінде, $I_k \approx I_3$ ток мәндерінде және $R_{п} = 0$ реостат кедергісінде өзгерту арқылы жүзеге асырылады.

Тежеу моменті тұрақты болған кезде кернеудің азаюы (ұлғаюы) айналу жиілігінің азаюына (ұлғаюына) әкеледі (9.39-сурет, б). Бұл ретте зәкір тогы (9.15) өзгермейді.

Тізбектей қозатын қозғалтқыштар электр көлігінде тартқыш ретінде кеңінен қолданылады. Бұл қозғалтқыштар жоғары іске қосу моментін өрбітеді және жүктеменің біршама өзгерістерін, параллель қозатын қозғалтқышқа қарағанда, аз ток өзгерістерімен «жұмсақ» қабылдайды.

Аралас қозатын қозғалтқыш параллель және тізбектей қозатын қозғалтқыштардың «қатаң» және «жұмсақ» сипаттамаларының арасындағы аралық, табиғи механикалық сипаттаманы іске асырады.

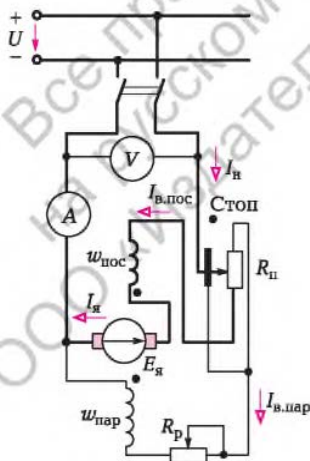
Көп жағдайда тізбектей және параллель қозатын орамалар 9.40-суретке сәйкес қосылады. Басты полюстер ағынын былай көрсетейік:

$$\Phi = \Phi_{\text{пар.к}} + \Phi_{\text{бip.к}} \quad (9.17)$$

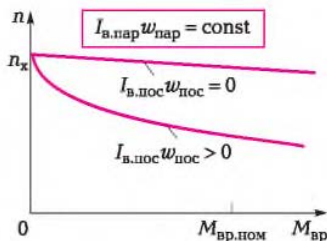
мұндағы $\Phi_{\text{пар.к}}$ және $\Phi_{\text{бip.к}}$ – параллель және тізбектей қозатын орамалардағы токтардың МҚК әсерімен қозатын магнит ағындары.

Тізбектей қозатын ораманың кедергісін елемей және (9.17) магнит ағынының өрнегін (9.11)-ге қойып, аралас қозатын қозғалтқыштың *табиғи механикалық сипаттамасын* аламыз:

$$n = \frac{U}{c_E (\Phi_{\text{в.пар}} + \Phi_{\text{в.пос}})} - \frac{R_{\text{я}}}{c_E c_M (\Phi_{\text{в.пар}} + \Phi_{\text{в.пос}})^2} M_{\text{вр.}} \quad (9.18)$$



9.40-сурет



9.41-сурет

Параллель қозатын ораманың МҚК мәні тұрақты $I_{\text{пар.к}} w_{\text{пар}} = \text{const}$, яғни магнит ағыны $\Phi_{\text{пар.к}} = \text{const}$ болған кезде және тізбектей қозатын орамада МҚК $I_{\text{бір.к}} w_{\text{бір}}$ жоқ (бар) болған кезде, аралас қозатын қозғалтқыштың табиғи механикалық сипаттамасы «қатаң» болады (салыстырмалы түрде «жұмсақ») (9.41-сурет).

Аралас қозатын қозғалтқыштар көп мәрте артық жүктемелерді көтере алады, біршама іске қосу моменттері мен тездету тудыра алады және көтергіш машина, сүргілегіш білдек, илемдік білдек және т.б. жетектерінде пайдаланылады.

9.16. ТҰРАҚТЫ ТОК ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРЫН РЕВЕРСТЕУ ЖӘНЕ ТЕЖЕУ

Реверстеу – қозғалтқыш зәкірінің айналу бағытын өзгерту. Ол үшін айналу моментінің әсер ету бағытын өзгерту қажет, бұл (9.6) зәкір тізбегіндегі не токтың бағытын, не басты полюстердің магнит ағынының, яғни қозу тізбегіндегі токтың бағытын өзгерту арқылы іске асырылады. Әдетте реверстеу зәкір тізбегінің шықпаларын қайта қосу арқылы жүзеге асырылады. Бұл қозу орамасының магнит өрісінің көп энергия запасынан тұратынымен (3.23) және оның тізбегі ажыраған кезде ажырайтын контактілер арасында доға разрядының пайда болуы мүмкін екендігімен түсіндіріледі.

Қуаты аз қозғалтқыштарда бөлек-бөлек қосылған екі қозу орамасы зәкірдің қажетті айналу бағытын қамтамасыз етеді.

Тежеу – қозғалтқыштың режимін өзгерту, тоқтату не реверстеу мақсатында, зәкірді айналдыратын сыртқы көздің механикалық энергиясын басқа энергия түрлеріне айналдыру. Тежеу соңында механикалық тежеуіштерді пайдалану арқылы механикалық және электромагниттік тежеу болуы мүмкін. Қозғалтқыш зәкірін бекіту үшін механикалық тежеу қолданылады.



Режим генератора – генератор режимі; режим двигателя – қозғалтқыш режимі; режим электромагнитного тормоза – электромагниттік тежеуіш режимі
9.42-сурет

Тұрақты ток қозғалтқыштарын электромагниттік тежеудің үш тәсілі бар: энергияны желіге қайтару арқылы, динамикалық және қарсы қосу арқылы. Олар тізбектерін жалғау және оларды желіге қосу схемасына байланысты қозғалтқыш, генератор және электромагниттік тежеуіш режимдерінде жұмыс істеуі мүмкін тұрақты ток машинасының қайтымдылық принципіне негізделген.

Әмбебап сипаттамасы (9.13) 9.42-суретте келтірілген параллель қозатын машинаны тежеудің осы тәсілдерін қарастырайық, сондай-ақ тізбектей және аралас қозатын қозғалтқыштарды тежеу ерекшеліктерін атап өтейік.

Энергияны желіге қайтару арқылы тежеу параллель қозатын машинаның жұмысын желіден ажыратпастан, зәкірдің n айналу жиілігі оның «идеалды бос жүрісінің» $n_{\text{ж}}$ айналу жиілігінен үлкен болған кезде, қозғалтқыш режимінен генератор режиміне ауыстыру арқылы жүзеге асырылады (9.34-суретті қараңыз). Мұндай жағдай, мысалы, электр пойызы еңіске қарай қозғалған кезде пайда болуы мүмкін. Егер айналу жиілігі $n > n_{\text{ж}}$ болса, онда E_3 ЭҚК мәні U желі кернеуінен асып түседі, ал зәкір орамасындағы $I_3 = (E_3 - U)/R_3$ тогы бағытын өзгертеді. Сәйкесінше (9.6) зәкірдің электромагниттік моменті айналу моментінің орнына тежеу моментіне айналады, яғни машина энергияны желіге беріп, генератор режимінде жұмыс істейтін болады. Энергияны желіге қайтару арқылы тежеу зәкірдің тоқтап қалуына әкелмейді, бар болғаны оның айналу жиілігін шектейді.

Тізбектей қозатын қозғалтқыштарда мұндай тежеу мүмкін емес, себебі айналу жиілігі $n_{\text{ж}} \rightarrow \infty$ болады.

Аралас қозатын қозғалтқышта зәкір тогының бағытын өзгерту тізбектей қозатын ораманың МҚК бағытының өзгеруіне әкеледі, мұны энергияны желіге қайтару арқылы тежеу кезінде ескеру қажет.

Динамикалық тежеу параллель қозатын машинаның жұмысын қозғалтқыш режимінен генератор режиміне келесі жолмен ауыстыру арқылы жүзеге асырылады. Қозу тізбегі желіге қосылған күйде қалады, ал айналмалы зәкірдің тізбегі желіден ажыратылып, $R_{\text{ж}}$ реостатына қосылады. E_3 ЭҚК әсерімен зәкір орамасындағы ток $I_3 = E_3/(R_3 - R_{\text{ж}})$ бағытын өзгертеді. Сәйкесінше 9.6) электромагниттік момент айналу моментінің орнына тежеу моментіне айналады. Машина жетектің кинетикалық энергия запасын электр энергиясына айналдыра отырып, тәуелсіз қозатын генератор сияқты (9.19-суретті қараңыз) жұмыс жасай бастайды. Ал электр энергиясы өз кезегінде $R_{\text{ж}}$ реостатымен сейілетін жылу энергиясына айналады. Машина зәкірі толық тоқтағанға дейін тежеледі. $R_{\text{ж}}$ реостатының кедергісін өзгерту

арқылы, тежеу жылдамдығын біркелкі реттеуге болады.

Тізбектей және аралас қозатын қозғалтқыштарды динамикалық тежеу де осы сияқты жүзеге асырылады.

Қарсы қосу арқылы тежеу параллель қозатын машинаның жұмысын қозғалтқыш режимінен электрмагниттік тежеуіш режиміне ауыстыру арқылы жүзеге асырылады (9.42-суретті қараңыз). Соңғысы машинаның зәкір мен қозу тізбегі өз арасында жалғанып, бір бағытты электрмагниттік момент тудыру үшін қосылғанда, ал зәкір сыртқы күштер моменттерінің не инерция моментінің әсерімен басқа бағытқа айналған кезде туындайды. Электрмагниттік тежеуіш режимі айналмалы зәкір тізбегінің шықпаларын ауыстыру арқылы, яғни орамадағы I_3 токтың бағытын өзгерту арқылы іске асырылады. Сәйкесінше зәкірдің электрмагниттік моменті (9.6) де бағытын өзгертеді, ол сыртқы күштер моментінің не инерция моментінің әсерімен зәкірдің айналу бағытына қарама-қарсы болады. Зәкірдің шықпаларына қатысты ЭҚК бағыты өзгеріссіз қалады, бірақ оларды желі шықпаларына қатысты ауыстыру арқылы зәкір тізбегінің электрлік күйінің теңдеуі былай болады:

$$E_3 + U = (R_a + R_A)I_3, \quad (9.19)$$

мұндағы R_A – зәкір тогын шектеуге арналған үстеме реостат кедергісі.

(9.19) теңдеуінің қосылғыштарын I_3 шамасына көбейтіп, қуаттар теңгерімінің теңдеуін аламыз:

$$E I_3 + U I_3 = (R_a + R_A) I_3^2 \quad (9.20)$$

бұдан желіден алынатын электр энергиясын қарсы қосу арқылы тежеу кезінде зәкірді айналдыратын сыртқы көздердің механикалық энергиясы да жылу энергиясына айналады. Егер зәкірді айналдыратын сыртқы көздердің механикалық энергиясы шектеулі болса, онда олардың азаю межесіне қарай зәкірдің айналу жиілігі де нөлдік мәнге дейін азаятын болады. Егер осы кезде машинаны желіден ажыратпаса, онда ол қозғалтқыш режиміне өтіп, зәкірдің кері бағыттағы екпіні басталады.

Қарсы қосу арқылы тежеу, мысалы, жүкті түсіргенде, сыртқы күштер моменті (жүк салмағы) оған қарсы бағытталған тұрақты токтағы көтергіш машинаның электрмагниттік моментінен жоғары болған кезде пайда болады. Зәкір тізбегіндегі R_A реостат кедергісін, яғни әмбебап сипаттама еңісін (9.42-суретті қараңыз) өзгерту арқылы,

жүкті көтеру және түсіру жылдамдығын реттеуге болады.

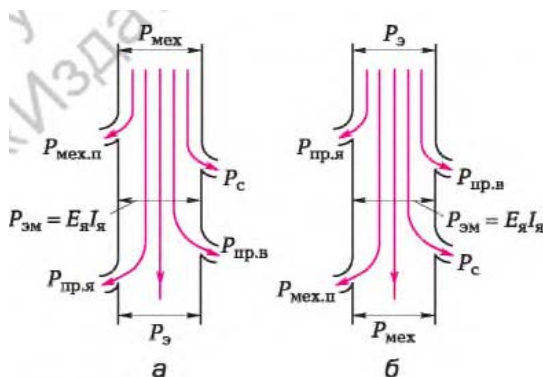
Тізбектей және аралас қозатын қозғалтқыштарды қарсы қосу арқылы тежеу де осы сияқты жүзеге асырылады.

9.17.

ТҰРАҚТЫ ТОК МАШИНАЛАРЫНЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТЕҢГЕРІМІ ЖӘНЕ ПӘК-І

Тұрақты ток машинасының жұмысы энергия шығындарымен қатар жүреді.

9.43, *а* және *б* суреттерінде генераторда және қозғалтқышта энергияның түрлену диаграммалары келтірілген, ондағы $P_{\text{мех.т}}$ — коллектарда, мойынтіректерде және басқасында қылшақтардың механикалық үйкелісіне кеткен шығын қуаты; P_c — басты полюстердің магнит өрісінде айналатын зәкір өзекшесіндегі (болаттағы), гистерезиске және құйынды токтарға кеткен шығын қуаты, $P_{\text{к.с}}$ және $P_{\text{з.с}}$ — қозу және зәкір орамаларының сымдарын қыздыруға кеткен шығын қуаты; $P_{\text{эм}}$ — генераторда (қозғалтқышта) сыртқы көздің механикалық (электрлік) энергиясын электрлік (механикалық) энергияға электромагниттік айналдыру қуаты (9.4-бөлімшені қараңыз); $P_{\text{мех}}$ — генератор (қозғалтқыш) зәкірінің білігіндегі механикалық энергия көзінің (қабылдағыштың) қуаты; P_Σ — қозғалтқыш (генератор) тізбегінің шықпаларына қосылған электр энергиясы көзінің (қабылдағыштың) қуаты.



9.43-сурет

Тұрақты ток машиналарында шығындардың аталған түрлерінен басқа сандық бағалаудан әзер өтетін үстеме энергия шығындары бар, мысалы айналмалы зәкірде ойықтардың болуына байланысты магниттік өріс индукция пульсациясының салдарынан полюсті ұштықтарда гистерезиске және құйынды токтарға кеткен шығын және т.б.

Машина жүктемесіне тәуелді және тәуелді емес, шығын қуаттарын құрайтын айнымалы және тұрақты шығын бар.

Айнымалы шығындар қуаты зәкір тізбегіндегі шығын қуатына тең (номиналды қуаттың 10%-ына дейін).

Тұрақты шығындар қуаты шығындардың қалған түрлерін құрайды (номиналды қуаттың 12%-ына дейін).

Тұрақты ток машинасында бір энергия түрінің басқасына айналу тиімділігі оның ПӘК-імен анықталады:

$$\eta = P_2 / P_1 100\%,$$

мұндағы P_2 және P_1 — қабылдағыш пен энергия көзінің қуаты.

Тұрақты ток машинасының ПӘК-і оның жүктемесі мен номиналды қуатына тәуелді болады. Номиналды жүктеме кезінде жоғары қуатты (1000 кВт және одан көп) машинаның ПӘК-і 96%-ға жетеді, ал аз қуатты (10 Вт дейін) машинада 30-40%-ға жетеді.

9.18.

СИНУСОИДАЛЫҚ ТОКТЫҢ КОЛЛЕКТОРЛЫҚ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРЫ

Тұрақты ток қозғалтқыштарына тән маңызды қасиет жұмыс режимдерін біркелкі әрі үнемді етіп реттеу мүмкіндігі болып табылады. Алайда өнеркәсіпте электр энергиясы синусоидалық токтағы генераторлармен өндіріледі, ал тұрақты ток қозғалтқыштарын қолдану үшін синусоидалық токты тұрақты токқа түрлендіргіштер қажет. Бұл тұрақты ток қозғалтқыштарын қолдануды қиындатады. Сондықтан тікелей синусоидалық ток тізбегінде коллекторлық қозғалтқыштың жұмысын іске асыру қадамы орынды.

Егер басты полюстердің магнит ағынының бағыты мен тұрақты ток қозғалтқышының зәкір тізбегіндегі токтың бағытын бір уақытта өзгертетін болсақ, онда оның айналудың моментінің бағыты өзгермейді.

Параллель қозатын тұрақты ток қозғалтқышында орамдар саны көп қозу орамасының индуктивтілігі зәкір тізбегінің индуктивтілігінен өте жоғары. Мұндай қозғалтқышты синусоидалық ток тізбегіне қосқан кезде, қозу орамасындағы ток, сәйкесінше басты

полюстердің магнит ағыны фаза бойынша зәкір тізбегіндегі токтың $\pi/2$ бұрышына артта қалатын болады. Бұл ретте орташа айналу моментінің мәні нөлге жақын болады.

Синусоидалық ток тізбегіне тізбектей қозатын тұрақты ток қозғалтқышын қосқан кезде басты полюстердің магнит ағыны мен зәкір тізбегіндегі ток бағыттарының өзгеру синфазалылығы автоматты түрде іске асады. Сондықтан ол синусоидалық ток тізбегінде жұмыс жасай алады, бірақ тұрақты ток тізбегіне қарағанда тиімділігі азырақ болады.

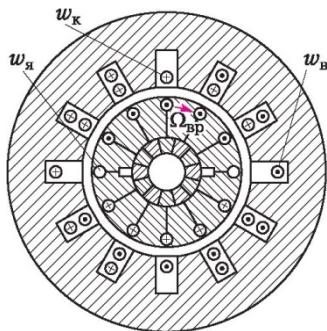
Басты полюстердің айнымалы магнит ағыны коммутацияланатын секцияда (8.7-бөлімшені қараңыз) қосымша «трансформаторлық» ЭҚК-ті индуцирлеп және тұғыр мен басты полюстерде гистерезиске және құйынды токтарға кететін энергия шығындарын ұлғайтып, коммутация жағдайын нашарлатады, ал қозу орамасы мен зәкір орамасының жоғары индуктивті кедергілері $\cos\varphi$ қуат коэффициентінің мәнін кішірейтеді.

Синусоидалық ток тізбегінде жұмыс жасау үшін тізбектей қозатын арнайы коллекторлық қозғалтқыштар әзірленген. Мұндай қозғалтқыштардың статоры электртехникалық болат табақтардан жазық цилиндр түрінде жасалады (9.44-сурет), оның ойықтарында w_k қозу орамасы, w_0 өтемдеуші орама және қосымша полюстердің орамасы орналастырылған (9.44-суретте көрсетілмеген).

Өтемдеуші орама w_3 зәкір орамасымен тізбектей және бифилярлы жалғанады (9.16-суретті қараңыз), бұл зәкір тізбегінің индуктивтілігін азайтады және қозғалтқыштың $\cos\varphi$ қуат коэффициентін ұлғайтады.

Трансформаторлық ЭҚК-ң коммутация жағдайына әсерін азайту үшін синусоидалық токтағы коллекторлық машинаның зәкір орамасының секциялары аз орам санымен жасалады, ал секциялар саны көбейтіледі. Сәйкесінше зәкір өзекшесіндегі ойықтар саны мен коллектор тілімдерінің саны көбейтіледі («үлкен коллектор»). Синусоидалық ток жиілігін төмендету трансформаторлық ЭҚК-ті азайтудың радикалдық құралы болып табылады.

Зәкірдің айналу жиілігі реттелетін, жоғары қуатты синусоидалық токтағы коллекторлық қозғалтқыштар электр көлігінде қуаттау кернеуінің жиілігі 50 Гц, 25 Гц және $50/3 = 16^{2/3}$ Гц жағдайында тартқыш қозғалтқыштар ретінде; зәкірдің жоғары айналу жиілігі



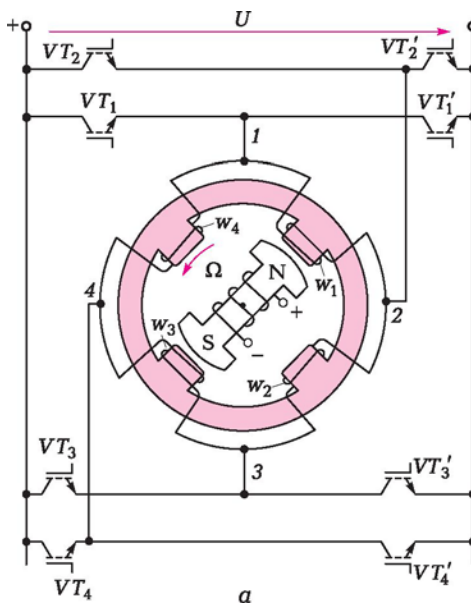
9.44-сурет

(3000 ай/мин жоғары) реттелмейтін аз қуатты қозғалтқыштар – электр құралдарында, шаңсорғыштарда, желдеткіштерде және басқасында қолданылады.

9.19. ТҰРАҚТЫ ТОҚТАҒЫ КОНТАКТІСІЗ (ВЕНТИЛЬДІ) ҚОЗҒАЛТҚЫШТАР

Тұрақты тоқтағы *контактісіз (вентильді)* қозғалтқыштар деп зәкір орамасының қуаттау тізбегінде механикалық коллекторы жоқ, ал зәкір тізбегіне ауыстыру жартылай өткізгіш аспаптар негізінде басқарылмалы кілттердің (вентильдердің) көмегімен қамтамасыз етілетін қозғалтқыштарды айтады.

Вентильді қозғалтқыш тұрақты тоқтағы қарымта машина принципі бойынша орындалады, яғни зәкір орамасы статорда, ал полюсті қозу орамасы роторда орналасады. Зәкір орамасы басқарылмалы вентильдер жүйесі арқылы қуаттау көзіне U кернеуімен қосылады, бұл оны тұрақты ток машиналарында қосу кезіне ұқсайды.



Статордың магнит полюстерінің
полюстері

Включенные вентили	Обмотки якоря			
	w ₁	w ₂	w ₃	w ₄
VT ₁ , VT ₃ '	S	N	N	S
VT ₂ , VT ₄ '	N	N	S	S
VT ₃ , VT ₁ '	N	S	S	N
VT ₄ , VT ₂ '	S	S	N	N

б

Включенные вентили - қосылған вентильдер; Обмотка якоря - зәкір орамасы

9.45, *a* және *б* суреттерінде тәуелсіз қозатын вентильді қозғалтқыш статорының магнит полюстерінің кілттері мен полярлықтарын қосу реттілігі келтірілген. Егер VT_1 және VT_3 вентильдері қосулы болған кезде қозғалтқыш роторы 9.45, *a* суретінде көрсетілген қалыпта болса, онда VT_2 және VT_4 вентильдерін қосып, VT_1 және VT_3 вентильдерін өшіргеннен кейін ротор сағат тілінің қозғалу бағытына қарсы $\pi/2$ бұрышына бұрылады және т.б. Кілттерді басқару ротор күйінің датчигімен жүзеге асырылады. Аталмыш датчик қозғалтқыштың айналмалы білігіне бекітілген тұрақты магнит болып есептеледі. Бұл ретте магниттің магнит өрісі шеңбер білігімен осьтес бойлай орналасқан контактісіз датчиктерде вентильдерді басқару үшін кернеу импульстарын қоздырады. Контактсіз датчиктер ретінде Холл датчиктері немесе индукциялық датчиктер пайдаланылады (5.11-бөлімшені қараңыз).

Зәкір орамасындағы шықпалардың аз саны вентильді қозғалтқыштың конструкциясын жеңілдетеді, ал коллектордың болмауы оны ауыр жұмыс жағдайларынла қолдануға мүмкіндік береді. Олардың негізінде сұйық орталарда пайдалануға арналған арнайы қозғалтқыштар (сорғыштар, сорғылар) дайындалады.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Тұрақты ток машиналарының тұғыры неге құйылған болаттан, ал зәкір мен полюстер бола табақтардан жасалады?
2. Тұрақты токтағы электр машиналары қандай мақсатта қосымша полюстермен жабдықталады?
3. Параллель және тізбектей қозу тәсілдері бар тұрақты ток машиналарының қозу орамаларының айырмашылығы неде?
4. Тізбектей қозатын қозғалтқыштар электр көлігінде неге тартқыштар ретінде қолданылады?
5. Тізбектей қозатын қозғалтқыштың біліктегі жүктемесіз жұмысына неге жол берілмейді?

ЭЛЕКТРЛІК АВТОМАТИКА ЖӘНЕ БАСҚАРУ АППАРАТТАРЫ

10.1. ЖАЛПЫ МАҒЛҰМАТТАР

Электрлік автоматика және басқару аппараттары жабдықты қорғау және электр жүктемелерін реттеу мақсатында электр тізбектерінде жүйесіз коммутацияны жүзеге асырады. Жоғары (бірліктен 750 кВ дейін және одан жоғары) және төмен (1000 В дейін) кернеулі электр аппараттары болады. Жоғары кернеулі аппараттар жүздеген килоамперге дейінгі токтарды ажыратуға есептелген және олар бұл жерде толығырақ қарастырылмайды. Төмен кернеулі аппараттардың арасында автоматика аппараттары мен басқару аппараттары болады.

Автоматика аппараттары (реле, датчиктер, реттеуіштер және т.б.) жүздеген вольтке дейінгі кернеуде 5 А дейінгі токтарды коммутациялайды және автоматика тізбектерінде пайдаланылады.

Басқару аппараттары қозғалтқыштардың, генераторлардың, қыздырғыш құрылғылардың және т.б. күш тізбектерінде 1000 В дейінгі кернеулерде 5 А-дан жоғары токтарды коммутациялайды. Қалыпты жұмыс режимдерінде электр энергиясын қабылдағыштарды басқару аппараттары (контакторлар, магниттік іске қосқыштар, командоаппараттар) және авариялық режимдерде электр энергиясын бөлу және оны ажырату аппараттары (автоматтар, сақтандырғыштар, айырғылар, пакеттік ажыратқыштар) болады.

Электр аппараттарын номиналды кернеулердің ең кең таралған мәндерінде дайындайды:

- синусоидалық ток тізбектерінде — 24, 36, 127, 220, 380 В;
- тұрақты ток тізбектерінде — 12, 24, 48, 110, 220, 440 В.

Номиналды токтардың кең таралған мәндері: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 6; 10; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000 А.

Электр аппараттарын орнату орындарында оқшаулауыштарда бекітілген оқшауланбаған шиналармен немесе кабельдермен жалғайды.

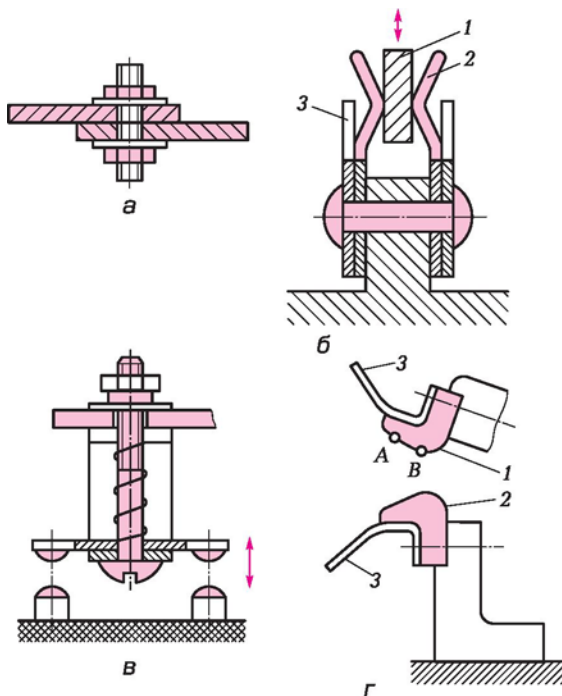
Үш фазалық тізбектерде шиналар белгілі бір түспен боялуы тиіс: *A* фазасы – сары, *B* фазасы – жасыл және *C* фазасы – қызыл; бейтарап шиналар: оқшауланған бейтараптамада – ақ, жерге тұйықталған бейтараптамада – қара.

Тұрақты ток тізбектерінде оң полярлықты шина қызыл, теріс полярлықты шина көк, бейтараптама – ақ.

10.2.

ЭЛЕКТРЛІК КОНТАКТ МЕХАНИЗМІ

Контакт деп электр тізбегінің тұйықтауға не ажыратуға арналған ток өткізгіш элементтерін механикалық жалғау орнын айтады. Контактілер қозғалмайтын (10.1-сурет, *a*) және қозғалмалы болып бөлінеді. Қозғалмалы контактілер сырғымалы және түйіспелі болып бөлінеді. Сырғымалы контактінің типтік конструкциясы (10.1-сурет, *б*) 1 қозғалмалы контактіден және 2 айырдан тұрады. Контактілерді



10.1-сурет

басу айыр материалы мен 3 жалпақ серіппелердің серпімділігімен қамтамасыз етіледі. Түйіспе контактілер ретінде көпірше контактілер (10.1-сурет, в) және т.б. пайдаланылады. Тозуға төзімділікті арттыру үшін бір контактіні басқасына домалататын тұтқыш контактілер қолданылады (10.1-сурет, з). 1 қозғалмалы контакт ажыратылған күйінде 2 қозғалмайтын контактіге қатысты 10.1, г суретінде көрсетілген қалыпта орналасады. Контактілер жанасуының басы олар тұйықталған кезде А нүктесінде болады, ал соңында контактілердің жанасу нүктесі В нүктесіне ауысады. Нәтижесінде контактілер электр доғасынан болатын эрозияға аз ұшырайды. Контактілер ажыратылған кезде өшіруді тездету үшін 3 «мүйіз» қолданылады, оладың бойында доға жылжып, созылады да, өшеді.

Электр тізбегін ажырату лезде бола алмайды. Ток тізбектері үзілген жағдайда жоғары не төмен өзіндік индукция ЭҚК-і пайда болары сөзсіз (3.19-сурет). Осы ЭҚК-ң және желі кернеуінің әсерімен шашыранды контактілердің арасындағы аралық бөлініп, электр доғасы пайда болады. Доғаның жоғары температурасы контактілердің бұзылуына не дәнекерленуіне әкеледі. Әсіресе, жоғары кернеулі аппараттарда қысқа тұйықтау токтарын ажыратқан кезде доғаның әсері өте қауіпті болмақ.

Синусоидалық ток тізбектерін ажырату айтарлықтай жеңілдейді, өйткені синусоидалық ток жүйелі түрде нөлдік мән қабылдайды, бұл доғаның өшуіне әкеледі. Жоғары кернеулі тұрақты ток тізбектерін ажырату едәуір қиынырақ. Тұрақты ток ажыратқыштары тұрақты ток доғасы ұзақ уақыт жанған кезде бөлінетін біршама энергияны сіңіруге есептелуі тиіс.

10.3. ЭЛЕКТРМЕХАНИКАЛЫҚ РЕЛЕ

Электрмеханикалық реле, бұдан әрі жай ғана *реле*, өлшеуіш және орындаушы бөліктерден не құрылғылардан тұратын электр аппараты болып есептеледі. Өлшеуіш құрылғыға белгілі бір мәндегі электрлік басқару шамасы (ток, кернеу және т.б.) әсер еткен кезде реле іске қосылады және оның контактілерді қамтитын орындаушы құрылғысы жоғары қуатты ажыратқыштардың электр жетектерін іске қосатын жедел токтағы көмекші тізбектің коммутациясын жүргізеді.

Релені коммутациялайтын токтар әдетте жүздеген вольтқа дейінгі кернеулерде 5 А-дан аспайды. Сондықтан реле контактілерінің жұмыс

жағдайлары жеңіл, ал оның жұмыс сипаттамалары өлшеуіш құрылғымен анықталады.

Реле іске қосылатын электрлік басқару шамасының мәні *іске қосылу параметрі* не *тағайын шама* деп аталады, ал релені түсіру *қайту параметрі* деп аталады (мысалы, іске қосылу $I_{іск.к}$ және қайту $I_{кй}$ токтары).

Электрлік басқару шамасының сипаты бойынша ток, кернеу, кедергі (ток пен кернеу мәндерінің арасындағы қатынасты реттейтін) және қуат релесі болады.

Реленің іске қосуын тудыратын электрлік басқару шамасының өзгеру сипатына байланысты реле максималды, минималды және дифференциалды болып бөлінеді.

Максималды реле электрлік басқару шамасының (мысалы, ток) мәні тағайын шамамен анықталған мәннен жоғары болған кезде іске қосылады.

Минималды реле электрлік басқару шамасының (мысалы, кернеу) мәні тағайын шамамен анықталған мәннен төмен болған кезде іске қосылады.

Дифференциалды реле салыстырылатын аттас екі электрлік басқару шамаларының мәндерінің айырымы тағайын шамамен анықталған мәндерге жеткен кезде іске қосылады.

Уақыт релесі де кеңінен таралған, олар электрлік басқару шамасы тағайын шаманың мәніне жеткен кезден бастап контактілер тұйықталған кезге дейінгі уақыт ұстамын кең шеңберде реттеу мүмкіндігіне ие. Уақыт ұстау құрылғылары ток, кернеу және т.б. релесіне кірігуі мүмкін.

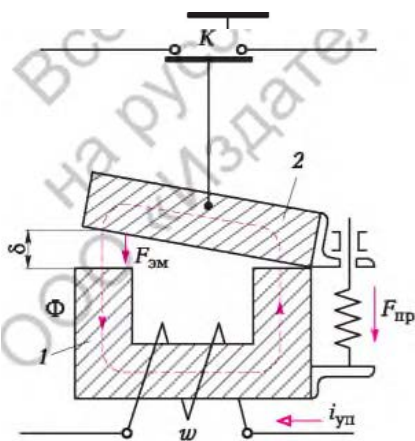
Реленің негізгі параметрлері:

- *сезімталдық* — электрлік басқару шамасының реленің іске қосылуына әкелетін минималды мәні;
- *қайту коэффициенті* — электрлік басқару шамасының реленің түсуіне және іске қосылуына әкелетін мәндерінің қатынасы;
- *тезәрекеттік* — электрлік басқару шамасы тағайын шамасының мәнінен жеткен кезден бастап контактілердің тұйықталған не ажыратылған кезіне дейінгі уақыт аралығы (тезәрекетті реле үшін 0,05 с дейін және қалыпты реле үшін 0,15 с);
- *коммутацияланатын қуат* – тұйықталған контактілерде токтың және ажыратылған контактілерде кернеудің максималды мәндерінің көбейтіндісі.

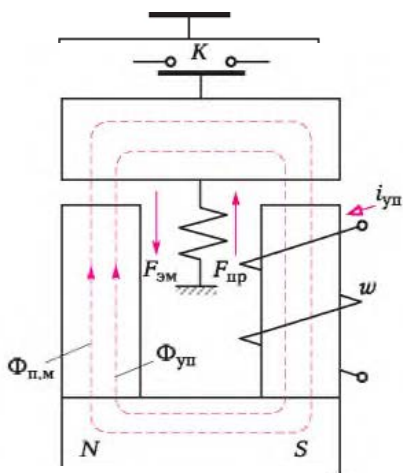
Электрмагниттік, оның ішінде поляризацияланған және магниттік басқарылатын релелер мен жылу релелері ең кең таралған.

Электрмагниттік реле. Мұндай реле тұрақты не синусоидалық токтағы электр магнитімен іске қосылады. Синусоидалық токтағы электрмагнит негізді ток релесінің әрекет ету принципін қарастырайық (10.2-сурет). Орамдар саны w катушка $i_{\text{бт}}$ басқару тогының тізбегіне тізбектей қосылған. Оның $i_{\text{бт}}$ w МҚК-і тарамдалмаған магнит тізбегінде 1 магнит өткізгіш, 2 зәкір және ені $2a$ ауа саңылауы арқылы тұйықталатын Φ магнитті ағынын қоздырады. Бұл ретте зәкірге магнит өткізгішке тартатын $F_{\text{тк}}$ электрмагниттік күші әсер етеді. Егер электрмагниттік күштің мәні қайтарымды серіппе күшінің $F_{\text{ср}}$ мәнінен асып кетсе, онда реле іске қосылып, K контактілер ажыратылады.

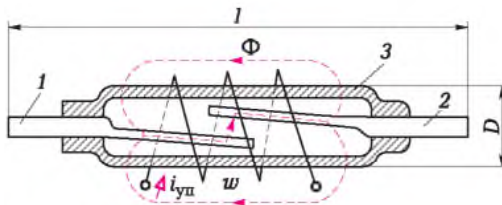
Поляризацияланған реле электрмагнит орамасындағы $i_{\text{бт}}$ басқару тогының мәні мен бағытына байланысты іске қосылады. Поляризацияланған реленің конструкциясы мен электрлік схемасы 10.3-суретте келтірілген. Реленің тарамдалмаған магнит тізбегіне тұрақты магнит кіріктірілген. Орамдар саны w орамада $i_{\text{бт}}$ басқару тогы болмаған кезде тұрақты магниттің магнит ағыны $\Phi_{\text{т.м}}$, ал релені іске қосатын магнит ағыны — $\Phi_{\text{іск.к}} > \Phi_{\text{т.м}}$ дейік. Онда $\Phi_{\text{т.м}}$ магнит ағыны мен басқару $i_{\text{бт}}w$ МҚК-і сәйкес (қарсы) бағытта реле іске қосылады (қосылмайды) — K контактілер ажыратылады. Бұл ретте реле шағын магниттік басқару ағынын қоздыру үшін қажетті $i_{\text{бт}}w$ МҚК-ң шағын мәнінде іске қосылады: $\Phi_{\text{бт}} = \Phi_{\text{іск.к}} - \Phi_{\text{т.м}}$. Бұл поляриза-



10.2-сурет



10.3-сурет



10.4-сурет

цияланған реленің $i_{бт}w$ МҚК бойынша сезімталдығын (2 А дейін) және тезәрекеттігін (0,005 с дейін) білдіреді.

Магниттік басқарылатын реле (геркон) жоғарыда қаралған реледен айырмашылығы – оның вакуумда не инертті газ ортасында орналасқан контактісі болады (10.4-сурет). Инертті газ толтырылған 3 әйнек капсулаға ток өткізгіш серіппелі 1 тілімдер және 2 ферромагниттік материалдар жасалған тілімдер дәнекерленген. $i_{бт}$ басқару тогымен қозатын Φ магнит ағыны орамдар саны w катушкада тілімдерді бір-біріне тартатын $F_{эм}$ электромагниттік күшін тудырады. $i_{бт}$ басқару тогы тағайын шамасымен анықталған мәндерге жеткен кезде, геркон тілімдері тұйықталады.

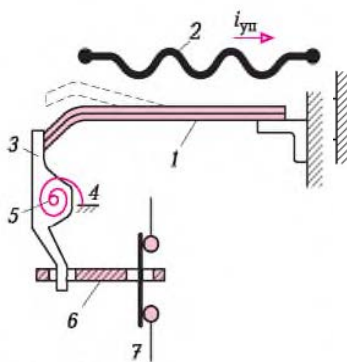
Поляризацияланған геркондарда ток өткізгіш серіппелі тілімдер орамадағы басқару тогының мәні мен бағытына байланысты тұйықталады.

Геркондармен коммутацияланатын токтар ондаған вольттық кернеулерде 1 А-дан аспайды.

Геркондардың басқару МҚК-е сезімталдығы 10-200 А, габаритті өлшемдері $l = 5—10$ мм, $D = 2—5$ мм.

Жылулық реле. Жылулық реле температуралық сызықтық кеңею коэффициенттері әртүрлі металдардан механикалық жолмен бекітілген екі тілім болып есептелетін биметалл элементтердің негізінде жасалады. Температуралық сызықтық кеңею коэффициенті төмен (жоғары) материал ретінде инвар – никельдің болатпен қорытпасы (әртүрлі болаттар, жез, константан және т.б.) қолданылады.

10.5-суретте жылулық реленің конструкциясы мен электрлік схемасы көрсетілген. $i_{бт}$ басқару тогымен тізбекке қосылған 2 қыздырғыш 1 биметалл элементке әсер етеді. $i_{бт}$ ток мәні тағайын шама мәнінен асқан жағдайда, биметалл элементтің екі тілімі де қызып, ұзарады. Алайда олардың бірі көбірек ұзарады, оның салда-



10.5-сурет

рынан биметалл тілім үстіге қарай бүгіледі (штрих сызықпен көрсетілген) де, 3 ілмекпен іліністен шығады. Соңғысы 4 серіппенің әсерімен сағат тілінің бағыты бойынша 5 осьті айнала бұрылады және 6 тартқыш арқылы 7 контактілерді ажыратады.

Мысалы, «Шнейдер Электрик» (Франция) компаниясының артық жүктемелерден қорғауға арналған жылулық релелердің:

реле типі	LR-K0301	LR2-K0304	LR2-K0308
ток тағайыны, А.....	0,11—0,16	0,36—0,54	1,8—2,6
реле типі	LR2-K0314	LR2-K0322	
ток тағайыны, А.....	5,5—8	12—16	

2-ден 10 с дейінгі уақыт ұстамының және 0,145 кг салмақтың реттелетін тағайын шамасы бар.

10.4. ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫН ҚАБЫЛДАҒЫШТАРДЫ БАСҚАРАТЫН ЭЛЕКТРЛІК АППАРАТТАР

Электрлік басқару аппараттары қалыпты жұмыс режимдерінде қабылдағыштардың (электр қозғалтқыштардың, қыздырғыш құрылғылардың және т.б.) электр жүктемелерін жедел коммутациялауға арналған.

Электрлік басқару аппараттарына контакторлар, магниттік іске қосқыштар және командоаппараттар жатады.

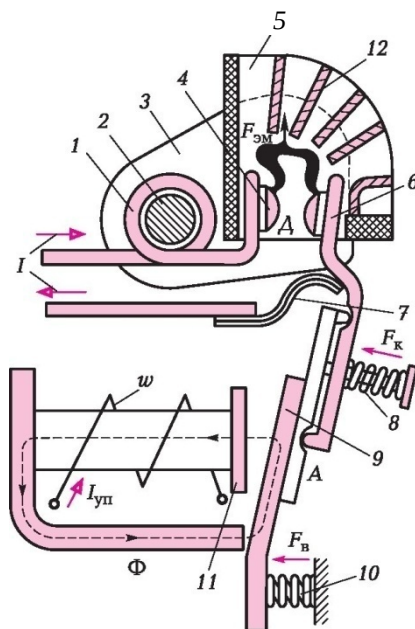
Реледен айырмашылығы – олар салыстырмалы түрде жоғары кернеу (1000 В дейін) жағдайында жоғары токтарды (5 А-дан жоғары) коммутациялауға есептеледі.

Контактор. Контактор қалыпты токта, сол сияқты артық жүктеме тогында (бірақ қысқа тұйықталу тогы емес) күш тізбектерін жедел коммутациялауға арналған электр аппараты болып есептеледі. Оның қосулы және өшірулі күйлерге сәйкес келетін екі коммутациялық күйі болады және көмекші тізбектің жедел тогымен басқарылады. Контакторлар тұрақты және синусо-

идалық ток контакторлары болып бөлінеді.

10.6-суретте бұрма типтегі тұрақты ток контакторының конструкциясы мен электрлік схемасы келтірілген. Орамдар саны w катушкада $i_{6т}$ басқару тогы болмаған кезде контактордың қозғалмалы бөлігі 10 қайтымды серіппенің F_k күшінің әсерімен ажыратылған контактілермен қалыпты жағдайға келеді. Осы кезде контактілер арасында пайда болатын D электрлік доға үрлегіш 5 доға сөндіргіш камерада өшеді. Ол үшін I ажыратылатын ток тізбегіне 2 ферромагниттік өзекшесі бар 1 катушкасы тізбектей қосылған. 2 өзекшенің шет жақтарында орналасқан, ферромагниттік материалдан жасалған тілімдер түріндегі 3 полюстер доғаның жану аймағында қарқындылығы I ажыратылатын токтың мәніне пропорционал болатын магнит өрісін тудыруға мүмкіндік береді. Осы магнит өрісінің доғадағы токпен өзара әрекеті камерада доғаны созатын және ауыстыратын $F_{эм}$ электромагниттік күшін тудырады.

Саңылаулы камера (10.6-сурет) доғаға төзімді электр оқшаулауыш материалдан, мысалы асбестоцементтен жасалған 12 қабырғаларының арасында тар саңылаулары бар көлем болып есептеледі. Камера саңылауларына доға үрленеді, сол жерде жарылып, өшеді.



10.6-сурет

10.1-кесте. «Шнейдер Электрик» компаниясының қысқа тұйықталған орамалы роторы бар асинхронды қозғалтқыштарды басқаруға арналған контакторларының кейбір типтерінің параметрлері

Контакт тор типі	Номи- налды ток, А	Номи- налды кернеу, В	Қозғалтқыштың номиналды қуаты, кВт, кернеуде, В			Сағатына коммута- циялық циклдерд ің максимал ды саны	Салмағы , кг
			220 — 240	380 — 400	660 — 690		
LC1-D09	9	690	2,2	4	5,5	1200	0,32
LC1-D18	18	690	4	7,5	10	1200	0,33
LC1-D50	50	1000	15	22	33	1000	1,4
LC1-D115	115	1000	30	55	80	750	2,5

Доға сөндіргіш тор доға үрленетін жұқа металл тілімдерден жасалған қабырғаларының (1-3 мм) арасында тар саңылаулары бар көлем болып есептеледі. Доғаны сөндіруге радиатор рөлін атқаратын тілімдерде жылулықты қарқынды сейілту көмектеседі.

Катушка тізбегіне $i_{от}$ жедел басқару тогын қосқан кезде олар қоздыратын Φ магнит ағынының, сәйкесінше, электрмагниттік күштердің әсерімен, 9 зәкір 10 қайтымды F_k және 8 контактілік F_k серіппелердің қарсы әрекет күшіне тойтарыс беріп, электрмагнит өзекшесінің 11 полюсті ұштығына тартылады.

4 және 6 контактілердің тұйықталуы зәкір полюсті электрмагнитке толық тартылғанға дейін болады. Бұл ретте 6 контактісі 4 нүктесінің шеңберімен айналады, бұл 8 контактілік серіппесі контактілерінің қосымша қысылуына әкеледі.

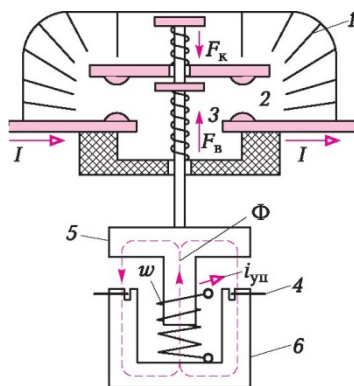
Контактілер жанасқан кезде қозғалмалы контакт қозғалмайтын контакт бойынша ауады (10.1, 2 суретін қараңыз). Бұл ретте контактілердің бетіндегі оксидті таспалар бүлініп, олардың өтпелі кедергісін азайтады. Контактілерге өтпелі кедергіні одан сайын азайту үшін арнайы материалдардан, мысалы күмістен жасалған қаптамалар қояды. 7 икемді өткізгіш мыс қақтамадан не созылмалы сымнан жасалады.

Бұрма типтегі контакторлар жоғары номиналды токтар (ондаған және жүздеген ампер) мен кернеулер (1000 В дейін) жағдайында ауыр

жұмыс режимдеріне [индуктивті жүктемелі тізбектің жиі коммутациясы (сағатына 1000-ға дейін)] арналған (10.1-кесте).

Магниттік іске қосқыш.

Магниттік іске қосқыш (бұдан әрі – *іске қосқыш*) электр қозғалтқыштарды іске қосуға, тоқтатуға, реверстеуге және артық жүктеме токтарынан (бірақ қысқа тұйықталу токтарынан емес) қорғауға арналған коммутациялық аппарат болып есептеледі. Артық жүктеме токтарынан қорғауды орындау үшін іске қосқыштарға жылулық релелер кіріктіреді (10.3-бөлімшені қараңыз), бұл олардың контакторлардан басты айырмашылығы болып табылады. Контакторлармен салыстырғанда іске қосқыштардың жұмыс режимі оңайырақ болады.



10.7-сурет

10.7-суретте түзу жүрісті типтегі магниттік іске қосқыштың конструкциясы мен электрлік схемасы келтірілген. Оның 2 және 3 көпірше контактілері болады, олардан 1 доға сөндіргіш камераларға доға үрленеді. Контактілік F_k және қайтымды F_k серіппелердің күштері тұйықталған контактілерге басуға және аппараттың өшірулі күйге қайтуына әкеледі. Орамдар саны w катушка тізбегіне $i_{бт}$ жедел басқару тогын қосқан кезде олар қоздыратын Φ магнит ағынының, сәйкесінше, электрмагниттік күштердің әсерімен, 5 зәкір 6 магнит өткізгішіне тартылады, ал 2 және 3 контактілері тұйықталады. Егер

10.2-кесте. «Шнейдер Электрик» компаниясының қысқа тұйықталған орамалы роторы бар асинхронды қозғалтқыштарды басқаруға арналған іске қосқыштарының кейбір типтерінің параметрлері

Іске қосқыш типі	Номиналды кернеу, В	Қозғалтқыштың номиналды қуаты, кВт	Жылулық реле тогының тағайын шамасы, А	Магниттік ағытқыш тогының тағайын шамасы, А	Салмағы, кг
GV2-DP106	400—415	0,55	1—1,6	22,5	0,686
GV2-DP108	400—415	1,5	2,5—4	51	0,696
GV2-DP120	400—415	7,5	13—18	223	0,736
GV2-DP132	500	18,5	24—32	416	0,741

жедел ток ретінде синусоидалық ток қолданылса, магнит өткізгіштің шет жақтарына зәкір діріліне жол бермейтін 4 қысқа тұйықталған орамдар орналастырылады.

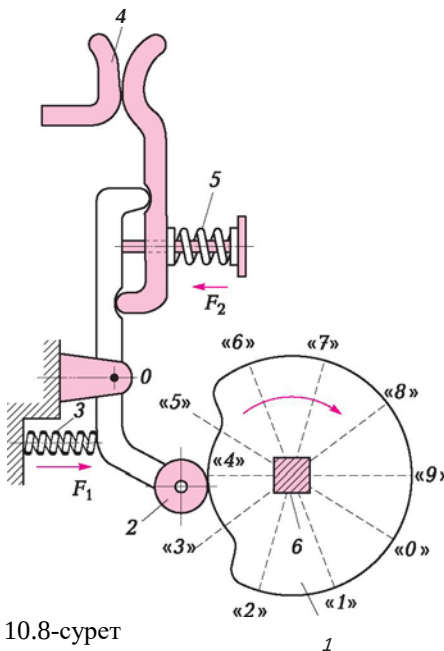
Көпірше контактілері бар іске қосқыштар (10.2-кесте) мен контакторлар әдетте ондық амперлі номиналды токтарға есептеледі.

Көбінесе контакторлар мен іске қосқыштарда күш тізбектерін коммутациялауға арналған басты контактілерден басқа көмекші тізбектердің жедел тогын коммутациялауға көмекші контактілері болады.

Командоаппараттар. Командоаппараттарға басқару батырмалары, жол (үш) ажыратқыштары, контроллерлер мен командоконтроллерлер жатады.

Жол (үш) ажыратқыштары басқарылмалы механизмнің, мысалы жүкті берілген биіктікке көтеру механизмнің қозғалыс жолының берілген бөлігінде басқару және автоматика тізбектерінің коммутациясын жүзеге асырады.

Контроллер электр энергиясын қабылдағыштардың күш тізбектерін тікелей коммутациялау арқылы олардың жұмыс режимдерін басқаруға арналған көп позициялы аппарат болып есептеледі. Контроллер қозғалтқышты іске қосуды, айналу жиілігін реттеуді, реверстеуді және тоқтатуды жүзеге асырады. Әдетте, конт-



роллердің (10.8-сурет) 6 жалпы білігі болады, онда әртүрлі профильдегі дискілер тізбектей салынады (10.8-суретте 1 бір диск көрсетілген).

6 біліктің бұрылуы дискіге 3 серіппенің F_1 күшінің әсерімен қысылатын 2 роликке қатысты 1 диск профилінің «0»—«9» он күйінің бірін бекітеді. Диск «3»—«5» күйінде болған кезде 4 контактілер 5 серіппенің F_2 күшінің әсерімен тұйықталады. Диск «0»—«2» және «6»—«9» күйінде болған кезде 4 контактілер ажыратылады.

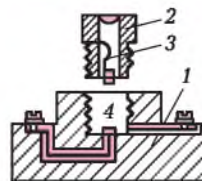
Командоконтроллер контроллерден айырмашылығы – басты контактілері электр энергиясын қабылдағыштардың күш тізбектеріне қосылған контакторлардың басқару катушкаларының жедел токтар тізбегін коммутациялауға арналған көп позициялы автомат болып есептеледі.

10.5. ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫН ТАРАТАТЫН ЭЛЕКТР АППАРАТТАРЫ

Электр тарату аппараттары электр қондырғыларын электр энергиясымен жабдықтау тізбектерін коммутациялауға және оларды авариялық режимдерде қорғауға арналған. Оларға балқымалы сақтандырғыштар, автоматты ажыратқыштар, айырғылар, пакеттік ажыратқыштар, батырмалар жатады.

Балқымалы сақтандырғыштар. Бұл аппараттар электр қондырғыларын қысқа тұйықталу токтарынан қорғауға арналған. Олардың негізгі элементі – токтың жоғары мәндерінде жылылықтың әсерінен бұзылатын *балқымалы ендіріме*. Балқымалы ендірмелерге арналған материал ретінде мыс пен мырыш қызмет етеді. Мырыш ұйғарынды температулардың шегінде тотықпайды, бұл созылмалы ендіріменің жұмыс сипаттамаларын ұзақ уақыт бойы сақтауға мүмкіндік береді.

250 В дейінгі кернеу мен 60 А дейінгі токтар үшін *тығынды* сақтандырғыштарды қолданады (10.9-сурет). Тығынды сақтандырғыш 1 негізден тұрады, оған 4 қозғалмайтын контактіге сүйенетін, жанған кезде алынатын 2 ендіріме бұралады. Тығын керамикалық материалдан жасалады және екі металл контактімен жабдықталады, олардың арасына 3 созылмалы ендіріме дәнекерленеді.

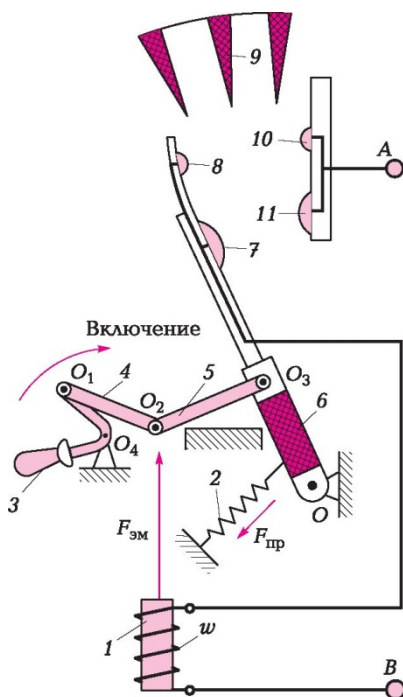


10.9-сурет

Қозғалтқыштарды, электр қыздырғыш қондырғыларды және басқа да құрылғыларды қысқа тұйықталу токтарынан қорғау үшін *түтікшелі* сақтандырғыштар қолданылады. Олардың типтік конструкциясы электр оқшаулауыш материалдан (фарфордан, керамикадан, фибрадан және т.б.) жасалған түтікше болып есептеледі, онда ауа ортасындағы балқымалы ендіріме немесе әртүрлі толтырғыштар орналастырылады (құрамында 99%-дан кем емес SiO_2 және CaCO_3 бор бар кварцты құм). Ендірімені балқытқан кезде пайда болатын электр доғасы толтырғышпен жанасып, қарқынды салқындайды да, кері иондалып, тез сөніп қалады.

Электрондық аспаптарды (компьютерлерді, теледидарларды және т.б.) қорғау үшін электр оқшаулауыш негізге тозандалған, жұқа металл (күміс) қабат түріндегі *тезәрекетті* сақтандырғыштарды қолданады.

Автоматты ажыратқыштар (автоматтар). Автоматтар авариялық режим, мысалы қысқа тұйықталу, кернеудің төмендеуі



Включение - қосу
10.10-сурет

және т.с.с. пайда болған кезде электр желісінің зақымданған бөліктерін ажыратуға арналған. Контакттардан айырмашылығы – автоматтың желінің жұмыс режимін анықтайтын және ажыратуға белгі беретін өлшеуіш құрылғысы (ағытқыш) болады. Контакттар артық жүктеме токтарын (бірнеше килоамперге дейін) ажыратуға ғана есептелсе, автомат қысқа тұйықталу токтарын ажыратуы тиіс (бірнеше ондық және тіпті бірнеше жүздік килоамперге дейін).

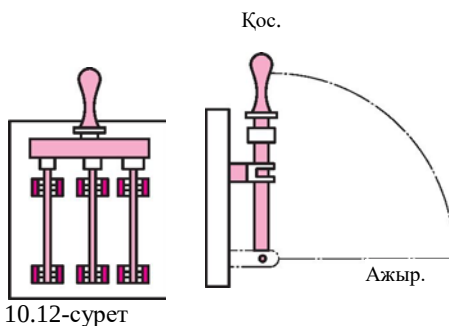
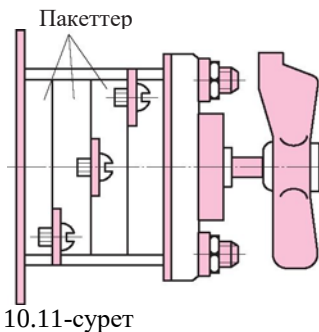
Автоматтар әмбебап, тезрекетті және жоғары қуатты генераторлардың магнит өрісін сөндіру автоматтары болып бөлінеді.

Әмбебап автоматтар тұрақты және синусоидалық ток қондырғыларын қорғауға арналған. Автоматтың конструкциясы мен электрлік схемасы 10.10-суретте келтірілген. Көрсетілген күйде автомат ажыратулы және A мен B шықпаларының арасындағы электрлік күш тізбегі ажыратылған. Автоматты қосу 3 қол тұтқышты сағат тілінің бағыты бойынша қозғалмайтын O осынен айналдыру арқылы жүзеге асырылады. Бұл ретте 4 және 5 иінтіректер 6 иінтіректі қозғалмайтын O осынен сол бағытта айналатын болады. Тізбек автоматтың әуелі 8 және 10 доға сөндіргіш, одан кейін 7 және 11 басты контактілерін тұйықтайды. Сонымен қатар, автоматты қосқан кезде 2 өшіруші серіппе жоғары көтеріледі. Электрмагниттің w катушқасында қысқа тұйықталу тогы болған кезде 1 зәкір $F_{эм}$ электрмагниттік күшінің әсерімен жылжып, 4 және 5 иінтіректерді «өлі» нүктеге ауыстырады. Ол иінтіректердің $O_1—O_2—O_3$ сызығы түзу болатын күйіне сәйкес келеді. Бұл ретте автомат 2 серіппенің $F_{сп}$ күшімен өшеді, контактілер ажыратылады, ал олардың арасында пайда болған доға 9 доға сөндіргіш камераға үрленіп, сөніп қалады. Әмбебап автоматтарды өшіру уақыты ондық секунд үлестерін құрайды.

4 және 5 иінтіректер жүйесі автоматқа кез келген уақытта, тіпті кез келген қосу сәтінде өшуге мүмкіндік беретін бос ағыту механизмінің функциясын атқарады. Бос ағыту механизмі өшіру мен қосудың рұқсат етілмеген циклдерінің қайталану мүмкіндігіне жол бермейді.

Тезрекетті автоматтар тұрақты ток қондырғыларын қорғауға арналған. Олардың өшу уақыты мыңдық секунд үлестерін құрайды және бұл поляризацияланған электрмагниттік құрылғыларды (10.3-бөлімшені қараңыз), қарқынды доға сөндіргіш құрылғыларды қолдану арқылы, сондай-ақ өлшеуіш элемент (ағытқыш) пен контактілердің өзара әрекеттесу жүйесіндегі аппараттың кинематикалық схемасын жеңілдету арқылы іске асады.

Пакеттік ажыратқыштар. Мұндай ажыратқыштар бірнеше тізбекті қатарынан қолмен қосуға және өшіруге арналған. Оларды электр оқшаулауыш материалдан жасалған осьтес-орналасқан қозғал-



майтын сақиналардан жинайды, ол сақиналардың әрқайсысының ішіне жалпы білікпен байланысқан коммутациялаушы құрылғы орнатады (10.11-сурет).

Айырғылар. Айырғылар қуаты аз электр энергиясын қабылдағыштарды және таратушы қалқандардағы жалпы қуаттау көздерін қолмен қосып, өшіру үшін қызмет етеді. Бір, екі және үш полюсті айырғылар болады (10.12-сурет). Олардың барлығында сырғымалы контактілер болады (10.1, б суретін қараңыз).

Басқару батырмалары. Батырмалар электр аппараттарын қашықтан басқару үшін қолданылады. Олар бастапқы күйіне өздігінен қайтатын болып және онсыз жасалуы мүмкін. Бір корпуста контрукциялық негізде дайындалған бірнеше батырма батырмалы станция құрайды.

10.6. АВТОМАТТАРДЫҢ АҒЫТҚЫШТАРЫ

Автоматтардағы ағытқыштар (өлшеуіш құрылғылар) қорғалатын тізбектің жұмыс режимін анықтайтын және электрлік шама мәнін өлшеп, бақылайды және осы шама тағайын шамасының берілген мәніне жеткен кезде автоматты өшіруге белгі береді (іске қосылу тогы, іске қосылу кернеуі және т.б.).

Тағайын шамасы тогының мәнін айтарлықтай кең шеңберде реттеуге болады. Бұл автоматтардың көмегімен іріктемелі қорғанысты жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

Автоматтың міндетіне байланысты оған әртүрлі ағытқыштар кіріктіріледі.

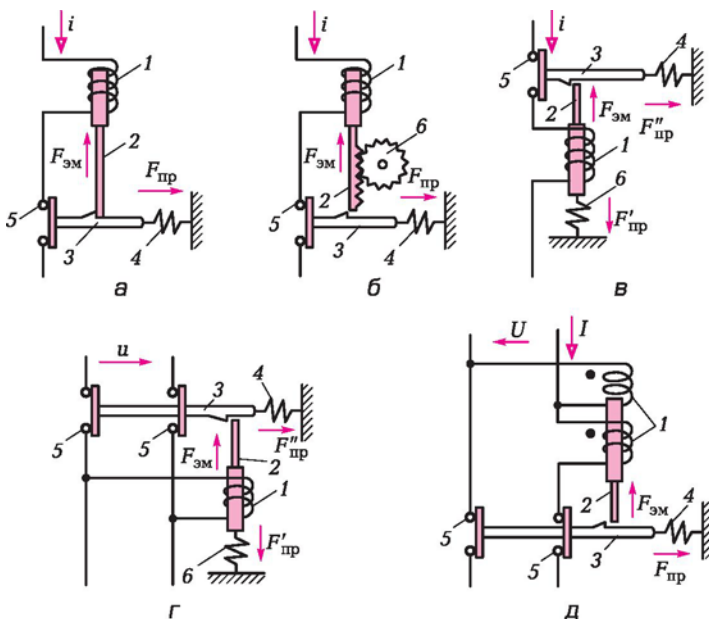
Максималды ток ағытқышы тізбек i тогы тағайын шама тогынан жоғары болуы қажет кезде қолданылады (10.13-сурет, а).

i тогы $F_{эм}$ электрмагниттік күшінің әсерімен тағайын тогының мәніне жеткен кезде, 2 зәкір 3 ілмекті босатып, электрмагниттің 1 катушкасына тартылады және серіппенің $F_{сп}$ күшінің әсерімен 5 контактілер ажыратылады.

i тогы қысқа мерзімде ұлғайған кезде автоматтың өшіп қалуына жол бермеу үшін, тізбекте уақыт ұстау құрылғысы бар ағытқыштар қолданылады (10.13-сурет, б). Сағат механизмімен байланысқан 6 тісті беріліс (10.13, б суретінде көрсетілмеген) электрмагниттің 1 катушкасына 2 зәкірді лезде тартып, 3 ілмекті босатуға мүмкіндік бермейді (10.3-кесте).

Минималды ток ағытқышы тізбек i тогы тағайын шама тогынан төмен болуы қажет кезде қолданылады (10.13-сурет, в). i тогы 1 электрмагниттің $F_{эм}$ күшінен жоғары болатын 6 серіппенің $F_{сп}$ күшінің әсерімен тағайын тогының мәніне жеткен кезде, 2 зәкір 3 ілмекті босатады және 4 серіппенің $F_{сп}$ күшінің әсерімен 5 контактілер ажыратылады.

Минималды кернеу ағытқышы тізбектің кернеуі тағайын шама кернеуінен төмен болған оны өшіру үшін қолданылады (10.13-сурет, г). Минималды кернеу мен ток ағытқыштарының әрекет ету принциптері ұқсайды. Минималды кернеу автоматы фазалық роторлы асинхронды қозғалтқыштарды қорғау үшін пайдаланыла-



10.13-сурет

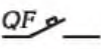
10.3-кесте. «Шнейдер Электрик»компаниясы ағытқыштарының кейбір типтерінің параметрлері

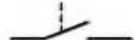
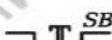
Ағытқыш типі	Номиналды ток, $I_{ном}, A$	Артық жүктемеден қорғау		Қысқа тұйықталу токтарынан қорғау		Лездік ток дәйек, A
		токтың тағайын шамасы, $I_{іск.к}, A$	$6 I_{іск.к}$ уақыт тағайын ы, с	ток тағайыны, A	уақыт тағайыны, мс, көп емес	ток тағайыны, A
STR22ME	40 — 220	$(0,6 — 1) I_{ном}$	6—15	$13 I_{іск.к}$	10	$15 I_{ном}$
STR43ME	120 — 500	$(0,4—0,8)/ I_{ном}$	5,8-21,8	$(6-13)/ I_{іск.к}$	10	$15 I_{ном}$
STR22SE	40 — 250	$(0,4—1) I_{ном}$	5 -7,5	$(2-10)/ I_{іск.к}$	40	$11 I_{ном}$
STR53UE	150 — 630	$(0,4—1) I_{ном}$	0,8 - 16	$(1,5 - 10)/ I_{іск.к}$	15— 230	$(1,5 - 11) I_{ном}$

* Жақшаларда (жақшасыз) реттелетін (тұрақты) тағайын шамаларының шектері көрсетілген.

ды. Кернеудің төмендеуі не жоғалуы қозғалтқыштың тоқтауына әкелуі мүмкін, егер ол өшірулі болмаса, кернеу жоғарылаған кезде жоғары іске қосу тогы пайда болады, себебі іске қосу реостаты қосылмаған. Сондықтан қозғалтқыш кернеу төмендеген кезде автоматты түрде өшіп қалады, одан кейін іске қосу реостатын қолдану арқылы қосылады.

10.4-кесте. Электрлік автоматика және басқару аппараттары элементтерінің шартты белгілері

Шартты белгісі	Атауы	Шартты белгісі	Атауы
	Контактор, реле, іске қосқыш орамасы		Жылулық реле орамасы
	Автоматты ажыратқыш		Реле, мысалы, тұйықталушы контактілі ток релесі

Шартты белгісі	Атауы	Шартты белгісі	Атауы
	Реле контактілері:		Тұйықтаушы кон- тактілер:
	тұйықтаушы		іске қосылған кезде уақыт ұстамы бар
	ажыратушы		қайту кезінде де
	Контактор, іске қосқыш, контроллер контактілері:		Ажыратушы контактілер:
	тұйықтаушы		іске қосылған кезде уақыт ұстамы бар
	ажыратушы		қайту кезінде де
	Балқымалы сақтан- дырғыш		Өздігінен қайту батырмалары:
	Тұйықтаушы контак- тілі жол не үш қосқышы		ажыратушы контактілі
	Үш күйге және төрт Бағытқа арналған контроллер		ажыратушы контактілі

Кері қуат ағытқышы параллель жұмыс жасайтын тұрақты ток генераторларын (9.11-бөлімшені қараңыз) олардың бірінің қозғалтқыш жұмыс режиміне өтіп кетуінен қорғау үшін қолданылады. 1 ағытқыштың катушкасын қарсы қосқан кезде (10.13-сурет, д) 1 электрмагниттің $F_{эм}$ күші аз болады және автомат қосулы күйде болады. I тогының бағыты өзгерген кезде электрмагниттің катушкалары сәйкесінше қосылады, $F_{эм}$ электрмагниттік күші артады, 2 зәкір 1 катушкалармен тартылады, 3 ілмек босатылады және 4 серіппенің $F_{сп}$ күшінің әсерімен 5 контактілер ажыратылады.

Электрлік автоматика және басқару аппараттарының барлық элементтерінің MEMСТ бойынша шартты белгілері бар. Олардың кейбірі 10.4-кестеде келтірілген.

Айырғыштар жоғары кернеулі қарапайым ажыратқыштар болып табылады. Олардың міндеті – кернеу астындағы, бірақ ток жоқ кезде тізбек бөліктерін ажырату және ауыстыру. Бұл жөндеу жұмыстарының қауіпсіздігін қамтамасыз ету, желі бөліктерін шиналардың бір жүйесінен басқасына ауыстыру және т.б. үшін қажет. Бұғау (10.1-сурет, б) және бұрма айырғыштар болады. Бұрма айырғыштарды кернеуі 35-500 кВ болатын ашық тратқыш құрылғыларда орнатады. Айырғыштарды басқару қолмен оқшауланған штангі арқылы және қашықтан электрлік не пневматикалық жетектер арқылы жүзеге асырылады. Айырғыштың жетектері ток қосулы кезде айырғыштың ажырауына жол бермейтін қорғаныстық блоктаумен қамтамасыз етіледі.

Жүктемені ажыратқыштар (қуатты айырғыштар) өнеркәсіптік кәсіпорындардың қосалқы станциялары мен ауылдағы ұсақ электр станцияларында қуаты аз электр қондырғыларын ажырату және қосу үшін қолданылады. Бұл құрылғылар бұғау айырғыштарға ұқсас, бірақ доға сөндіргіш құрылғылары болады. Олар 6 және 10 кВ кернеулер кезінде пайдаланылады және жұмыс тогының қосарланған мәнінен аспайтын токтарды ажыратуға есептелген (10.5-кесте).

10.5-кесте. «Шнейдер Электрик» компаниясының қысқа тұйықталған орамалы роторы бар асинхронды қозғалтқыштарды басқаруға арналған жүктеме ажыратқыштарының кейбір типтерінің параметрлері

Жүктеме ажыратқыштың типi	Номинал ды ток $I_{ном}$, А	Асинхронды қозғалтқыштың номиналды қуаты, кВт, кернеу кезінде, В		Максималь ды ажырату тогы, А	Жылулық ағытқыштар тогының тағайыны, А	Салмағы, кг
		380—415	660—690			
GV2-ME07	1,6	0,75	1,5	$13 I_{ном}$	1,6—2,5	0,26
GV2-ME10	6,3	2,2	4	$13 I_{ном}$	4—6,3	0,26
GV2-ME14	18	4	7,5	$13 I_{ном}$	6—10	0,26
GV2-ME20	32	7,5	15	$12 I_{ном}$	13—18	0,26

Жоғары кернеулі ажыратқыштар жоғары қуатты электр қондырғыларын, сондай-ақ жоғары қысқа тұйықталу токтарында жоғары кернеулі (50 кА-дан жоғары) тізбектерді ажыратуы тиіс.

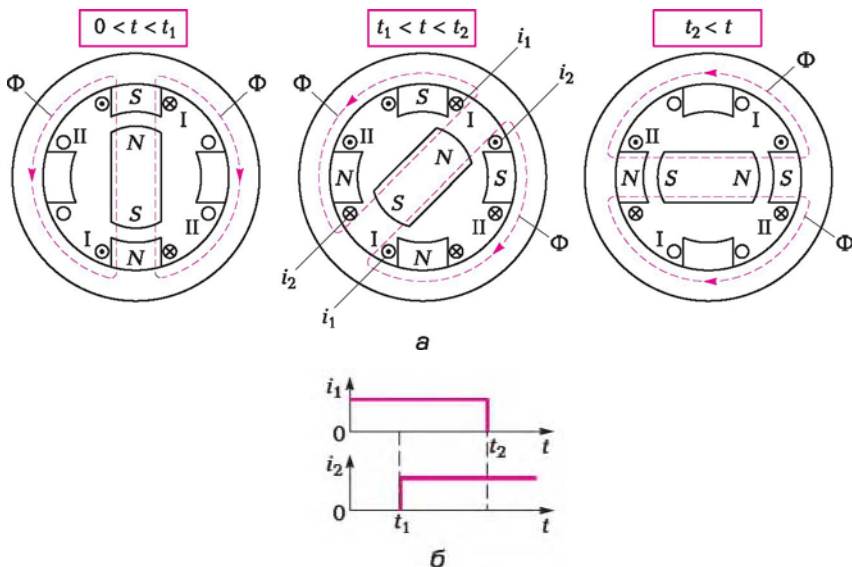
Жоғары кернеулі майлы және ауалық ажыратқыштар болады. Майлы ажыратқыштарда ток тізбегін ажырататын контактілер минералды май құйылған бакқа салынады.

Ауалық ажыратқыштарда бір немесе екі ажырайтын контакт қыс болып жасалады, ал қысылған ауаның ағысы 0,7-2,0 МПа қысымының астында контактілер қуысы арқылы доғаны контактілердің жұмыс беттерінен үрлейді. Майлы ажыратқышпен салыстырғанда ауалық ажыратқыштың салмағы мен ажырау уақыты аз болады, бірақ оның жұмысы үшін тазартылып және құрғатылып қысылған ауаның көзі – компрессор қажет.

Тізбек бөлігін ажыратқаннан кейін ажыратқыш кернеу астында қалады. Тексеру мен жөндеу кезінде оны жоғары кернеулі тізбектен ажырату үшін айырғыштарды қолданады.

10.8. ҚАДАМДЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАР

Қадамды қозғалтқыштар (ҚК) электрлік басқару сигналдарын ротордың күйін бекіту арқылы ауыстырудың дискретті бұрыштық не сызықтық сигналдарына түрлендіру үшін қызмет етеді. Олар автоматика жүйелерінде пайдаланылады.



10.14-сурет

ҚҚ статорының айқын орамалы полюстері болады. Ротордың да айқын полюстері болады және ол тұрақты магнит немесе тұрақты токтағы электромагнит түрінде жасалады. 10.14, а суретінде полюстер жұбының саны статорда $p = 2$ және роторда $p = 1$ болатын ҚҚ конструкциясы және статор орамаларындағы токтардың уақытша диаграммасы үшін ротор позициялары келтірілген (10.14-сурет, б). Статор полюстерінің орамаларында i_1 және i_2 токтары болған жағдайда статордың I және II қорытқы магнит ағыны сағат тілінің айналу бағытында $\pi/4$ бұрышына бұрылады. Ротор да осы бұрышқа бұрылады. Статор полюстерінің орамаларында i_2 токтары ғана болған жағдайда II ротор сағат тілінің айналу бағытында $\pi/4$ бұрышына бұрылады.

Жалпы ротордың бұрылу бұрышы статордың полюстер жұбының санына байланысты және ол $\alpha = \pi / 2p$ тең.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Қандай құрылғылар электрлік автоматика және басқару аппараттары деп аталады?
2. Үш фазалық тізбектерде шиналар қандай түстерге боялуы тиіс?
3. Тұрақты ток тізбектерінде шиналар қандай түстерге боялуы тиіс?
4. Релені қандай негізгі параметрлер сипаттайды?
5. Контактторлар, магниттік іске қосқыштар және автоматты ажыратқыштар қандай мақсатта пайдаланылады?

ЭЛЕКТР ЖЕТЕК НЕГІЗДЕРІ

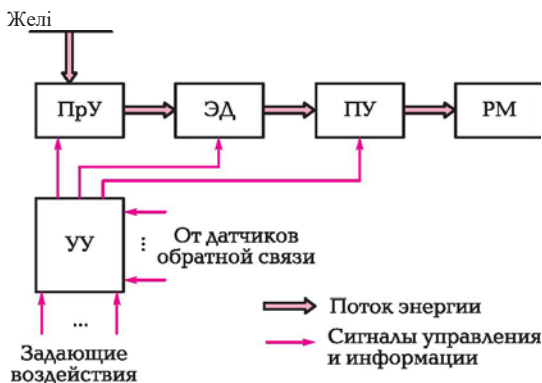
11.1. ЖАЛПЫ МАҒЛҰМАТТАР

Электр жетек деп электр қозғалтқыш, түрлендіргіш, табыстағыш және басқарушы құрылғылардан тұратын, жұмыс машинасының (ЖМ) орындаушы органдарын қозғалысқа келтіруге және осы қозғалысты басқаруға арналған электрмеханикалық жүйені айтады.

Табыстағыш құрылғы (ТҚ) механикалық берілістер мен жалғастырғыш муфталарды қамтиды.

Түрлендіргіш құрылғы (ТрҚ) энергия көзінің тогы мен кернеуін электр қозғалтқыштың (ЭҚ) жұмысына қажетті ток пен кернеуге түрлендіреді.

Басқарушы құрылғы (БК) беретін әсер сигналдары мен кері байланыс датчиктері бойынша жүйенің күйін өңдеуге және олардың негізінде түрлендіргішті, электр қозғалтқышты және табыстағыш құрылғыны басқару сигналдарын шығаруға арналған басқару жүйесінің ақпараттық бөлігі болып есептеледі.



Задающие воздействия – беретін әсер; От датчиков обратной связи – кері байланыс датчиктерінен; Поток энергии – энергия ағыны; Сигналы управления и информации – басқару және ақпарат сигналдары

11.1-сурет

Электр жетек жүйесінде кері байланыс жоқ болса *ажыратылған* деп, ал кері байланыс бар болса *тұйықталған* деп аталады.

Электр жетектің тұйықталған жүйесіне *қадағалаушы электр жетек* жатады, ол механизмнің орындаушы органы белгілі бір дәлдікпен қозғалысты басқарушы органның еркін өзгермелі сигналына сәйкес өндейтін автоматты жүйе болып есептеледі. Мысалы, көшіргі білдекте кескіш құрал өлшеуіш құрылғының датчигі жылжитын шаблон бетінің кез келген конфигурациясына іс жүзінде сәйкес келетін бұйым бетін өндеуді орындайды.

Электр жетектің ажыратылған жүйесіне *қадамды электр жетек* жатады, ол қадамды қозғалтқыштың күйі, сәйкесінше жұмыс механизмінің орындаушы органының күйі басқарушы бағдарламаның цифрлық кодына сәйкес келетін автоматты жүйе болып есептеледі.

Іске қосуды басқару жүйелері қарапайым, айналу жиілігін реттейтін және электрлік автоматика мен басқару аппараттарының (айырғылар, пакеттік ажыратқыштар, контроллерлер, контакторлар, реле және т.б.) негізінде тежейтін электр жетектер кеңінен қолданылады.

11.2. ЭЛЕКТР ЖЕТЕК ҚОЗҒАЛЫСЫНЫҢ ТЕНДЕУІ

Электр жетектің механикалық бөлігі айналмалы және ілгерілемелі қозғалатын элементтерінің саны көп күрделі кинематикалық тізбек болып есептеледі. Механикалық буындар арасындағы саңылауды және олардың серпімділігін елемей, механикалық байланыстарды анық қатаң деп аламыз. Бұл ретте бір элементтің қозғалысы жетектің барлық элементтерінің қозғалысы туралы ақпарат береді. Әдетте, мұндай элемент қозғалтқыштың білігі болып табылады. Жалпы қозғалтқыш білігіндегі момент мына теңдеумен анықталады:

$$\begin{aligned} M_{\text{AB}} &= M_{\text{CT}} + J_{\text{AB}} d\Omega_{\text{AB}}/dt + J_{\text{пр}} d\Omega_{\text{AB}}/dt = \\ &= M_{\text{CT}} + (J_{\text{AB}} + J_{\text{пр}}) d\Omega_{\text{AB}}/dt = M_{\text{CT}} + M_{\text{АНН}}, \end{aligned} \quad (11.1)$$

мұндағы M_{CT} — қозғалтқыш білігіне келтірілген жетектің статикалық тежеу моменті; $J_{\text{кз}}$ және $\Omega_{\text{кз}}$ — қозғалтқыш роторының (зәкірінің) инерция моменті және бұрыштық жылдамдығы; $J_{\text{жт}}$ — қозғалтқыш білігіне келтірілген қозғалтқыш роторын (зәкірін) қоспағанда, жетектің барлық элементтерінің инерция моменті.

Статикалық тежеу моменті қозғалтқышқа қатысты сыртқы механикалық энергия көздерімен туады (мысалы, жүкті көтеру не түсіру) және оң мәнге ие.

(11.1) моменттер теңдеуіне кіретін шама:

$$M_{\text{дин}} = (J_{\text{кз}} + J_{\text{жт}}) d \Omega_{\text{кз}} / dt \quad (11.2)$$

қозғалтқыш білігіне келтірілген қозғалтқыш роторын (зәкірін) қоса, жетектің *динамикалық моменті* деп аталады. Ол жетек қозғалысы тездеген (тежелген) кезде оң (теріс) мәнде болады.

Жұмыс машинасының орындаушы органының қозғалысы $\Omega_{\text{ж.м}}$ бұрыштық жылдамдығымен айналған кезде оның M_c кедергідегі статикалық моменті мен инерция моментін қозғалтқыш білігіне келтіру қуаттар теңгерімі және кинетикалық энергиялар негізінде жүзеге асырылады (η - беріліс ПӘК-і):

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{ст}} \Omega_{\text{АВ}} &= M_c \Omega_{\text{р.м}} / \eta_i \\ \frac{J_{\text{р.м}} \Omega_{\text{р.м}}^2}{2} &= \frac{J_{\text{пр}} \Omega_{\text{АВ}}^2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (11.3)$$

яғни

$$M_{\text{ст}} = \frac{M_c \Omega_{\text{р.м}}}{\eta \Omega_{\text{АВ}}}; \quad J_{\text{пр}} = J_{\text{р.м}} \left(\frac{\Omega_{\text{р.м}}}{\Omega_{\text{АВ}}} \right)^2.$$

Сол сияқты жұмыс машинасы орындаушы органының $v_{\text{ж.м}}$ сызықтық жылдамдықпен ілгерілемелі қозғалысы кезінде оның F_k кедергі күші мен $m_{\text{ж.м}}$ салмағын қозғалтқыш білігіне келтіру қуаттар теңгерімі және кинетикалық энергиялар негізінде жүзеге асырылады:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{ст}} \Omega_{\text{АВ}} &= F_c v_{\text{р.м}} / \eta_i \\ \frac{m_{\text{р.м}} v_{\text{р.м}}^2}{2} &= J_{\text{пр}} \frac{\Omega_{\text{АВ}}^2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (11.4)$$

яғни

$$M_{\text{ст}} = \frac{F_c v_{\text{р.м}}}{\eta \Omega_{\text{АВ}}}; \quad J_{\text{пр}} = m_{\text{р.м}} \left(\frac{v_{\text{р.м}}}{\Omega_{\text{АВ}}} \right)^2.$$

Айналмалы дененің инерция моменті оның k бөліктерінің m_k салмағының айналу осы бөлшектерінен Γ_k қашықтық квадратына көбейтінділерінің қосындысына тең.

$$J = \sum_{k=1}^n m_k r_k^2.$$

Әдетте инерция моментін дененің m салмағының $r_{\text{ин}}$ инерция радиусының квадратына көбейтіндісі ретінде көрсетеді:

$$J = \sum_{k=1}^n m_k r_k^2 = m r_{\text{ин}}^2, \quad (11.5)$$

мұндағы $r_{\text{ин}}$ — бөлінген салмақ жағдайында нақты моментке тең инерция моментін алу үшін, дененің бүкіл салмағы бір нүктеде шоғырландыру қажет айналу осынен қашықтық.

Қарапайым денелердің инерция радиустары анықтамалық кестелерде (радиусы r тұтас цилиндр үшін инерция радиусы $r_{\text{ин}} = r/\sqrt{2}$), электр қозғалтқыштар роторлары мен зәкірлерінің инерция моменттері каталогтарда көрсетіледі.

Кейде қозғалтқыштарға арналған каталогтарда айнарудың жұмыс моментінің $GD_{\text{ин}}$ мәні көрсетіледі, мұндағы G — ауырлық күші (салмақ), Н; $D_{\text{ин}}$ — инерция диаметрі, м. Бұл жағдайда қозғалтқыш роторының (зәкірінің) инерция моменті, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ мынаған тең:

$$J_{\text{кз}} = GD_{\text{ин}}/4g \quad (11.6)$$

мұндағы $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — еркін азаюды тездету.

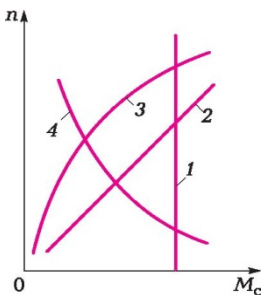
Егер қозғалтқыштың моменті $M_{\text{кз}}$, Н · м, және айналу жиілігі n , ай/мин болса, онда P қуаты, кВт мына формула бойынша анықталады:

$$P = M_{\text{кз}} \Omega_{\text{кз}} = M_{\text{кз}} n/9\,550, \quad (11.7)$$

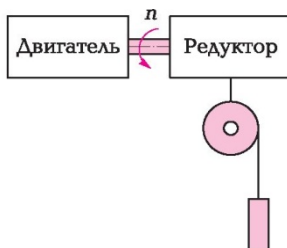
мұндағы $\Omega_{\text{кз}} = 2\pi n/60 = n/9,55 \text{ рад/с}$.

11.3. ӨНДІРІСТІК МЕХАНИЗМДЕРДІҢ МЕХАНИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ ЖӘНЕ ЭЛЕКТР ЖЕТЕКТЕРДІҢ ЖҮКТЕМЕЛІК ДИАГРАММАЛАРЫ

Электр жетекті жобалау кезінде өндірістік механизмдердің механикалық сипаттамаларын білу қажет. Негізгі сипаттамалары 11.2-суретте келтірілген:



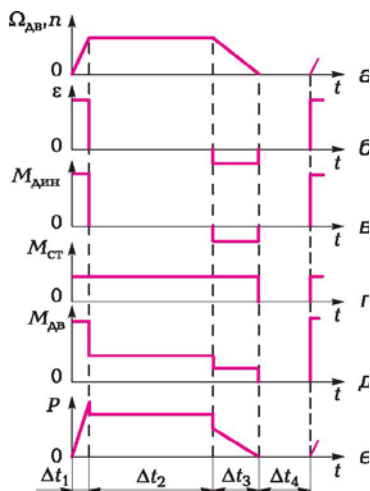
11.2-сурет



Двигатель – қозғалтқыш;
11.3-сурет.

- *айналу жиілігіне тәуелді емес механикалық сипаттамаға (1-түзу) көтергіш крандар, жүкарбалар, металл кескіш білдектерді беру механизмдері және т.б. ие;*
- *сызықтық-үдемелі механикалық сипаттамаға (2-түзу) жүктеме тізбегінің кедергісі тұрақты кезде тәуелсіз қозатын тұрақты ток генераторының жетегі ие (9.8-бөлімшені қараңыз);*
- *сызықтық емес-үдемелі (параболалық) механикалық сипаттамаға (3-тәуелділік) желдету моментін өндірістік механизмдер (ортадан тепкіш сорап, еспелі бұрандалар және т.б.) ие, себебі желдеткіштерде тежеу моменті айналу жиілігінің квадратына пропорционал;*
- *сызықтық емес-құлама механикалық сипаттама (4-тәуелділік) кейбір жоңғыш, жоңғылы, фрезерлі және басқа да кескіш білдектерге тән.*

Электр жетектің *жүктемелік диаграммасы* қозғалтқыштың айналу моментінің, тогының не қуатының уақытқа тәуелділігін сипаттайды. Көтергіш механизм қозғалтқышының бір жұмыс цикліндегі жүктемелік диаграммасын қарастырайық (11.3-сурет). ның құрылысы мынадан тұрады. Механикалық жабдық деректеріне, жұмыс технологиясына және қажетті өнімділікке сәйкес көтеру жылдамдығының, яғни бұрыштық жылдамдықтың немесе қозғалтқыштың (тахограмма) $\Omega_{\text{кз}}(t)$ немесе $n(t)$ (11.4-сурет, а) көтергішінің бір жұмыс циклін айналу жиілігінің, тездеу Δt_2 , белгіленген Δt_3 режимдегі, Δt_2 баяулау уақыт аралағы мен Δt_1 көтеру циклдерінің арасындағы үзілістерді көздейтін үлгілік диаграммасы беріледі. Бұрыштық тездеу мен баяулау
$$\varepsilon(t) = \frac{d\Omega_{\text{кз}}(t)}{dt}$$



11.4-сурет

(11.4-сурет, б) Δt_1 және Δt_2 уақыт аралығында тұрақты мәндерден және әртүрлі белгілерден тұрады.

Тездеу және тежеу уақыт аралықтарында (11.2) теңдеуі бойынша есептелген динамикалық инерция моментінің сипаттамасы 11.4, в суретінде көрсетілген.

Одан әрі (11.4) формула бойынша қозғалтқыш білігіне келтірілген статикалық момент (11.4-сурет, з), (11.1) формула бойынша қозғалтқыш білігіндегі момент (11.4-сурет, д) және (11.7) формула бойынша оның қуаты (11.4-сурет, е) анықталады.

Жүктемелік диаграмма бойынша қозғалтқыштың номиналды қуатын анықтап, оның іске қосу және максималды айналу моменттерін

диаграммада келтірілген моменттермен салыстырады (11.7-бөлімшені қараңыз).

11.4. ЭЛЕКТР ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫ ҚЫЗДЫРУ ЖӘНЕ САЛҚЫНДАТУ

Қозғалтқыштағы энергия шығындары оның жекелеген бөлшектерінің қызуына әкеледі. Қозғалтқыштың ұйғарынды қызуы қолданылатын окшаулауыш материалдардың қызуға төзімділігімен анықталады, олар қызуға төзімділігі бойынша мына кластарға бөлінеді:

окшаулау класы E B F H және C
рұқсат етілген температура, °C 120 130 155 180

Қозғалтқышты шексіз жоғары жылу өткізгіштікке ие бөгде дене ретінде қарастырып және сыртқы ортаға жылу беру қозғалтқыш пен қоршаған орта температуралары айырымының бірінші дәрежесіне пропорционал деп шамалайтын болсақ, тұрақты жүктеме жағдайында қозғалтқыштың жылулық теңгерімінің теңдеуі былай болады:

$$Pdt = Avdt + Cdv, \quad (11.8)$$

мұндағы v — қозғалтқыш пен қоршаған орта температураларының айырымы, яғни қозғалтқыштың қатты қызуы, °C; A — қозғалтқыштың

жылу бергіштігі, Вт/°С; C — қозғалтқыштың жылу сыйымдылығы, Вт · с/°С.

(11.8) теңдеудің барлық қосылғыштарын $A dt$ -ға бөлу арқылы, мына теңдеуді аламыз:

$$\frac{P}{A} = \vartheta + \frac{C}{A} \frac{d\vartheta}{dt}, \quad (11.9)$$

немесе

$$\tau_n \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta = \vartheta_y,$$

мұндағы $\tau_n = C/A$ — қозғалтқышты қыздырудың тұрақты уақыты; $\vartheta_y = P/A$ — қозғалтқышты қатты қыздырудың қалыптасқан мәні.

(11.9) дифференциалды теңдеуінің шешімі мынадай:

$$\vartheta = \vartheta_y + (\vartheta_0 - \vartheta_y) e^{-t/\tau_n}, \quad (11.10)$$

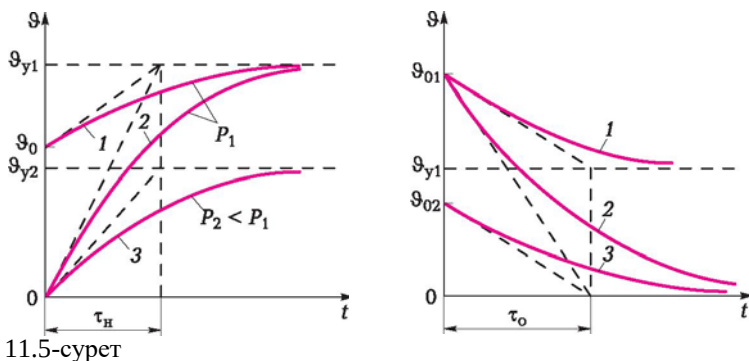
мұнағы ϑ_0 — $t = 0$ уақыт моментінде қозғалтқышты қатты қыздырудың бастапқы мәні және $\vartheta(0_-) = \vartheta(0_+)$ шарты ескерілген, яғни қозғалтқыштың температурасы секіріп өзгере алмайды.

Егер қозғалтқышты қатты қыздырудың бастапқы мәні $\vartheta_0 = 0$ болса, онда (11.10) тәуелділігі былай болады:

$$\vartheta = \vartheta_y (1 - e^{-t/\tau_n}), \quad (11.11)$$

бұл конденсатордағы (1.21) зарядтау кезіндегі кернеу уақытына тәуелділікке ұқсайды.

Қуаты аз және орташа, ашық атқарымдық өздігінен желдетілетін қозғалтқыштарда τ_n тұрақты қыздыру уақыты шамамен 1 сағатты құрайды, жоғары қуатты жабық атқарымдық қозғалтқыштарда 3-4 сағатты құрайды. Қозғалтқышты желіден ажыратқан және тоқтатқан кезде тұрақты салқындату уақыты жылу беру жағдайының нашарлау салдарынан $\tau_o = (3-5)\tau_n$ болады.



11.5-суретте қозғалтқыш білігінде P_1 бірдей қуат жағдайында бастапқы қыздырудың $v_0 > 0$ және $v_0 = 0$ мәні үшін сәйкес келетін, қозғалтқыш қыздырудың 1 және 2-тәуелділіктері құрастырылған. Егер қозғалтқыштың жүктеме қуаты $P_2 < P_1$ аз болса, онда қозғалтқышты $v_0 = 0$ жағдайында қыздыруға 3-тәуелділік сай келеді.

Қозғалтқышты салқындату процесі 11.6-суретте көрсетілген. 1-тәуелділік жүктеменің азаюына, ал 2 және 3-тәуелділіктер қозғалтқыштың желіден ажырауына сәйкес келеді.

11.5. ЭЛЕКТР ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ ТҮРІ МЕН ТИПІН ТАҢДАУ

Қозғалтқыш *түрін* таңдау кезінде (тұрақты ток, асинхронды, синхронды) оның механикалық сипаттамасы маңызды рөл ойнайды (11.7-сурет). Механикалық сипаттамаларының негізгі өлшемшарттарының бірі *қатаңдық* болып табылады:

$$\alpha = \Delta M_{\text{ай}} / \Delta n,$$

оның мәндері сипаттамалардың әртүрлі бөліктерінде әртүрлі болуы мүмкін.

Қозғалтқыш білігінде өндірістік механизм тудыратын тежеу моментінің өзгеруі қозғалтқыштың айналу жиілігінің өзгеруімен қатар жүрмеу керек болса, онда оның механикалық сипаттамасы қатаң болуы тиіс. Мұндай талаптар, мысалы, болатты суықтай илемдеу орнақтарына қойылады, онда электр жетек үшін синхронды қозғалтқыштар пайдаланылады. Алайда бұл ретте қозғалтқыштың тогы, қуаты және айналу моменті пропорционал өзгереді (8.23-бөлімшені қараңыз), бұл оның жылулық және механикалық артық жүктемесін тудыруы мүмкін.

Егер жұмыс механизмінің тежеу моментінің ұлғаюы (азаюы) қозғалтқыштың айналу жиілігінің қатар азаюына (ұлғаюына) жол берсе, онда қозғалтқыштың жұмсақ механикалық сипаттамасы дұрыс болады. Бұл ретте қозғалтқыштың тогы мен қуаты болар-болмас өзгереді (9.14-бөлімшені қараңыз).

Қуаты 100 кВт дейін болатын реттелмейтін жетектер үшін жиі іске қосу, тұрақсыз жүктеме кезінде және арнайы талаптар болмаған кезде пайдалануда ең сенімді әрі ең қарапайымы қысқа тұйықталған орамалы роторы бар асинхронды қозғалтқыш болып табылады.

Фазалық роторлы асинхронды қозғалтқыштар іске қосу моментіне не іске қосу тогына қойылатын ерекше талаптар (мысалы трансформаторлық қосалқы станцияның шектеулі қуатымен байланысқан) болған жағдайда жоғары қуатты жетектер үшін қолданылады.



Абсолютно жесткая, синхронного двигателя – абсолютті қатаң, синхронды қозғалтқыш; Асинхронная – асинхронды; Жесткая, двигателя с параллельным возбуждением – қатаң, параллель қозатын қозғалтқыш; Мягкая, двигателя со смешанным возбуждением – жұмсақ, аралас қозатын қозғалтқыш; Мягкая, двигателя с последовательным возбуждением – жұмсақ, тізбектей қозатын қозғалтқыш

Қозғалтқыштың конструкциясын (*типін*) оның жұмыс жағдайларына: қоршаған ортаны қозғалтқыштағы ықтимал ұшқындаудан (жанғыш шаң, жарылыс қауіпті қоспалар және т.б. болған жағдайда), сондай-ақ қозғалтқыштардың өзін ылғал, шаң, агрессивті химиялық заттар түсуінен қорғау қажеттілігіне және т.б. байланысты таңдайды.

Қозғалтқыш конструкцияларының бірнеше негізгі типтері бар.

Ең жақсы салқындату жағдайлары үшін мойынтіректі қалқандары мен тұғырында желдеткіш саңылаулары бар *ашық типті қозғалтқыштар* өндірістік жағдайларда жеңіл бітеліп қалу жағдайында және қызмет көрсетуші персонал ашық ток өткізгіш бөлшектерге тиіп кеткен кезде олардың токпен зақымдану қаупі туындаған жағдайда сирек қолданылады.

Қорғалған типті қозғалтқыштардың қозғалтқышты ішіне жаңбыр тамшысының, бөгде бөлшектердің, жоңқалардың түсіп кетуінен қорғайтын, бірақ шаңнан қорғамайтын торлармен жабылған желдеткіш саңылаулары болады.

Жабық типті қозғалтқыштарды шаң басқан орынжайларда ауада күйдіргіш зат булары және т.б. болған жағдайда орнатады. Мұндай қозғалтқыштарды салқындату жағдайын жақсарту үшін мәжбүрлі ауамен салқындату қолданылады. Дымқыл орынжайларда ылғалға төзімді арнайы оқшаулағышы бар қорғалған қозғалтқыштарды, жанғыш газдарды не буларды қамтитын, жарылыс қауіпті орынжайларда жарылыстан қорғалған қозғалтқыштарды орнатады.

Электр қозғалтқыштардың ұзақ, қысқа мерзімді және қайталама-қысқа мерзімді номиналды жұмыс режимдері болады.

Электр қозғалтқыштың *ұзақ номиналды жұмыс режимі* деп оның Р өзгермейтін жүктемедегі жұмыс режимін айтады, бұл жүктемеде оның барлық бөліктерінің v температурасы қоршаған ортаның температурасынан асуы v_6 белгіленген мәндерге жетеді. Ұзақ уақыт тұрақты жүктемемен желдеткіштер, сорғылар, компрессорлар, текстильді білдектер жұмыс жасайды.

Ұзақ уақыт жұмыс жасауға арналған электр қозғалтқыштың қалқаншасында «Длит.» қысқарған сөзін не S_1 символын және біліктегі $P_{\text{ном}}$ номиналды қуат мәнін көрсетеді.

Электр қозғалтқыштың *қысқа мерзімді номиналды жұмыс режимі* деп оның Р өзгермейтін жүктемедегі жұмысының $\Delta t_{\text{жс}}$ уақыт аралықтары желіден ажырататын уақыт аралықтарымен алмасатын режимді айтады. Бұл ретте жүктейтін уақыт аралығында қозғалтқышты қатты қыздыру қалыптасқан мәндерге жетеді, ал тоқтататын уақыт аралығында қозғалтқыштың барлық бөліктері қоршаған ортаның температурасына дейін салқындайды.

Қысқа мерзімді жүктеу режимінде ажыратқыш көпірлердің, шлюздардың, құбыр және газ құбырлары ысырмаларының және басқа да механизмдердің жетектері жұмыс жасайды. Қысқа мерзімді жұмыс режиміне арналған электр қозғалтқыштың қалқаншасында біліктегі $P_{\text{ном}}$ номиналды қуат жағдайындағы жұмыстың номиналды уақыт аралығы (10, 30, 60, 90 мин) және S_2 символы көрсетіледі.

Электр қозғалтқыштың *қайталама-қысқа мерзімді номиналды жұмыс режимі* деп оның Р өзгермейтін жүктемедегі жұмысының қайталама $\Delta t_{\text{жс}}$ уақыт аралықтары желіден ажырататын Δt_0 уақыт аралықтарымен алмасатын режимді айтады. Бұл ретте қозғалтқыштың барлық бөліктерінің температуралары белгіленген мәндерге жете алуы үшін, $\Delta t_{\text{жс}}$ және Δt_0 уақыт аралықтарының ұзақтығы аз.

Бұл режимде қайталама циклдер ұзақтығының типтік мәні: $\Delta t_{\text{жс}} + \Delta t_0 \leq 10$ мин, ал салыстырмалы қосу ұзақтығы:

$$\text{ПВ} = \frac{\Delta t_{\text{р}}}{\Delta t_{\text{р}} + \Delta t_{\text{о}}} 100 \% \quad (11.12)$$

15, 25, 40 және 60% стандартты мәндеріне ие. Қайталама-қысқа мерзімді режимде көтергіш крандардың және көптеген металл кескіш білдектердің электр жетектері жұмыс жасайды. Қайталама-қысқа

мерзімді режимде жұмыс жасауға арналған электр қозғалтқыштың қалқаншасында S_3 символы және біліктегі $P_{\text{ном}}$ номиналды қуат жағдайындағы салыстырмалы қосу ұзақтығының (ПВ) мәні көрсетіледі.

11.7. ЭЛЕКТР ҚОЗҒАЛТҚЫШТЫҢ ҚУАТЫН ЕСЕПТЕУ ЖӘНЕ ОНЫ ТАҢДАУ

Қозғалтқыштың қуатын дұрыс есептеу және оны таңдау электр жетектің үнемділігі, өнімділігі мен сенімділігі талаптарын қанағаттандыруы тиіс. Бұл ретте электр қозғалтқыштың жұмыс режимі ескерілуі тиіс.

Ұзақ уақыттық жұмыс режимі. Ұзақ уақыттық өзгермейтін жүктеме жағдайында қозғалтқыштың қуаты табыстағыш механизмнің ПӨК-ін ескерілген жүктеме қуатына тең деп алынады. Одан кейін каталог бойынша таңдалған, қуаты жағынан жақын қозғалтқышты іске қосу моментінің мәні бойынша тексеру қажет. Егер уақыты жағынан ұзақ жүктеме өз мәнін циклдеп өзгертсе, онда қозғалтқыштың қуатын есептеу үшін орташа шығындар және эквивалентті шамалар әдістері қолданылады.

Орташа шығындар әдісінің мәнісі – өзгермейтін жылу беру жағдайында қозғалтқышты қатты қыздыру бір циклдегі орташа шығындармен анықталады (11.8-сурет):

$$\Delta P_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^m \Delta P_i \Delta t_i / \Delta t_{\text{ц}}, \quad (11.13)$$

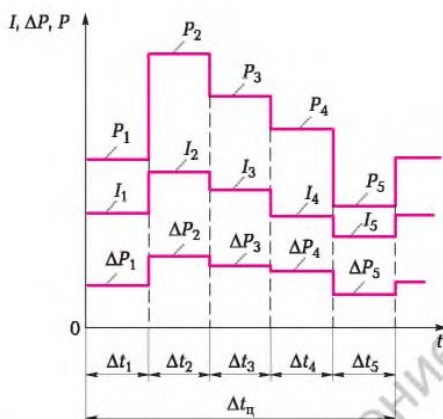
мұндағы ΔP_i — i -ші уақыт аралығындағы шығын қуаты; Δt_i — i -ші уақыт аралығының ұзақтығы; $\Delta t_{\text{ц}}$ — циклдің уақыт аралығының ұзақтығы; m — циклдегі уақыт аралықтарының саны.

Орташа шығындар қуатының табылған мәні біліктегі $P_{\text{ном}}$ қозғалтқыштың өзгермейтін номиналды қуат жағдайындағы шығындар қуатымен салыстырылады және егер:

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}})/\eta_{\text{ном}}, \quad (11.14)$$

болса, онда қозғалтқыштың әртүрлі бөліктері температурасының орташа асу мәні $v \leq v_{\text{ном}}$ ұйғарынды мәнінен аспайтын болады.

Қозғалтқыштың қуатын орташа шығындар әдісімен есептеу тәртібі келесідей. Өндірістік механизмнің жүктемелік диаграммасы бойынша (11.4-суретті қараңыз) қозғалтқыш білігіндегі орташа қуат $P_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^m P_i \Delta t_i / \Delta t_{\text{ц}}$



11.8-сурет

анықталады және каталог бойынша алдын ала номиналды қуатты қозғалтқыш таңдалады:

$$P_{\text{ор}} \leq P_{\text{ном}} \quad (11.15)$$

Каталогтан әртүрлі айналу жиілігіндегі қозғалтқыштың ПЭК ауытқымаларын жүктеу функцияларына орналастырып, жүктемелік диаграмманың әрбір уақыт аралығындағы шығын қуатын, (11.13) бойынша орташа шығын қуатын табамыз және оны (11.14) бойынша номиналды шығын қуатының мәнімен салыстырамыз.

Эквивалентті шамалар әдісінің мәнісі – қозғалтқышты таңдау үшін токтың, моменттің және қуаттың эквивалентті шамаларының мәндері қолданылады. Мысалы, қозғалтқыштағы айнымалы шығындар қуаты әрбір уақытта Ri^2 тең болады, мұндағы R және i – қозғалтқыш орамасының активті кедергісі және тогы. Қозғалтқыштың бір циклде өзгертін тогын (11.8-суретті қараңыз), айнымалы шығындардың қуаттары екі жағдайда да тепе-тең болу шартымен, өзгермейтін эквиваленттік токпен алмастыруға болады:

$$I_{\text{ЭК}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m I_i^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^m \Delta t_i}}. \quad (11.16)$$

Егер эквивалентті токтың табылған мәні (11.15) бойынша алдын ала таңдалған қозғалтқыштың жағдайларын қанағаттандырса:

$$I_{\text{эк}} \leq I_{\text{ном}},$$

онда қозғалтқыш дұрыс таңдалған. Эквивалентті ток әдісі гистерезис пен құйынды токтарға арналған магнит өткізгіштегі және қосарлы тиін дөңгелегі не терең ойық түріндегі қысқа тұйықталған орамалы роторы бар асинхронды қозғалтқыштардағы тұрақты шығындардың қуатын есептеу қажет болған жағдайда қолданылмайды (8.10-бөлімшені қараңыз). Соңғысы ротор орамасының активті кедергісі іске қосу және тежеу режимдерінде айнымалы болатынымен түсіндіріледі.

Қозғалтқыштың айналу моменті мен қуатының мәндері тогының мәнінен пропорционал деп алып, (11.16) теңдеуден эквивалентті момент пен қуат өрнегін аламыз:

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_i^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^m \Delta t_i}}, \quad P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m P_i^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^m \Delta t_i}}.$$

Егер эквивалентті момент пен қуат қозғалтқыштың (11.15) бойынша алдын ала таңдалған аттас шамаларының номиналды мәндерінен аспаса:

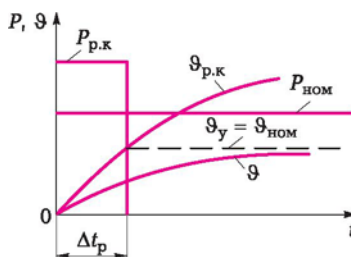
$$\begin{aligned} M_{\text{ном}} &\geq M_{\text{эк}} \\ P_{\text{ном}} &\geq P_{\text{эк}} \end{aligned} \quad (11.17)$$

онда қозғалтқыш дұрыс таңдалған.

Эквивалентті момент пен қуат әдістері тізбектей қозатын тұрақты ток қозғалтқыштарын есептеу үшін қолданылмайды, себебі оның моменті мен қуаты оның тогына пропорционал болмайды (9.14-бөлімшені қараңыз).

Қысқа мерзімді және қайталама қысқа мерзімді жұмыс режимдері. Қысқа мерзімді жұмысқа арналған қозғалтқыштар нормаланған жұмыс ұзақтығымен шығарылады: 10, 30, 60 және 90 мин. Бұл ретте каталог бойынша таңдалған қозғалтқыш номиналды қуат жағдайында көрсетілген уақыт аралықтарында толықтай қыздыру бойынша пайдаланылады.

Қысқа мерзімді ($P_{\text{к.р}}$) жүктеме режимі үшін ($P_{\text{ном}}$) ұзақ жүктеме ржіміне арналған қозғалтқыштар қолданылуы мүмкін. Бұл қозғалтқыштарды, қозғалтқышты $v_{\text{к.р}}$ қыздыру ұйғарынды $v_{\text{ном}}$



11.9-сурет

деңгейінен асып кетпейтіндей етіп, жұмыстың $\Delta t_{\text{ж}}$ уақыт аралығында механикалық жолмен артық жүктеуге болады (11.9-сурет). Көп жағдайда қысқа мерзімді жүктеме режимінде бұл қозғалтқыштар толықтай қыздыру бойынша пайдаланыла алмайды, себебі механикалық артық жүктеу бойынша шектеулер ерте көріне бастайды.

Өртүрлі қозғалтқыштардың артық жүктемелік қабілеті $k_{\text{кз}} = P_{\text{max}}/P_{\text{ном}}$

мына мәндерге ие:

тұрақты ток қозғалтқыштары	2—2,5
қалыпты атқарымдық қысқа тұйықталған орамалы	
роторы бар асинхронды қозғалтқыштар.....	1,7—2,2
дәл осы фазалық роторлы қозғалтқыштар	2,0—2,5
синхронды қозғалтқыштар	2,0—2,5

Ұзақ мерзімді жүктеме режиміне арналған, қысқа мерзімді жүктеме режиміндегі қозғалтқыштың қуатын есептеу келесідей. Жүктемелік диаграммадан қысқа мерзімді жүктеменің қуатын анықтайды, мысалы, $P_{\text{к.р}} = 20$ кВт. Артық жүктемелік қабілеті $k_{\text{кз}} = 2$ болатын асинхронды қозғалтқышты алдын ала таңдайды да, оның номиналды қуатын анықтайды: $P_{\text{ном}} = P_{\text{к.р}}/2 = 20/2 = 10$ кВт. Каталог бойынша номиналды қуаты мәні бойынша көбірек жақын қозғалтқыш таңдалады, одан кейін іске қосу және максималды айналу моменттерінің мәндері бойынша тексеріледі.

Қайталама-қысқа мерзімді жұмысқа арналған қозғалтқыштар салыстырмалы (11.12) қосу ұзақтығының нормаланған мәндерімен шығарылады. Каталог бойынша таңдалған қозғалтқыш $P_{\text{ном}}$ номиналды қуат жағдайында және $P_{\text{Вном}}$ қосу ұзақтығы жағдайында толықтай қыздыру бойынша пайдаланылады. Салыстырмалы номиналды $P_{\text{Вном}}$ мәнінің қосу ұзақтығы ұлғайған (азайған) жағдайда қозғалтқыштың жүктеме қуаты оның $P_{\text{ном}}$ номиналды қуатының мәніне қатысты азайтылуы тиіс (ұлғайтылуы мүмкін).

Ұзақ мерзімді жүктеме режиміне арналған, қайталама-қысқа мерзімді жұмыс режиміндегі қозғалтқыштың қуатын есептеу тәртібі келесідей тұжырымдалады. Механикалық беріліс ПӘК-і ескерілген өндірістік механизмнің жүктемелік диаграммасы бойынша қозғалтқыш білігіндегі орташа $P_{\text{ор}}$ қуат мәнін есептейді. Каталог бойынша номиналды қуаты мәні бойынша көбірек жақын

қозғалтқыш таңдалады, одан кейін іске қосу және максималды айналу моменттерінің мәндері мен (11.14) және (11.17) шарттары бойынша тексеріледі.

11.8. ЭЛЕКТР ЖЕТЕКТІ БАСҚАРУ

Электр жетекті басқару жетекті іске қосуды, жылдамдығын реттеуді, тежеуді, реверстеуді, сондай-ақ технологиялық процестің талаптарына сәйкес жұмыс режимдерін сақтауды жүзеге асырудан тұрады.

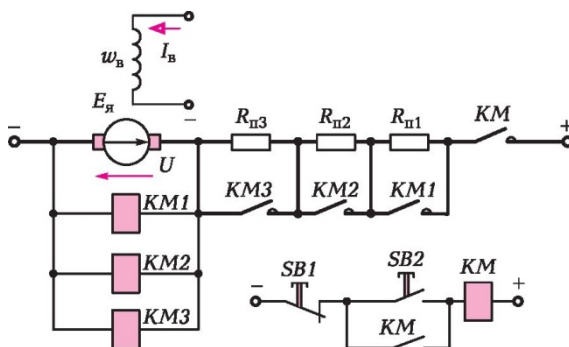
Электр жетектерді басқарудың заманауи жүйелері ондаған жеке элементтерден тұрады, сондықтан қағидалық басқару схемаларын сызу олардың оқылуын жеңілдететін ережелер бойынша жүргізіледі.

Принциптік схемаларда бас және көмекші тізбектер болады. *Бас тізбектерге* қозғалтқыштардың күш тізбектері, *көмекші тізбектерге* электрлік автоматика және басқару аппараттарын (реле, контакторлар, магниттік іске қосқыштар және т.б.) қамтитын басқару тізбектері жатады. Біріншісі жуан сызықтармен, екіншісі жіңішке сызықтармен белгіленеді. Бұл ретте бір аппаратқа тиесілі әртүрлі элементтер, мысалы контактор орамалары мен контактілері, бірдей әріптермен және цифрлармен белгіленеді.

Реттелмейтін немес сатылы реттелетін жұмыс режимдері бар жетектерде реле-контактілік аппараттар негізінде ажыратылған басқару жүйелері қолданылады, біраз күрделі жетектерде басқарылмалы түрлендіргіш негізінде тұйықталған басқару жүйелері қолданылады.

Тұрақты тоқтың электр жетегі. Ажыратылған реле-контактілік басқару жүйелерінде тұрақты ток қозғалтқыштарын іске қосу процесі зәкірдің айналу жиілігі, ток не уақыт мәндерінің функциясында, ал тежеу процесі зәкірдің айналу жиілігі не уақыт мәндерінің функциясында жүзеге асырылуы мүмкін.

Зәкірдің айналу жиілігі функциясында тәуелсіз қозатын тұрақты ток қозғалтқышын іске қосу мен тежеуді басқару схемасын қарастырайық. Бұл ретте зәкірдің айналу жиілігі (9.5) формула бойынша зәкірдің E_z ЭҚК-іне пропорционал екенін пайдаланамыз, ол (9.3) формула бойынша зәкір тізбегінің кедергісінде жүктеменің төмен азаю жағдайында қылшақтар арасындағы U кернеуіне тең.



11.10-сурет

Қозғалтқышты іске қосуды басқару схемасында $KM1$, $KM2$, $KM3$ контакторларының әрқайсысы (11.10-сурет) коллектор қылшақтарының арасындағы, n зәкірдің айналу жиілігінің мәніне пропорционал U кернеуінің белгілі бір мәніне бапталған. Зәкірдің айналу жиілігі, мысалы $n_1 < n_2 < n_3$ мәндеріне дейін ұлғайған сайын, қылшақтар арасындағы кернеу $U_1 < U_2 < U_3$ мәндерін дейін ұлғаяды, артынан уақыт бойынша $KM1$, $KM2$ және $KM3$ контакторлары іске қосылып, өзінің бас контактілерімен R_{n1} , R_{n2} және R_{n3} резисторларын тұйықтайды. Іске қосу реостатының барлық сатылары шунтталған кезде, қозғалтқыш табиғи сипаттама бойынша жұмыс жасайтын болады (9.34-суретті қараңыз).

Қозғалтқышты іске қосу $SB2$ («Пуск») батырмасын басу арқылы жүзеге асырылады. Бұл ретте KM контакторы іске қосылады, оның бас контактілері зәкір тізбегін желіге қосады, ал көмекші контактілері $SB2$ батырмасының контактілерін шунттап, оар ажырағаннан кейін қозғалтқыштың қосылуын қамтамасыз етеді.

Қозғалтқышты ажырату $SB1$ («Стоп») батырмасын басу арқылы жүзеге асырылады. Бұл ретте KM контакторы өшеді, оның бас контактілері мен көмекші контактілері ажыратылады, қозғалтқыштың зәкір тізбегі желіден ажырайды, ал KM контакторы жедел токтағы көмекші тізбектен ажырайды.

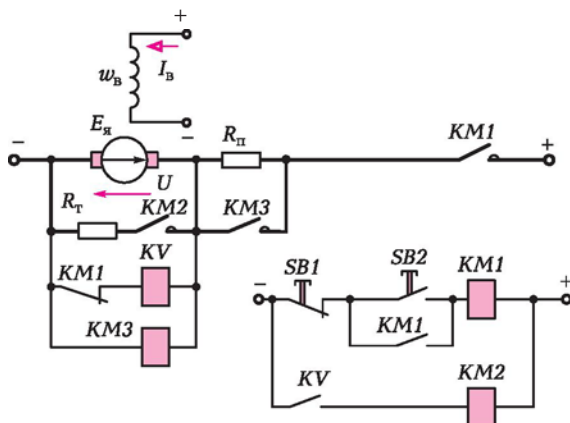
Тұрақты токтағы электр қозғалтқышты электромагниттік тежеудің үш тәсілі бар: энергияны қайтару, қарсы қосу арқылы және динамикалық (9.16-бөлімшені қараңыз).

Зәкірдің айналу жиілігі функциясында тәуелсіз қозатын тұрақты ток қозғалтқышын тежеуді басқару схемасын қарастырайық (11.11-сурет). $SB1$ батырмасын басқаннан кейін $KM1$ контакторы ажыраған кезде оның көмекші контактісі зәкір тізбегіне параллель қосылған KV релесін басқару тогының тізбегіне тұйықталады.

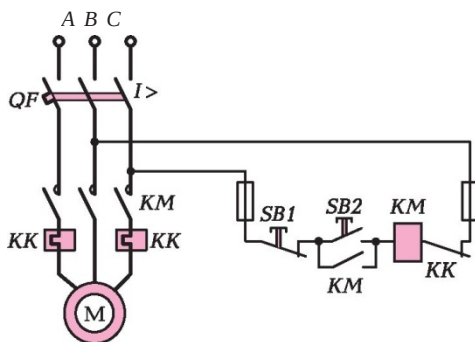
Зәкір орамасы шықпаларының арасындағы кернеудің мәні қозғалтқышты ажырату процесінің басында жоғары болғандықтан, KV релесі іске қосылады да, өз контактілерімен $KM2$ контакторын басқару катушкасының тізбегін тұйықтайды. Ал аталмыш контактор бас контактілерімен зәкір тізбегін R_t резисторына қосады, бұл қозғалтқышты тежеуге негіз болады. Қозғалтқышты $SB2$ батырмасын басу арқылы қосқан келе басқару схемасының жұмысы 11.10-суреттегі іске қосу схемасының жұмысына ұқсас болады. Қозғалтқышты іске қосуды (11.10-суретті қараңыз) және тежеуді (11.11-суретті қараңыз) басқару схемаларын салыстыратын болсақ, оларды қиыстыруға болатынын көруге болады.

Синусоидалық токтың электр жетегі. Қысқа тұйықталған орамалы роторы бар, қуаты аз асинхронды қозғалтқыштарды іске қосу әдетте магниттік іске қосқыштардың көмегімен жүзеге асырылады, олар синусоидалық ток контакторынан және оған кіріктірілген жылулық релелерден тұрады.

Асинхронды қозғалтқышты іске қосудың қарапайым схемасы 11.12-суретте келтірілген. QF автоматты ажыратқышы қосулы болған кезде, қозғалтқышты іске қосу $SB2$ батырмасын басу арқылы жүзеге асырылады. Бұл ретте KM контакторы іске қосылады. Оның бас контактілері тұйықталып, статор фазаларының орамаларын желіге қосады. Сонымен қатар, басқару тізбегінде $SB2$ батырмасын оны бастапқы күйіне қайтарған кезде контактордың жұмыс күйі өзгермейтіндей етіп блоктайтын KM көмекші контактілері тұйықталады. Бұл ретте контакторды басқару тогының тізбегі ажыратылады.



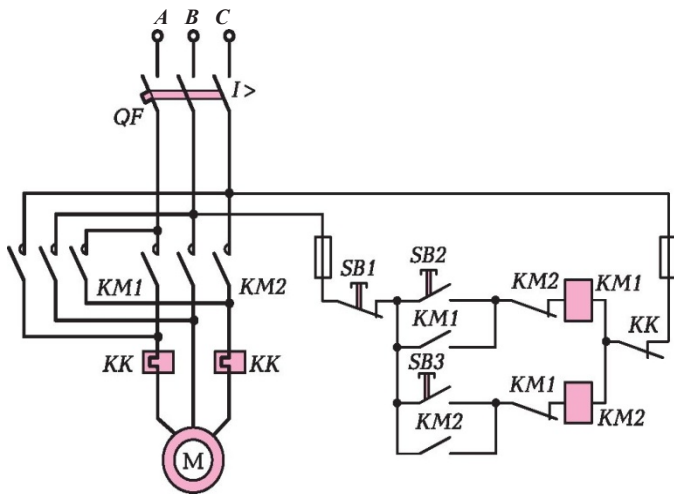
11.11-сурет



11.12-сурет

Автоматты ажыратқыш қозғалтқышты қысқа тұйықталу токтарынан, ал жылулық реле ұзақ мерзімді артық жүктемелерден қорғайды.

Айналу бағытын өзгерту қажет болған жағдайда (мысалы, құбыр желілерінде ысырма жетегінің, білдектерді беру механизмдерінің жұмысында және т.с.с.), қысқа тұйықталған орамалы роторы бар асинхронды қозғалтқышты басқару реверсивті магниттік іске қосқыштың (11.13-сурет) көмегімен жүзеге асырылуы мүмкін.



11.13-сурет

QF автоматты ажыратқышы қосулы болған кезде, қозғалтқышты бір айналу бағытында іске қосу *SB2* батырмасын («Вперед») басу арқылы жүзеге асырылады. Бұл ретте *KM1* контакторы іске қосылады да, оның бас контактілері тұйықталып, статор фазаларының орамаларын желіге қосады. Сонымен қатар, *KM1* көмекші контактілері *SB2* батырмасын оны бастапқы күйіне қайтару кезінде блоктайды және *KM2* контакторын басқару тізбегін ажыратады.

Қозғалтқышты қарсы айналу бағытында қосу үшін әуелі *SB1* батырмасын басып, басқару тізбегін бастапқы электрлік күйіне қайтару қажет, одан кейін *SB3* («Назад») батырмасын басу қажет. Бұл ретте *KM2* контакторы іске қосылады да, оның бас контактілері тұйықталып, статор фазаларының орамаларын желіге екі фазаны қосу тәртібі өзгертіндей етіп қосады. Статор токтарының магнит өрісінің айналу бағыты да өзгереді (8.8, *б* суретін қараңыз). *KM2* көмекші контактілері *SB3* батырмасын оны бастапқы күйіне қайтару кезінде блоктайды және *KM1* контакторын басқару тізбегін ажыратады. Реверсивті магниттік іске қосқыштарда *SB2* және *SB3* батырмаларын электрлік блоктаудан басқа, механикалық блоктау қарастырылған, ол үш фазалық тізбекте екі батырманы да бір уақытта қателесіп басып алған жағдайда қысқа тұйықталудан қорғайды.

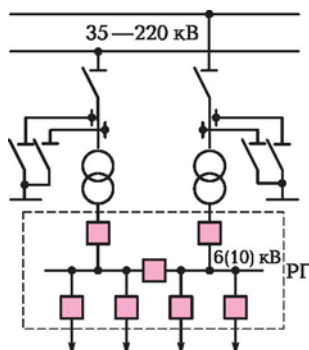
БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Электр жетек қандай негізгі бөліктерден тұрады?
2. Электр жетектің қандай жүйесі тұйықталған және қандай жүйесі ажыратылған деп аталады?
3. Өндірістік механизмдерге тән механикалық сипаттамаларды көрсетіңіз.
4. Электр жетектің номиналды: ұзақ мерзімді, қысқа мерзімді және қайталама-қысқа мерзімді жұмыс режимдеріне анықтама беріңіз.
5. Реле-контактілік аппараттар негізіндегі электр жетекті басқару жүйесін қандай негізгі функцияларды атқарады?

12.1. ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІ ТУРАЛЫ ҰҒЫМДАР

Жоғары қуатты электр станцияларында өндірілетін электр энергиясы шалғайдағы тұтынушыларға 35-750 кВ жоғары кернеулі тарату желілері бойынша жеткізіледі. Тұтынушының таратушы желісінің (қалалық) кернеуі 6(10)кВ болғандықтан, тарату желілерінің кернеуін азайту үшін *бас төмендеткіш қосалқы станция* қызмет етеді (12.1-сурет). Ол тарату желілеріне ажыратқыштар мен айырғыштар арқылы қосылатын төмендеткіш трансформаторларды қамтиды; трансформаторлардың жоғары кернеулі шықпаларында жөндеу жұмыстары мен профилактикалық тексерулерді жүргізу кезінде қажетті қысқа тұйықтағыштар орнатылады.

Трансформаторлардың төмен кернеулі 6(10) кВ шықпаларына бөлшектелген жалпы шиналардан тұратын *таратқыш пункт* (ТП) қосылады, ол шиналарға ажыратқыштар арқылы жеке тұтынушылар қосылады. Таратқыш пункттар желінің кернеу трансформациясы қажет емес басқа бөліктерінде орнатылады.



12.1-сурет

Электр энергиясын тұтынушылардың көбі 1 000 В-дан төмен кернеулі желілердегі жұмысқа есептелгендіктен, оларға тікелей жақын жерде төмендеткіш трансформаторлары және әртүрлі коммутациялық аппараты бар *трансформаторлық қосалқы станциялар* орналастырылады.

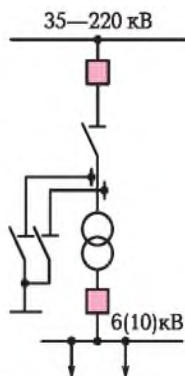
Ірі өнеркәсіптік кәсіпорындарды электр энергиясымен жабдықтау үшін магистральды тарату желілерінен *терек*

кірмелі желі тартады. Бұл жағдайда төмендеткіш қосалқы станцияны кәсіпорын аумағында орнатады және трансформаторлар арқылы терең кірмелі желілермен байланыстырады (12.2-сурет).

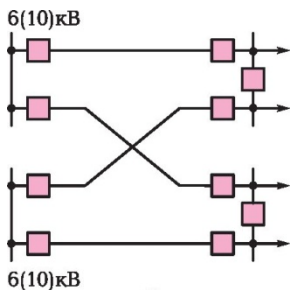
Радиалды (12.3-сурет, а), магистральды (12.3-сурет, б) және аралас таратқыш желілер болады. Қандай да бір таратқыш желіні таңдау тұтынушының маңыздылық дәрежесіне байланысты болады, ол бойынша бұл желілерді үш санатқа бөледі. Ең көп жауаптысы бірінші санат, ең аз жауаптысы үшінші санат болып табылады.

Тұтынушыларды екі энергия көзінен қуаттауды резервтейтін таратқыш желінің радиалды конструкциясы бірінші санаттағы тұтынушылар үшін қолданылады, ал жеңілдетілген нұсқалары аз жауапты тұтынушылар үшін қолданылады. Таратқыш желілердің магистральды және аралас құрылымдары үшін де осыны айтуға болады.

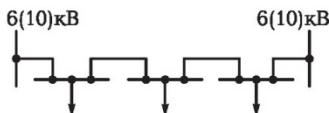
Таратқыш желілер жұмысының үздіксіздігі автоматты релелік қорғаныспен қамтамасыз етіледі. Көбінесе бұл желінің жекелеген бөліктеріндегі зақымдану (жабдықтың ток өткізгіш бөліктерінің қысқа тұйықталуы, жерге тұйықталу, кернеудің қалыптан тыс өзгеруі, энергияны тарату бағытының өзгеруі) кезінде ажыратқыштарға автоматты түрде әсер ететін релелердің өте күрделі жиынтығы болып табылады. Релелік қорғаныс қалыпты жұмыс режимінің бұзылғанын білдіреді, одан кейін автоматика құрылғыларымен бірге электрмен жабдықтау жүйелерінің элементтерін (трансформаторларды, қуаттау желілерін және т.с.с.) ажыратуды және қайта қосуды орындайды, электр энергиясының резервтік көздерін автоматты түрде қосады және қуат жеткіліксіз болған жағдайда электрмен жабдықтау жүйесінің жүктемесін азайтады.



12.2-сурет



а



б

12.3-сурет

Релелік қорғанысқа қойылатын негізгі талаптар – іріктегіштік (талғамдылық), әрекет шапшаңдығы, сенімділік және сезімталдық.

Қорғаныс әрекеті іріктегіштігінің мәнісі – желінің зақымданған бөлігі қондырғыға жақын ажыратқыштар арқылы электр энергиясы көздерінен ажыратылады, соның арқасында электр энергиясын қабылдағыштардың минималды санын қалыпты электрмен жабдықтау режимі бұзылады.

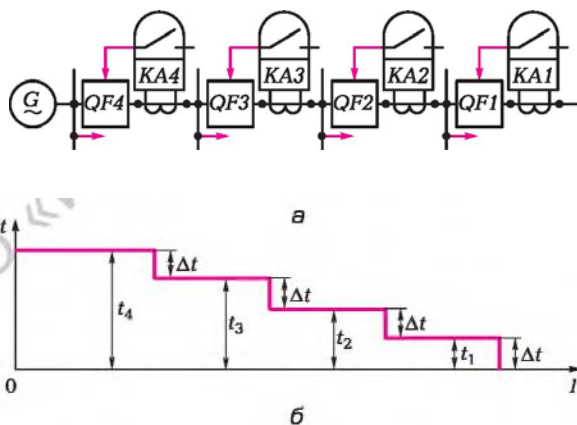
Қорғаныс әрекетінің шапшаңдығы зақымданған бөліктің бұзылу көлемін кішірейтуге, кернеу төмендеуінің басқа да электр энергиясын қабылдағыштардың жұмысына әсерін бәсеңсітуге, электр жарығының сапасын жақсартуға және т.б. мүмкіндік береді.

Қорғаныс сезімталдығы желінің зақымдарына олар пайда болған сәттен бастап-ақ дер кезінде жауап қайтару үшін қажет.

Қорғаныс сенімділігі – реленің авария кезінде іске қосылу мүлтісіздігі. Жоғары сенімділікті қамтамасыз ету үшін желінің зақымданған бөліктерін негізгі қорғаныс істен шыққан кезде ажырататын резервтік қорғаныс қолданылады.

Уақыт ұстамын қолдану ажырату іріктегіштігіне қол жеткізудің ең қарапайым жолдарының бірі болып табылады.

Іріктемелі қорғаныс мысалы ретінде G қосалқы станциясынан $t_1—t_4$ уақыт ұстамы бар $KA1—KA4$ максималды ток релелерімен және сәйкесінше $QF1—QF4$ ажыратқыштарымен бір жақты қуаттайтын радиалды желінің қорғанысын алуға болады (12.4-сурет, а). Реле іске қосылған кезде жедел ток тізбегі тұйықталады, олар арқылы тиісті ажыратқышты ажыратуға арналған электр жетек әрекетке келтіріледі.



12.4-сурет

Желінің көршілес бөліктеріндегі реленің іске қосылу уақытының Δt айырымы *уақыт ұстау сатысы* деп аталады. Оның мәні алдыңғы бөліктің релесі іске қосылып үлгеріп, өшірілген ажыратқыштағы доға келесі бөлік релесінің іске қосылу уақыты жеткенге дейін үзілетіндей етіп таңдалады. Бұл ретте ажыратылған және G қосалқы станциясынан шалғай радиалды желі бөліктерінен басқа бүкіл желі үздіксіз жұмыс істеуін жалғастырады. Мұндай іріктемелі қорғаныстың негізгі кемшілігі – электр энергиясы көздеріне жақын бөліктерде уақыт ұстамының (Δt) шамадан тыс жоғарылауы болып табылады (12.4-сурет, б). Бұл қорғаныстың тез әрекеттік талабына қайшы келеді. Әдетте, зақымданған бөлікті ажырату уақыты 0,04-0,16 секундтан аспауы тиіс.

12.2. ЭЛЕКТР ЖЕЛІСІНІҢ СЫМДАРЫН ТАҢДАУ

Электр энергиясын қабылдағыштар жүктемесінің тербелістері кезінде электр желісінің сымдарында *кернеудің азаюы* өзгереді:

$$\Delta U = IR_A = I p_v l / S$$

мұндағы I , R_A , p_v , l және S — ток, кедергі, көлемді меншікті кедергі (2.4-бөлімшені қараңыз), $U_{\text{ном.к}}$ номиналды кернеулі электр энергиясының көзі мен төмендегі кернеулі электр энергиясының қабылдағышын жалғайтын сымдардың көлденең қимасының ұзындығы мен ауданы:

$$U_{\text{каб}} = U_{\text{ном.к}} - \Delta U.$$

Энергия көзі кернеуінің номиналды мәніне жатқызылған кернеудің төмендеуі мынаған тең (%):

$$\varepsilon = \Delta U / U_{\text{ном.к}} 100\% = I / U_{\text{ном.к}} p_v l / S 100\%.$$

Кернеу төмендеген кезде қызу шамдарының жарық ағыны күрт азайып, қозғалтқыштардың токтары ұлғаяды. Қызу шамдары кернеу ұлғайған кезде істен шығуы мүмкін, ал қозғалтқыштар рұқсат етілмеген жағдайларда жұмыс істейді. Сондықтан да $U_{\text{каб}}$ кернеуінің номиналды мәннен ауытқуы азаю тұрғысында 2,5-5%, ұлғаю тұрғысында 5%-ға шектелген.

12.1-кесте. Резеңкелі және полихлорвинилді оқшаулаушы мен алюминий тарамдары бар сымдардың рұқсат етілген ұзақ мерзімді ток жүктемелері

Ток өткізгіш тарамның қимасы, мм ²	Жүктеме тогы, А					
	Ашық төселген сым	Бір оқшаулауыш құбырда төселген сым				
		бір тарамды, дана			екі тарамды, дана	үш тарамды, дана
		екі	үш	төрт	екі	бір
2,5	24	20	19	19	19	16
4	32	28	28	23	25	21
6	39	36	32	30	31	26
10	60	50	47	39	42	38
16	75	60	60	55	60	55
25	105	85	80	70	75	65
35	130	100	95	85	95	75
50	165	140	130	120	125	105
70	210	175	165	140	150	135
95	255	215	200	175	190	165
120	295	245	220	200	230	190
150	340	275	255	—	—	—
185	390	—	—	—	—	—
240	465	—	—	—	—	—
300	535	—	—	—	—	—
400	645	—	—	—	—	—

Электр желісі сымдарындағы ток олардың қызуына әкеледі. Біршама қызу сымдардың оқшаулау қызметінің мерзімін азайтады, ал оқшауланбаған сымдар тез тотығып кетеді. Сымдарды рұқсат

етілген қызу бойынша таңдау кезінде қызу процестерінің күрделі есептеулерін жүргізбейді, әртүрлі сымдарға арналған рұқсат етілген токтардың және оларды төсеу жағдайларының кестесін пайдаланады (12.1-кесте).

Электр желісін есептеу кезінде әуелі кернеудің рұқсат етілген төмендеуіне сүйене отырып, анықтамалық бойынша ең жоғары мәнге дейін дөңгелектеу арқылы сымдар қимасын анықтайды, одан кейін таңдалған сымдарды рұқсат етілген қызу бойынша тексереді.

Қысқа тұйықталу желі сымдарындағы біршама токтармен қатар жүруі мүмкін. Бұл ретте коммутациялық аппараттардың тағайын тогы қысқа тұйықталу пайда болған кезден бастап зақымданған бөлікті ажыртқанға дейінгі аз уақыт аралығында жылу берілісін есептемей қоюға болатындай етіп есептеледі.

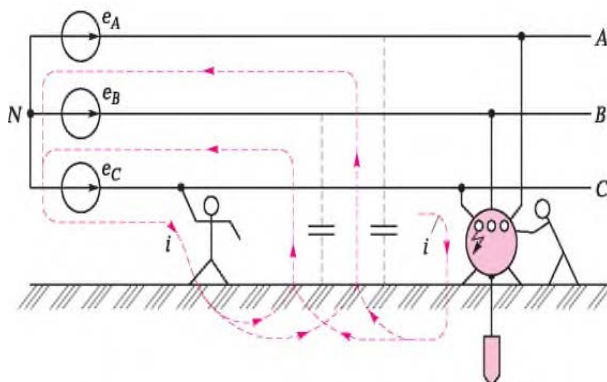
12.3. ТЕХНИКАЛЫҚ ЭЛЕКТР ҚОРҒАНЫС ҚҰРАЛДАРЫ

Адам токтың әсерін 0,6-1,5 мА-дан бастап сезе бастайды, 10-15 мА ток кезінде оның зақымдаушы токтың тізбегін өз бетінше үзе алмай қалады. 50-60 мА ток тыныс алу мүшелері мен жүрек-қантамыр жүйесін зақымдайды.

250-300 В-ға дейінгі кернеу кезінде тұрақты ток жиілігі 50 Гц синусоидалық токқа қарағанда қауіпсіз. 400-600 В кернеу кезінде тұрақты және синусоидалық токтардың қаупі іс жүзінде бірдей болады, ал 600 В-дан астам кернеу кезінде тұрақты ток синусоидалық токқа қарағанда қауіпті (12.2-кесте).

12.2-кесте. Электр қондырғысының қалыпты (авариялық емес) жұмыс режимінде адам арқылы өтетін ең жоғары рұқсат етілген $U_{жн}$ жанасу кернеулері және I токтары

Токтың тегі мен жиілігі	Ең жоғары рұқсат етілген мәндер	
	$U_{пр}, В$	$I, мА$
Айнымалы, 50 Гц	2	0,3
Айнымалы, 400 Гц	3	0,4
Тұрақты	8	1,0



12.5-сурет

Кернеуі 1 000 В-ға дейінгі және 1 000 В-дан жоғары электр жабдығын пайдалану кезіндегі техникалық қорғаныс құралдары болады. Көбінесе электр жарақаттары кернеуге қосылған ток өткізгіш бөліктерге немесе электр оқшаулауыш зақымданған кезде электр жабдығының металдық конструктивтік бөліктеріне (корпус, қаптама және т.с.с.) байқаусызда тиіп кеткен жағдайда пайда болады.

Өнеркәсіптік жиіліктегі синусоидалық ток тізбектері оқшауланған және тікелей тұйықталған бейтараптама көзді үш фазалық болып бөлінеді. Екі жағдайда да үш (6.8-суретті қараңыз) және төрт сымды (6.5-суретті қараңыз) желілер болуы мүмкін.

Оқшауланған бейтарап үш фазалық желінің электр қауіптілігі ең азы болып табылады. Бір фазаға, мысалы *C* фазасына тиіп кету үш сымды желідегі (12.5-сурет) жерге қатысты *B* және *A* фазаларының сыйымдылықтары, сондай-ақ төрт сымды желідегі (6.13-суретті қараңыз) *N* бейтараптама сымы арқылы адам денесінде *i* тогын тудырады. Ұзындығы шағын желілер үшін жерге қатысты желі сымдарының сыйымдылық кедергісі жоғары және ток адамның зақымдануына әкелмейді. Есептеу кезінде адам денесінің кедергісі 1000 Ом-ға тең деп алады. Егер адам бір фазаның электр оқшаулауышы зақымданған жағдайда электр жабдығының жерден оқшауланған корпустарына тиіп кетсе де осы жағдайда болады. Токтың зақымдаушы әсерін азайту үшін бұл жағдайда электр жабдығының корпустарын *қорғаныстық жерге тұйықтау* қолданылады. Корпусқа тиіп кеткен адам денесі және қорғаныстық жерге тұйықтау параллель қосылған, бірақ соңғысының кедергісі едәуір аз (4-40 Ом).

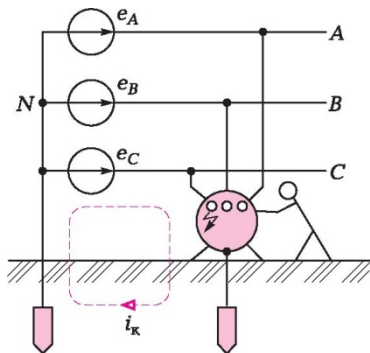
Оқшауланған бейтарап үш фазалық желінің кемшілігі фазалардың бірінің корпусқа не жерге, мысалы зақымданған бөлікті ажыратпастан сым үзіліп кеткен жағдайда, ұзақ уақыттық авариялық

тұйықталу мүмкіндігі болып табылады. Фаза жерге тұйықталған жағдайда жердегі ток адамға қауіп төндіреді, ол адамға табандарының арасында қадам ұзындығындағы кернеу әсер етеді (*қадамды кернеу*).

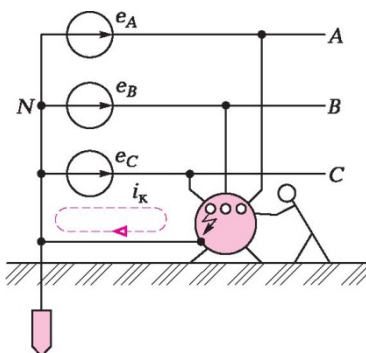
Оқшауланған бейтарап ұзын үш фазалық желілерде фазаның жерге қысқа тұйықталу тогы жоғары, сондықтан авариялық бөлікті тез ажырату қажет. Осы мақсатта тікелей тұйықталған бейтараптама көзді үш фазалық желілер және *қорғаныстық жерге тұйықтау* (12.6-сурет) немесе электр жабдығының корпустарын *қорғаныстық бейтараптандыру* (12.7-сурет) қолданылады. Екі жағдайда да біршама i_k қысқа тұйықталу тогы қорғаныс құралдарының іске қосылуына және авариялық бөліктің ажырауына әкеледі. Қорғаныстық бейтараптандыру, яғни электр жабдығының ток өткізбейтін металл бөліктерін нөлдік қорғаныстық сыммен әдейі электрлік жалғау қорғаныстық жерге тұйықтау кедергісі салыстырмалы түрде жоғары болатын жерде дұрысырақ болады (12.3-кесте).

Төрт сымды желіде бейтараптама сым үш фазалық көздің тікелей жерге тұйықталған бейтараптасуына қосылады.

Оқшаулауыштың тозу салдарынан кернеуі 1000 В-ға дейінгі желілерде қысқа тұйықталудың алдын алу қорғаныстық ажырату құрылғысы (ҚАҚ) мен автоматты ажыратқыштың негізінде *қорғаныстық ажыратуды* қамтамасыз етеді (10.5-бөлімшені қараңыз). ҚАҚ датчигі оқшаулау арқылы, мысалы электр машинасын, жылыстау тогын өлшейді, егер жылыстау тогының мәні тағайын шамада айқындалған мәннен асып кетсе, автоматты ажыратқыштың іске қосылуы үшін белгі береді.



12.6-сурет



12.7-сурет

12.3-кесте. Тікелей жерге тұйықталған не оқшауланған бейтарап 1000 В-ға дейінгі кернеулі және оқшауланған бейтарап 1000 В-дан жоғары кернеулі өндірістік электр қондырғыларының авариялық режимінде адам арқылы өтетін ең жоғары рұқсат етілген $U_{жн}$ жанау кернеулері және I токтары

Токтың тегі мен жиілігі	Нормаланатын шама	t әсер ету ұзақтығында ең жоғары рұқсат етілген мәндер, с											
		0,01 — 0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0-ден көп
Айнымалы 50 Гц	$U_{ж}$, В	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
	I , мА	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	6
Айнымалы 400 Гц	$U_{ж}$, В	650	500	500	330	250	200	170	140	130	по	100	36
	I , мА	650	500	500	330	250	200	170	140	130	по	100	8
Тұрақты	$U_{ж}$, В	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
	I , мА	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15

Токпен зақымдану ықтималдығын азайту үшін жеке қорғаныс құралдары (резеңке қолғаптар, диэлектрлік кебістер, оқшаулауыш төсеніштер және т.с.с.), қоршаулар, бұғаттар, оқшаулауыш тұтқыштары бар слесарлық-монтаждау құралдары, жылжымалы жерге тұйықтау, ескерткіш жарық дабылы (қызыл – авария, сары – назар аударыңыз, жасыл – қауіпсіз) қолданылады, ескертуші плакаттар, 1000 В-ға дейінгі және 1000 В-дан жоғары кернеулерді нұсқағыштар, қауіпсіздік белгілері ілінеді.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Электрмен жабдықтау жүйесіндегі таратқыш пункттар мен трансформаторлық қосалқы станциялардың міндеті қандай?
2. Электрмен жабдықтау жүйелерінің релелік қорғанысына қандай талаптар қойылады?
3. Қорғаныстық жерге тұйықтау не үшін қолданылады және қалай орындалады?
4. Қорғаныстық бейтараптандыру не үшін қолданылады және қалай орындалады?
5. Қорғаныстық жерге тұйықтау схемасын сызыңыз.

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. Тұрақты номиналды тогы $U_{\text{ном}} = 240$ В көз бен қабылдағыштың арасындағы арақашықтық $I = 300$ м. Көз бен қабылдағышты жалғайтын, алюминийден жасалған сымдардың көлденең қимасының ауданын анықтаңыз, бұл ретте ток $I = 20$ А және кернеудің рұқсат етілген төмендеуі $\varepsilon = 5\%$.

Жауабы: 29,5 мм².

2. Синусоидалық токтағы электр энергиясын тарату желісінің сымдарындағы шығын қуаты өзгермейтін номиналды толық тарату қуаты $S_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}$ жағдайында, егер желінің номиналды кернеуін 35 кВ-дан 220 кВ-ға дейін ұлғайтса, қанша есеге азаяды?

Жауабы: 39,5 есеге.

ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШ АСПАПТАР

13.1. ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШТЕР ТУРАЛЫ
МАҒЛҰМАТТАР

Электроника — электрмагниттік өрістері бар зарядталған бөлшектердің өзара әсері туралы және жұмысы қатты денеде, вакуум мен газдарда электр тогын өткізуге негізделген электрондық аспаптар мен құрылғыларды жасау әдістері туралы ғылым. Сәйкесінше, электрондық аспаптар жартылай өткізгіш, электрондық-вакуумдық және газразрядты деп аталады. Қазіргі уақытта электрондық-вакуумдық және газразрядты аспаптар арнайы жағдайларда ғана қолданылады және мұнда қарастырылмайды.

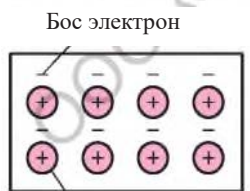
Жартылай өткізгіштер меншікті көлем кедергісі 10^8 — 10^{-6} Ом · м болатын материалдардың ауқымды класын біріктіреді. Si кремний мен Ge германий кең қолданыс тапқан. Жартылай өткізгіш материалдардағы негізгі процестерді олардың идеалды модельдерінің негізінде қарастырайық.

Д.И. Менделеевтің Элементтердің периодтық жүйесінің IV тобындағы идеалды кремний кристалының электрондық құрылымында кез келген атомның төрт валентті электрондарының әрқайсысы төрт атом қосылысының осындай валентті электрондарымен байланысқан жұп (валентті байланыс) түзеді. Егер кремний атомдарына оның электрондық құрылымын бұзуға қабілетті сыртқы энергия көздері, мысалы, жарық, жылулық, әсер етпесе онда барлық атомдар электрлік тұрғыда бейтарап болып табылады. Мұндай идеалды кремний кристалы электр тогын өткізбейді.

Алайда идеалды кремний кристалының электрлік қасиеттері оған басқа химиялық элементтер қоспасын қосқан кезде айтарлықтай өзгереді. Қоспалар ретінде әдетте Периодтық жүйенің не V топтағы (сурьма Sb, фосфор P), не III (галлий Ga, индий In) топтағы элементтері қолданылады.

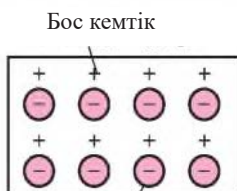
Фосфор қоспасымен кремний кристалының электрондық құрылымында фосфордың төрт валентті электроны және кремнийдің төрт іргелес атомдарының электрондары төрт байланысқан жұптар түзеді. Фосфордың бесінші валентті электроны артық болады. Сыртқы көздерден болмашы энергия шығындарында артық электрон қоспа атомымен байланысын жоғалтып, бос электронға айналады. Фосфор атомы электронын жоғалтып, жылжымайтын оң ионға айналады. Мұндай жартылай өткізгіш электрондық электр өткізгіштікті жартылай өткізгіш немесе *n-типті* жартылай өткізгіш деп, ал сәйкес қоспа *донорлық* деп аталады. 13.1-суретте *n*-типті идеалды жартылай өткізгіштің шартты кескіні келтірілген, онда жылжымайтын оң ион шеңбердің ішінде плюс белгісімен, ал жылжымалы бос электрон минус белгісімен белгіленген.

Егер қоспа ретінде үш валентті электроны бар индий қолданылса, онда кремний кристалының электрондық құрылымында индий атомының кремнийдің төрт көршілес атомдарымен бір валентті байланысы толық жинақталмайды да, кристалда кемтік пайда болады. Кристалдың тұрақты электрондық құрылымын қалыптастыру үшін қосымша электрон қажет. Индий атомы кремнийдің іргелес атомдарының арасындағы валентті байланыстан бір электрон қамтиды. Бұл ретте индий атомы тұрақты жылжымайтын теріс ионға айналады, ал кемтік қамтылған электронның орналасқан орнына ауысады. Одан әрі қайта пайда болған кемтіктің орнына іргелес валентті байланыстағы электрон ауысып келеді және т.б. Бұл процесті кристалда электрон зарядына тең оң зарядты бос кемтіктердің хаустық қозғалысы ретінде қарастыруға болады. Мұндай жартылай өткізгіш кемтікті электр өткізгіштікті жартылай өткізгіш немесе *p-типті жартылай өткізгіш* деп, ал сәйкес қоспа *акцепторлық* деп аталады. 13.2-суретте *p*-типті идеалды жартылай өткізгіштің шартты кескіні келтірілген.



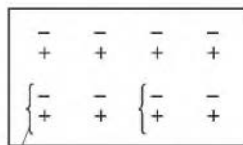
Жылжымайтын + ион

13.2-сурет



Жылжымайтын – ион

13.2-сурет



«Электрон-кемтік» жұбы

13.3-сурет

Жоғарыда қаралған екі процесте электрондар ғана қатысса да, оң зарядты жалған кемтіктерді енгізу әдістемелік тұрғыда қолайлы болмақ.

Бос электрондар мен кемтіктер қоспалары бар жартылай өткізгіштерде ғана емес, сондай-ақ сыртқы көз энергиясы валентті байланысты ұзу үшін жеткілікті болған жағдайда қоспасыз идеалды жартылай өткізгіштерде де пайда болады. Кремнийдің электрлік бейтарап атомында бір валентті байланыстың үзілуі 13.3-суретте бейнеленген «электрон – кемтік» жұбының пайда болуына ұқсайды. Бұл процесс *генерация* деп немесе энергия көзі жылу энергиясы болса *термогенерация* деп аталады. Сонымен қатар кері процесс – *рекомбинация*, яғни электрон мен кемтік кезіккен кезде валентті байланыстың қалпына келуі жүреді.

Донорлық, сол сияқты акцепторлық қоспамен идеалды жартылай өткізгіште термогенерацияның арқасында екі белгідегі еркін зарядтар болады. *n*-типті жартылай өткізгіштер үшін бос электрондар *негізгі*, ал кемтіктер *негізгі емес заряд тасушылар* деп аталады. *p*-типті жартылай өткізгіш үшін негізгі заряд тасушылардың қызметін кемтіктер, ал негізгі еместерінің қызметін электрондар атқарады. Одан әрі бұл зарядтарды негізгі және негізгі емес тасушылар деп атаймыз. Негізгі тасушылардың концентрациясы, яғни олардың 1 см^3 -дегі саны, әдетте негізгі емес тасушылардың концентрациясынан асады.

Егер электр энергиясының сыртқы көзінің көмегімен бір жартылай өткізгіш өзекте кернеулігі ε электр өрісін тудыратын болсақ, онда электрондар мен кемтіктердің хаостық (жылулық) қозғалысымен қатар олардың қарсы бағыттардағы реттелген қозғалысы (дрейф) пайда болады, яғни *өткізгіштік тогы* деп аталатын электр тогы пайда болады:

$$I = I_n + I_p, \quad (13.1)$$

мұндағы I_n және I_p — токтың электрон және кемтік құраушылары.

Жартылай өткізгіш атомдарының арасында орташа l_{op} қашықтығын еркін жүріп өту уақыт моментінде зарядтардың жылжымалы тасушылары кинетикалық энергияға ие болады:

$$W = el_{op}\varepsilon. \quad (13.2)$$

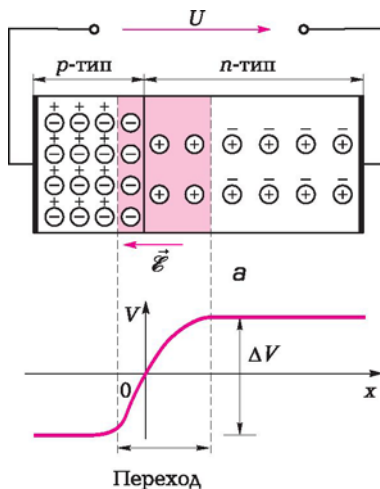
Осы энергия электр өрісінің $\varepsilon > 6\text{ МВ/м}$ кернеулігі кезінде жартылай өткізгіштің атомдарын соққымен қоздыру үшін, яғни олардағы валентті байланысты үзіп, «электрон – кемтік» жұбын тудыру үшін жеткілікті. Бұл ретте зарядтың жылжымалы тасушыларының, сәйкесінше жартылай өткізгіштің меншікті

өткізгіштігінің күрт ұлғаюы орын алады. Сипатталған құбылыс *көшкіндік тесіп өту* деп аталады. Жартылай өткізгіштің қасиеттері электр тогының кернеулігі азайған кезде қалпына келеді. Осы арқылы көшкіндік тесіп өту *жылулық тесіп өтуден* өзгешеленеді, ол көшкіндік тесіп өтуден кейін электр өрісінің кернеулігі одан әрі ұлғайған жағдайда туындайды және жартылай өткізгіштің бүлінуіне әкеледі.

13.2. ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШТЕРДЕГІ КОНТАКТІЛІК ҚҰБЫЛЫСТАР

Жартылай өткізгіш аспаптарда p - және n -типті жартылай өткізгіштердің арасында да, сол сияқты осы жартылай өткізгіштер мен диэлектриктердің, сондай-ақ металдардың арасында да бөліну шекарасында туындайтын құбылыс пайдаланылады.

p - және n -типті жартылай өткізгіштердің бөліну шекарасындағы контактілік құбылыстар. Талдау қолайлы болу үшін жартылай өткізгіштердің бөліну шекарасының идеалды жазық-параллель конструкциясын пайдаланамыз (13.4-сурет, *a*). Әуелі p -және n -типті идеалды жартылай өткізгіштердің бөліну шекарасындағы құбылысты қарастырамыз, онда термогенерацияны, яғни негізгі емес тасушыларды елемейтін боламыз.



б

Переход – өткел
13.4-сурет

Бос кемтіктер мен электрондар концентрациясының әртүрлі болуының салдарынан энергия көзінің ажыратылған тізбегінде жартылай өткізгіштердің бөліну шекарасының екі жағынан да p -типті жартылай өткізгіштен кемтіктер бөлігі n -типті жартылай өткізгішке диффузияланады (ауысады), ал n -типті жартылай өткізгіштен электрондар бөлігі p -типті жартылай өткізгішке диффузияланып, өз арасында толықтай рекомбинацияланады. Нәтижесінде жартылай өткізгіштердің бөліну шекарасының бойында p - n -өткелін тудыратын, p - және n -типті жартылай өткізгіштер жақтан сәйкесінше жылжымайтын теріс және оң иондардың қабаттары пайда болады. Екі қабаттың да зарядтарының абсолюттік мәндер бірдей. Осы қабаттардың арасында пайда болатын кернеулігі ξ электр өрісі бос кемтіктер мен электрондардың бөліну шекарасы арқылы одан әрі диффузиялануына кедергі болады. Электр өрісі кернеулігінің кейбір мәнінде p - n -өткелде бөліну шекарасы арқылы диффузия толығымен тоқтайды. Егер бөліну шекарасында ($x = 0$, 13.4-сурет, б) потенциал мәнін $V(0) = 0$ деп алсақ, онда потенциалдың p - және n -типті жартылай өткізгіштердегі таралуы мына тәуелділікпен анықталады:

$$V = \int_0^x \vec{E} dx. \quad (13.3)$$

p - n -өткелдегі ΔV потенциалдардың айырымы *потенциалдық тосқауылдың биіктігі* деп аталады. Егер p - және n -типті жартылай өткізгіштердің бос шеттеріне кернеуі $U < 0$ энергия көзін қоссақ, онда потенциалдық тосқауылдың биіктігі ұлғаяды және тізбекте ток болмайды. Егер көз кернеуі $U > 0$ болса, онда потенциалдық тосқауылдың биіктігі азаяды да, тізбекте электр тогы пайда болады. Сәйкесінше, идеалды p - n -өткелде тек бір бағыттағы *негізгі тасушылар диффузиясының электр тогы* болуы мүмкін.

Термогенерация p - n -өткелдегі процестерді өзгертеді. Сыртқы энергия көзінің әсерімен потенциалдық тосқауыл ұлғайған жағдайда ток нөлге тең болып тұрады. Термогенерацияның төмен қарқындылығының салдарынан осы токтың мәні жоғары болмайды.

Жартылай өткізгіш пен металдың бөліну шекарасындағы контактілік құбылыстар. Егер металлға арналған V_m шығу потенциалы n -типті жартылай өткізгішке арналған $V_{Si(n)}$ шығу потенциалынан төмен болса, онда электрондардың металдан жартылай өткізгішке басым өтуі орын алады, оның шекаралық қабатында байытылған қабат пайда болады. Мұндай бөліну шекарасы екі бағытта да ток өткізеді және жартылай өткізгіш аспаптардың шықпаларын конструкциялау үшін пайдаланылады.

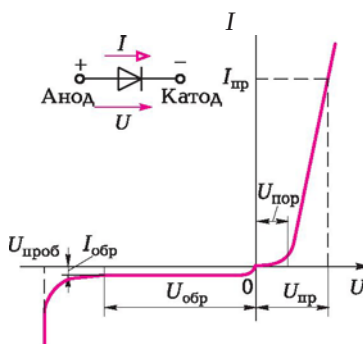
Егер $V_m > V_{si(n)}$ болса, онда жартылай өткізгішпен бөліну шекарасында металда теріс зарядты қабат, ал жартылай өткізгіште оң зарядты жұқарған қабат түзіледі. Мұндай бөліну шекарасында бір жақты өткізгіштік болады. Осындай типтегі электрлік өткелдер зерттеген ғалымның атымен *Шоттки тосқауылдары* деп аталады.

13.3. ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШ ДИОДТАР

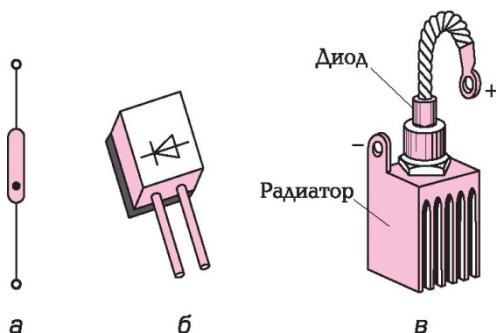
Функционалдық міндеті бойынша жартылай өткізгіш диодтар түзеткіш, импульсті, стабилитрондар, фотодиодтар, жарық шығарушы диодтар деп және т.б. бөлінеді.

Түзеткіш диодтар айнымалы токты тұрақты токқа түрлендіруге арналған және олар *p-n*-өткелдің, сондай-ақ басқа да электрлік өткелдердің электр тоғын бір бағытта жақсы өткізу және қарсы бағытта нашар өткізу қасиетін пайдаланады. Диод шықпаларының арасындағы бұл токтар және оларға сәйкес кернеулер *тура* және *кері токтар*, *тура* және *кері кернеулер* деп аталады. 13.5-суретте түзеткіш диодтың шартты белгісі және оның типтік вольт-амперлік сипаттамасы келтірілген.

Тура ток пен кернеу оң мәндерде *анодтық шықпадан катодтық шықпаға* бағытталады. Диодтардың тогы мен кернеуінің таңдалған оң бағыттары үшін тура және кері шамалардың белгілері әртүрлі болғандықтан, екі жағдайда да олардың сандық мәндерін оң сандармен анықтау қабылданған.



13.5-сурет



13.6-сурет

Төмен және жоғары жиілікті түзеткіш диодтар болады. Біріншісі өнеркәсіптік жиіліктегі (100 Гц дейін) энергетикалық электрониканың түрлендіргіш құрылғыларында қолданылады, екіншісі радиосигналдарды (100 МГц дейін) түрлендіру үшін қолданылады.

Түзеткіш диодтардың негізгі параметрлері (13.1-кесте):

- тұрақты $U_{тр}$ тура кернеуінде тұрақты $I_{тр}$ тура тогы;
- тұрақты $U_{кр}$ кері кернеуінде тұрақты $I_{кр}$ кері тогы
- максималды рұқсат етілген тұрақты $U_{кр.мах}$ кері кернеуі;
- максималды рұқсат етілген орташа $I_{тр.ор.мах}$ тура тогы;

13.1-кесте. 25°C жағдайындағы түзеткіш диодтардың кейбір типтерінің электрлік параметрлері

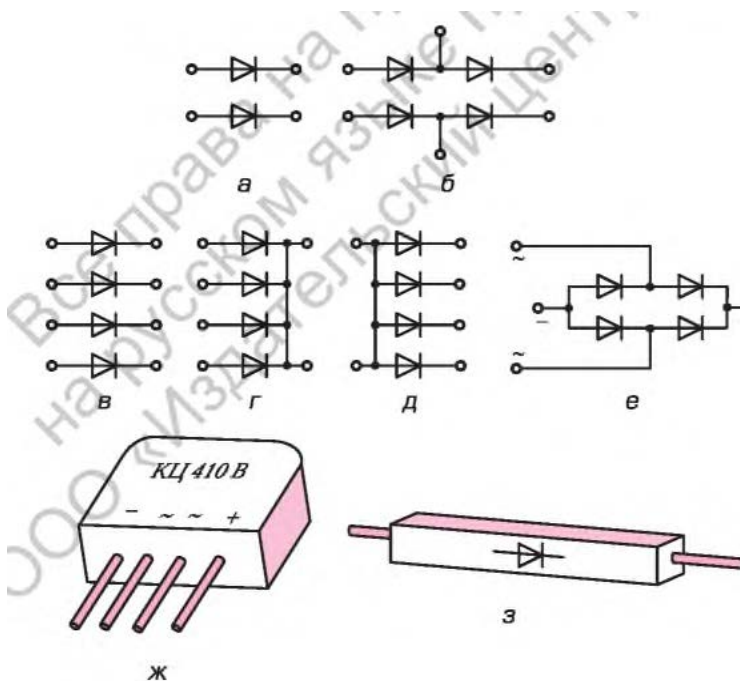
Диод типі	$U_{кр.мах}$ В	$I_{тр.ор.мах}$ А	$I_{тр}$, А	$I_{кр}$, А	Ескерту
ЕД103А	75	9,1	0,05(1 В)	0,05(75 В)	Төмен қуатты диод $I_{тр} < 0,3$ А, 13.6-сурет, а
КД210Б	800	10	10(1 В)	1,5(800 В)	Орташа қуатты диод $0,3$ А $< I_{тр} < 10$ А, 13.6-сурет, б
5SDA 9P23	2 000	850	1800(1,3 В)		Жоғары қуатты диод $I_{тр} > 10$ А, 13.6-сурет, в

Қосымша ретінде мына параметрлер қолданылады:

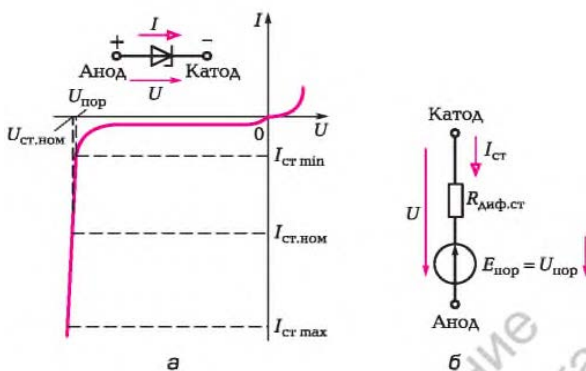
- $U_{\text{шек}}$ тұрақты шектік өткізгіштік кернеуі;
- $U_{\text{тес}}$ электрлік тесіп өтуді бұзатын тұрақты кернеу;
- θ_{max} қоршаған ортаның максималды рұқсат етілген температурасы (германий үшін 70 °С дейін, кремний үшін 150 °С дейін, титан үшін 250 °С дейін) және т.б.

Дара диодтардан басқа олардың белгілі бір схема бойынша жалғанған конструктивті аяқталған модульдер болып есептелетін құрастырмалары да шығарылады. Құрастырмалардың арасында: 50 В дейінгі кері кернеудегі 0,1 А дейінгі тура токқа арналған диодтық матрицалар (13.7-сурет, а-е), 600 В дейінгі кері кернеудегі 3 А дейінгі тура токқа арналған бір фазалық (13.7-сурет, ж) және үш фазалық (13.7-сурет, з) түзеткіш блоктар және 15 кВ дейінгі кері кернеудегі 1 А дейінгі тура токқа арналған жоғары вольтты түзеткіштердегі жұмыс үшін тізбектей жалғанған диодтардан құралған жоғары вольтты бағандар (13.7-сурет, з) болады.

Импульсті диодтар көбінесе импульсті құрылғылардағы жұмысқа арналған. Олардың 13.1-кестеде көрсетілгеннен қасиеттерден басқа



13.7-сурет



13.8-сурет

қасиеттерін диодты ауыстыру инерциялылығын есептейтін параметрлер айқындайды: C_d өткел сыйымдылығы (1—20 пФ), $\Delta t_{\text{кал}}$ кері кедергінің қалпына келетін уақыт аралығы (1—500 нс) және т.б.

Стабилитрондар, немесе тірек диодтар, тұрақты кернеуді тұрақтандыруға және кернеу шығарындыларын шектеуге арналған. Бұл диодтарда кері кернеудің кейбір $U_{\text{кр}} = U_{\text{тес}}$ мәндерінде p - n -өткелдің электрлік тесіп өтуін (көшкіндік тесіп өтуін) бұзбайтын құбылыс пайдаланылады (13.8-сурет, а). Ток пен кернеудің оң бағыттары анодтан катодқа қарай таңдалған, ВАС диодтар кескінінде солай қабылданған.

Стабилитронның $I_{\text{ст.мин}}$ бастап $I_{\text{ст.мах}}$ дейінгі көшкіндік тесіп өту тогын өлшеу кезінде ондағы керу аз өзгереді:

$$U = U_{\text{шек}} + R_{\text{диф.ст}} I_{\text{ст}}$$

мұндағы $U_{\text{шек}}$ және $R_{\text{диф.ст}}$ — стабилитронның шектік өткізгіштік кернеуі және дифференциалды кедергісі, олар стабилитронның эквивалентті алмастыру схемасы элементтерінің параметрлері болып табылады (13.8-сурет, б)

$I_{\text{ст}}$ токтың және U кернеудің оң бағыттары эквивалентті алмастыру схемасында, схемотехникада қабылданғандай, катодтан анодқа қарай таңдалған.

Стабилитрондардың маңызды параметрі кернеуді тұрақтандырудың *температуралық коэффициенті* (КТК) болып табылады, ол температура 1°C -қа өзгерген кезде және стабилитронның номиналды тогы $I_{\text{ст.ном}}$ тұрақты болған кезде тұрақ-

$$\alpha_U = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{U_{\text{ст.ном}} \Delta \theta} 100 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}, \quad (13.4)$$

тандыру кернеуінің салыстырмалы өзгерісіне тең. Төмен вольтты стабилитрондар үшін ($U_{\text{ст.ном}} = 3,3 — 5,6 \text{ В}$) КТК теріс мәндерге ие, $U_{\text{ст.ном}} \geq 6 \text{ В}$ стабилитрондар үшін оң мәндерге ие.

p - n -өткелдердің ВАС тура тарамдары теріс КТК-ке ие. Сондықтан тұрақтандыру кернеуі $U_{\text{ст.ном}} \geq 6 \text{ В}$ болатын стабилитрондар үшін тура бағытта бір корпуста p - n -өткелдерді тізбектей қосу арқылы олардың оң КТК-ін термокомпенсациялауға болады. Термокомпенсацияланған прецизионды стабилитрондар үшін КТК $0,0005 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ дейін азаяды.

Максималды рұқсат етілген шығындар қуаты $P_{\text{шығ. max}} = U_{\text{ст. max}} I_{\text{ст. max}} = 0,1—0,3 \text{ Вт}$ болатын аз қуатты стабилитрондар орташа ($0,3-0,5 \text{ Вт}$) және жоғары қуатты (8 Вт -дан жоғары) кернеулі өтемдеуші стабилизаторларда және параметрлік кернеу стабилизаторларында тірек кернеуінің көздері ретінде және кернеу шығарындыларын шектеу үшін пайдаланылады.

13.2-кестеде стабилитрондардың, сондай-ақ *стабисторлардың* кейбір типтерінің электрлік параметрлері келтірілген. Стабисторлар кернеуді тұрақтандыру үшін p - n -өткелдің ВАС тура тарамдары

13.2-кесте. Стабилитрондар мен стабисторлардың кейбір типтерінің электрлік параметрлері

Тип	$U_{\text{ст.ном}}, \text{ В}$	$I_{\text{см}}, \text{ мА}$		$R_{\text{диф.ст}}$		$\alpha_U, \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$	$P_{\text{пот max}}, \text{ Вт}$
		min	max	Ом	$I_{\text{см}}, \text{ мА}$		
2С107А	$0,7 \pm 0,07$	1	100	7	10	- 0,3	0,300
2С119А	$1,9 \pm 0,1$	1	100	15	10	- 0,4-0,5	0,300
2С133А	$3,3 \pm 0,3$	3	81	65	10	- 0,11	0,300
2С175Ж	$7,5 \pm 0,4$	3	17	40	4	0,065	0,125
2С213Б	$13 \pm 0,65$	3	10	25	5	0,075	0,125
Д217Г	100 ± 10	5	50	82	50	0,18	5
Д815Ж	$18 \pm 1,8$	25	460	3	500	0,14	8

қолданылатын аспаптар болып есептеледі. Стабисторлар 100 мА дейінгі токта 1-2 В кернеуді тұрақтандыру үшін пайдаланылады.

13.4. БИПОЛЯРЛЫҚ ТРАНЗИСТОРЛАР

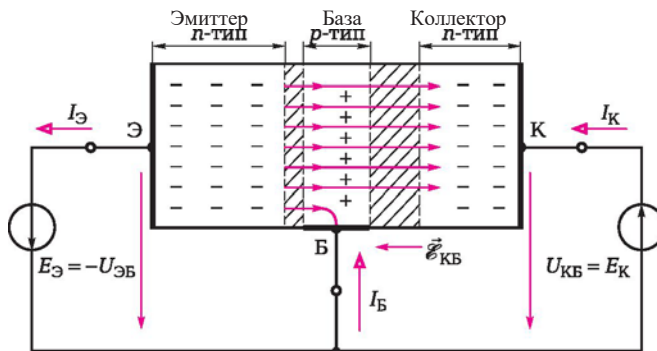
Биполярлық транзисторлардың жұмысы жақын орналасқан екі p - n -өткелдердің өзара әрекеттесу құбылыстарына негізделген.

Биполярлық транзистордың идеалды моделі үш қабатты n - p - n немесе p - n - p типті құрылымы болып есептеледі (13.9-сурет). 13.10, a және b суреттерінде осы транзисторлардың шартты белгілері берілген. Транзистордың *биполярлық* деп аталуының себебі – онда физикалық процестер екі белгідегі зарядтардың (бос кемтіктер мен электрондар) қозғалысымен байланысқан.

Биполярлық транзистордың ортаңғы қабаты Б *база* деп, бір шеткі қабаты К *коллектор*, екінші шеткі қабаты Э *эмиттер* деп аталады. Әрбір қабатың шықпасы болады, соның көмегімен транзистор тізбекке қосылады. Биполярлық транзистор шықпаларының арасындағы кернеулердің полярлығына байланысты ол әртүрлі режимдерде жұмыс жасайды.

Биполярлық транзистордың төрт жұмыс режимі болады:

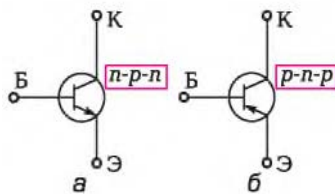
- *активті режим*, онда эмиттер өткелі – база тура бағытта, ал коллектор өткелі – база кері бағытта қосылған;
- *инверсті режим*, онда эмиттер өткелі – база кері бағытта, ал коллектор өткелі – база тура бағытта қосылған;
- *қиылу режимі* – онда екі өткел де кері бағытта қосылған;



13.9-сурет

■ *қанығу режимі*, онда екі өткел де тура бағытта қосылған.

Егер транзистор сигналдарды күшейту үшін қолданылса, онда оның активті жұмыс режимі негізгі болады, егер кілт ретінде қолданылса, онда қиылу және қанығу режимдері негізгі болады.



13.10-сурет

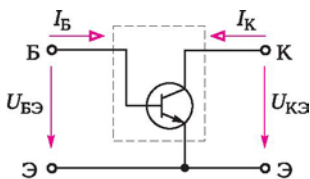
Тұрақты $E_3 = U_{\kappa 6}$ ЭҚК көзінің оң полюсін базаға қосқан кезде база мен эмиттердің арасында $p-n$ -өткелдің (13.9-суреттегі $n-p-n$ -транзистор) потенциалдық тосқауылы төмендейді. Бос электрондар эмиттерден базаға инжектрленіп, эмиттер тізбегінде I_3 тогын тудырады.

Егер коллектор мен базаның арасында тұрақты $E_{\kappa} = U_{\kappa 6}$ ЭҚК көзі базаға теріс полюспен қосылса, онда база мен коллектордың арасында $p-n$ -өткелдің потенциалдық тосқауылы ұлғаяды.

Эмиттерден базаға инжектрленген электрондардың басым бөлігі коллектор тізбегінде I_3 тогын тудырып, осы $p-n$ -өткелдің кернеулігі $\varepsilon_{\kappa 6}$ күшті электр өрісімен тартылады. Эмиттерден базаға инжектрленген электрондардың болмашы бөлігі база тізбегінде I_6 тогын тудырады.

Қаралып отырған жағдайда база кіріс және шығыс тізбектердің ортақ электроды болып табылады. Биполярлық транзисторды қосудың мұндай схемасы *ортақ базалы* (ОБ) схема деп аталады. Биполярлық транзисторды қосудың *ортақ коллекторлы* (ОК) және *ортақ эмиттерлі* (ОЭ) схемалары да болуы мүмкін. Соңғысын $n-p-n$ -транзистор мысалында толығырақ қарастырамыз, себебі транзистордың осындай қосу кезіндегі сипаттамалары оның жұмысының негізгі тыныштық, төмен сигнал және кілттік режимдерін талдау үшін пайдаланылады.

Тыныштық режимі. Тұрақты ток тізбегіне ОЭ схемасы бойынша қосылған биполярлық транзистордың жұмысын (13.11-сурет) статикалық коллекторлық $I_{\kappa}(U_{\kappa 6})I_{B=\text{const}}$ (13.12-сурет, а) және базалық $I_B(U_{BE})U_{\kappa 3=\text{const}}$ сипаттамаларымен анықтайды. Соңғысы өз тобында бір-бірінен аса қатты өзгешеленбейді, сондықтан 13.12, б суретінде бір сипаттамамен ұсынылған. Базалық сипаттамада база тогы $I_3 = 0$ болатын U_{BE} кернеуі эмиттер мен базаның арасындағы өткелдің *шектік өткізгіштік кернеуі* немесе $U_{BЭ\kappa\text{н}}$ *қиылу кернеуі* деп аталады. Бұл кернеу шамамен абсцисс осында оның базалық сипаттаманың



13.11-сурет

жоғары сызықтық бөлігінің жалғасымен қиылысу нүктесінде анықталады.

Биполярлық транзистордың негізгі статикалық параметрлері (13.3-кесте):

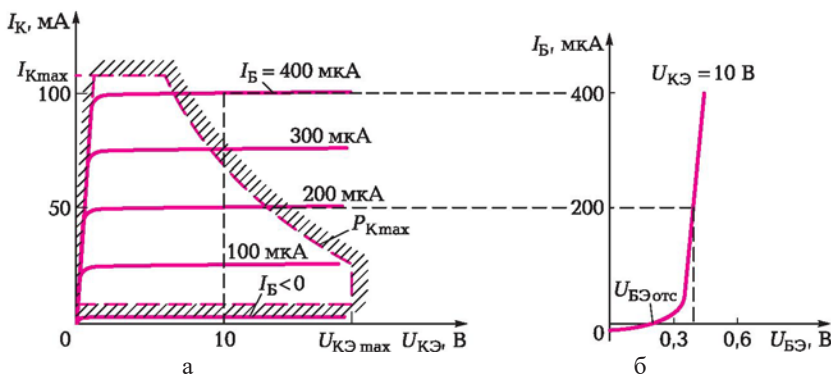
■ коллектордың $I_{К.маx}$ және базаның $I_{Б.маx}$ максималды рұқсат етілген тұрақты токтары, $U_{КЭ.маx}$ және $U_{БЭ.маx}$ кернеулері, коллектордағы $P_{К.маx}$ шығындар қуаты;

■ $U_{КЭ} = \text{const}$ кернеуінде тұрақты токтың берілу не күшею коэффициенті:

$$H_{21} = \frac{I_K - I_K|_{I_B=0}}{I_B}. \quad (13.5)$$

Олар 13.12, а суретінде штрих сызықпен белгіленген транзистордың жұмыс аймағын анықтайды.

Төмен сигнал режимі. Егер база мен эмиттердің арасында $U_{БЭ}$ және $U_{КЭ}$ тұрақты кернеулерінен басқа уақыт бойынша өзгертін төмен мәнді $u_{БЭ}$ кернеуі де қосылса, онда транзистордың жұмысын 13.13-суреттегі алмастыру схемасында $u_{БЭ}$ кернеуі жоқ кездегі тыныштық режимі мен $U_{БЭ}$ және $U_{КЭ}$ кернеулері жоқ кездегі төмен сигнал режимінің қосындысы ретінде қарастыруға болады (оның дәл-



13.12-сурет

елі мұнда келтірілмейді), оның параметрлері мына мәндерге ие:

$$\left. \begin{aligned} h_{11} &= 10^3 — 10^4 \text{ Ом;} \\ h_{22} &= 10^{-5} — 10^{-6} \text{ См;} \\ h_{21} &= 20 — 200. \end{aligned} \right\} \quad (13.6)$$

13.13-суреттегі алмастыру схемасында: $h_{11} = R_{\text{кiр}}$ және $1/h_{22} = R_{\text{шығ}}$ — кіріс және шығыс кедергілері; $h_{21}i_{\text{Б}}$ — $i_{\text{Б}}$ база тогымен басқарылатын ток көзі. Соңғы жайт биполярлық транзисторды *токпен басқарылатын аспап* деп санауға мүмкіндік береді.

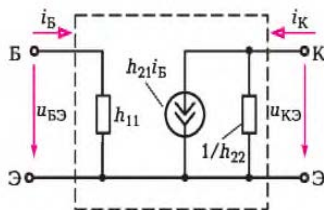
13.3-кесте. 25°C жағдайындағы түзеткіш диодтардың кейбір типтерінің электрлік параметрлері (Моторола компаниясының деректері бойынша)

Транзистор типі	$U_{\text{КЭmax}}, \text{ В}$	$I_{\text{Кmax}}, \text{ А}$	$I_{\text{Бmax}}, \text{ А}$	$P_{\text{Кmax}}, \text{ Вт}$	$U_{\text{БЭmax}}, \text{ В}$	H_{*21}	$I_{\text{Кки}}, \text{ А}$	$U_{\text{КЭкан}}, \text{ В}$
2N5877	60	10	4	150	5	200... 100	0,5	1
2N5884	80	25	7,5	200	5	200... 100	1	4
2N5655	250	0,5	0,25	20	6	30... 250	0,1	1
2N5686	80	50	15	300	5	15.60	2	1

13.3-кестенің соңы

Транзистор типі	$f_1, \text{ МГц}$	h_{*21}	$\Delta t_{\text{кiд}}^*, \text{ мкс}$	$\Delta t_{\text{өс}}^*, \text{ мкс}$	$\Delta t_{\text{тар}}^*, \text{ мкс}$	$\Delta t_{\text{күл}}^*, \text{ мкс}$
2N5877	4	20	0,04	0,3	0,6	0,3
2N5884	4	20	—	0,7	1,0	0,8
2N5655	10	20	0,04	0,12	0,33	0,22
2N5686	2	15	0,03	0,4	0,5	0,23

* Параметрді өлшеу шарттары Моторола компаниясының анықтамалығында берілген.

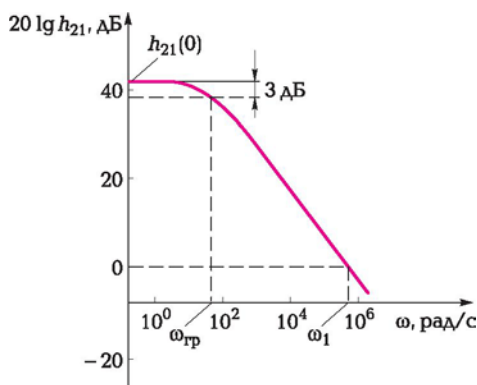


13.13-сурет

h_{21} шамасы тоқтың төмен сигнал режиміндегі беріліс не күшею коэффициенті деп аталады.

Заряд тасушылардың инерциялылығы мен p - n -өткелдердің электрлік сыйымдылықтарын ескеретін болсақ, биполярлық транзистордың синусоидалық сигнал режиміндегі параметрлері жиілікке тәуелді болатынын атап өтпекпіз. Сондықтан (13.6) параметрлердің мәндері төмен жиілікті төмен синусоидалық сигнал үшін дұрыс болмақ.

Биполярлық транзистордың жиілік қасиеттерін 13.4-суретте келтірілген токтың беріліс коэффициентінің логарифмалық амплитудалық-жиіліктік сипаттамасы анықтайды. Ол $\omega = 0$ бұрыштық жиіліктегі токтың беріліс коэффициенті $\sqrt{2}$ есеге, ал $20 \lg h_{21}$ шамасы — $20 \lg \sqrt{2} = 3$ дБ азаятын $\omega_{ш}$ шекаралық бұрыштық жиілікті және ω_1 токтың бірлік берілісінің бұрыштық жиілігін немесе токтың беріліс коэффициенті $h_{21} = 1$ болатын $f_1 = \omega_1/2\pi$ жиілігін белгілейді.



13.14-сурет

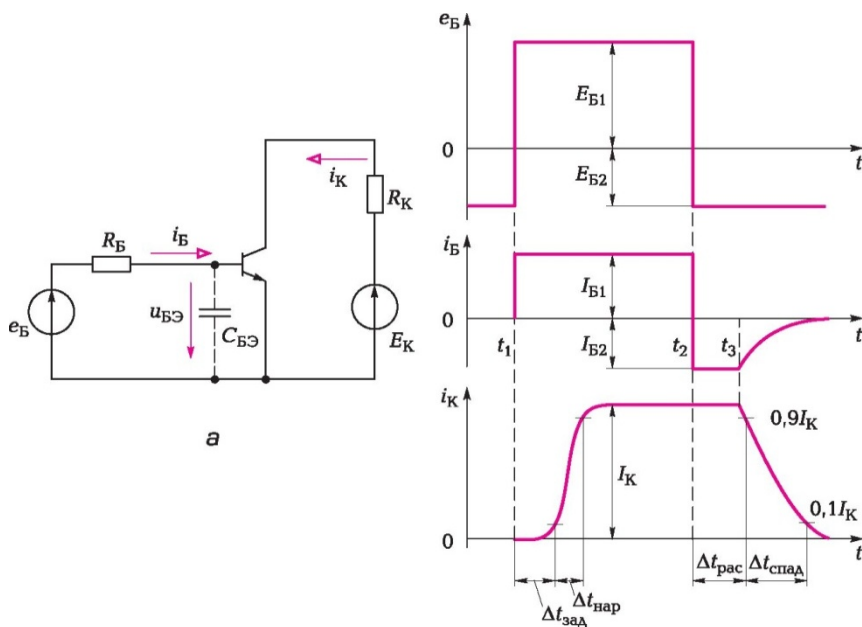
h_{21} токтың беріліс коэффициенті мен f_1 бірлік беріліс жиілігі биполярлық транзистордың негізгі параметрлері болып табылады (13.3-кестені қараңыз).

Кілттік режим. 13.15, *а* және *б* суреттерінде *n-p-n* биполярлық транзисторды сынау мысалындағы өлшеу тізбегінің схемасы және оны қосу мен ажыратудың біріккен уақытша диаграммалары келтірілген.

Биполярлық транзистордың импульсті сипаттамалары негізінен 13.15, *а* суретінде штрих сызықпен көрсетілген $C_{ЭБ}$ эмиттер – база өткелінің сыйымдылығымен, сондай-ақ негізгі емес заряд тасушылардың, яғни базадағы *n-p-n* биполярлық транзисторға арналған электрондардың жиналу және таралу процестерімен анықталады.

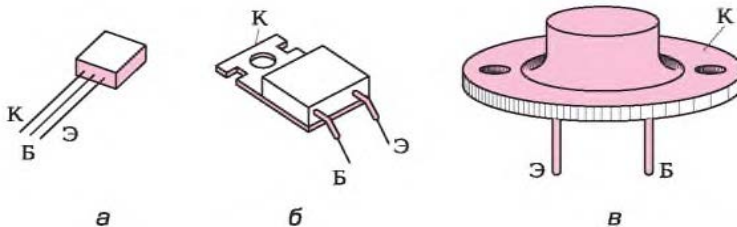
$e_B = -E_{B2}$ ЭҚК әсерімен бастапқы күйінде транзистор ажыратулы (қиылу режимі) болады. Бұл ретте эмиттер – база өткелінің сыйымдылығындағы кернеу: $u_{БЭ} = -E_{B2}$.

Биполярлық транзисторды қосу екі кезеңнен тұрады. Бірінші кезеңде негізінен эмиттер – база өткелінің сыйымдылығы қайта зарядталады, ондағы кернеу $-E_{B2}$ теріс мәнінен оң мәнге ауысады. Бұл ретте транзистор кернеу $u_{БЭ} < U_{БЭки}$ болғанға дейін ажыратулы бола береді. Екінші кезеңде $u_{БЭ} > U_{БЭки}$ кернеуінде коллектордың тогы



13.15-сурет

б



13.16-сурет

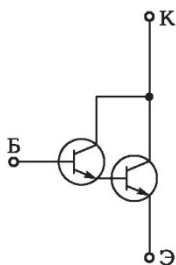
$I_K = E_K/R_K$ мәніне дейін ұлғаяды, ал база қабатында негізгі емес заряд тасушылар жиналады. $e_B = E_{B1} > |u_{BЭ}|$ ЭКК тікбұрышты импульсінің $t_2 - t_1$ әсер ету уақытының аралығында база тогының импульсі де $I_{B1} = E_{B1}/R_B$ амплитудасымен тікбұрышты болады.

Биполярлық транзисторды *ажырату* да екі кезеңнен тұрады. Бірінші кезеңде базада $i_B = -E_{B1}/R_B$ база тогымен жиналған негізгі емес заряд тасушылар t_2 моментінен t_3 моментіне дейін таралады, бұл кезде $u_{BЭ}$ кернеуі $U_{BЭки}$ мәніне дейін азаяды. Бұл ретте транзистор қосулы күйінде қалады. Екінші кезеңде негізінен эмиттер – база өткелінің сыйымдылықтары $U_{BЭки}$ кернеуінен $u_{BЭ} = -E_{B2}$ кернеуіне дейін қайта зарядталады.

Биполярлық транзистордың негізі *импульсті* параметрлері (13.3-кестені қараңыз):

- $\Delta t_{кид}$ кідіру, $\Delta t_{өс}$ коллектор тогының өсу, $\Delta t_{тар}$ базадан негізгі емес заряд тасушылардың таралу және $\Delta t_{күл}$ коллектор тогының азаю уақытының аралықтары;
- қиылу режиміндегі коллектордың $I_{Кки}$ тұрақты тогы;
- қанығу режиміндегі $U_{КЭқан}$ тұрақты кернеуі.

Статикалық параметрлерінің мәні бойынша биполярлық транзисторлар төмен ($P_{Кmax} = 0,3$ Вт, $I_{Кmax} = 0,3$ А дейін, 13.16-сурет, а), орташа (сыртқы жылу әкету болған жағдайда 0,3—1,5 Вт, 0,3—1,5 А, 13.16-сурет, б) және жоғары (сыртқы жылу әкету болған жағдайда 1,5 Вт, 1,5 А жоғары 13.16-сурет, в) қуатты болып бөлінеді.



13.17-сурет

Токтың бірлік беріліс жиілігінің мәні бойынша төмен (f_1 3 МГц дейін), орташа (3 — 30 МГц) және жоғары (30 МГц жоғары) жиілікті болады.

Биполярлық транзисторлардың негізгі артықшылығы – коллектор тогының мәндері (25 А дейін) айтарлықтай жоғары болған кезде коллектор мен эмиттердің арасындағы кернеудің рұқсат етілген жоғары мәні (бірнеше киловольтқа дейін).

Негізгі кемшілігі – салыстырмалы түрде төмен кіріс кедергісі (1-10 кОм), әдетте неғұрлым аз болса, транзистордың қуаты соғұрлым жоғары болады, бұл олардың төмен қуатты көзден басқарылуын қиындатады. Осы кемшілікті жою үшін бір корпустағы төмен қуатты транзистормен басқарылатын жоғары қуатты транзистордан *құрама транзисторларды* (13.17-сурет) қолданады.

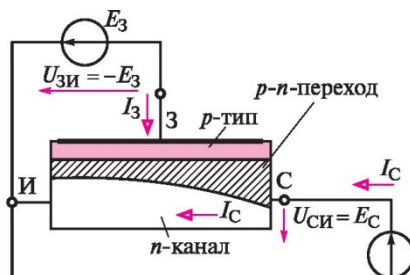
13.5. ДАЛАЛЫҚ ТРАНЗИСТОРЛАР

Басқарылмалы *p-n*-өткелді және металл – диэлектрик – жартылай өткізгіш конструкциясының негізіндегі далалық транзисторлар немесе МДЖ-транзисторлар болады.

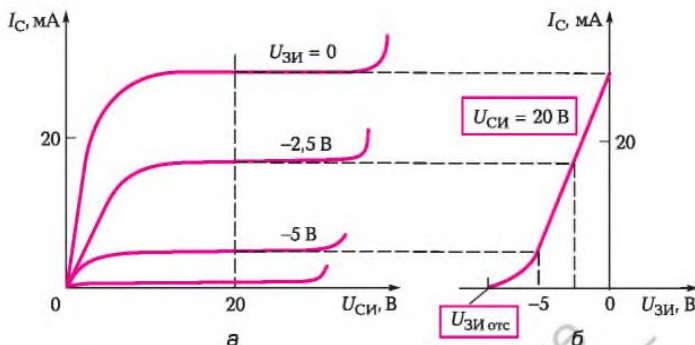
Басқарылмалы *p-n*-өткелді далалық транзисторлар.

Басқарылмалы *p-n*-өткелді және *n*-арналы далалық транзистордың жұмыс принципін оның идеалды моделінің негізінде қарастырайық (13.18-сурет).

И *бастау* және С *ағынды* деп аталатын екі электродтың арасында *n*-типті жартылай өткізгіштен *n*-арна орналасқан. Егер бастау мен ағындының арасында ағындыға оң полюспен E_C ЭҚК қосылса, онда *n*-арнада өткізгіштік тогы (13.1) бар дегенді білдіреді, ол токтың мәні арнаның кедергісіне тәуелді болады. Өз кезегінде, *n*-арнаның кедергісі оның еніне тәуелді, аталмыш енді далалық транзисторларда өзгертуге болады. Ол үшін 3 *бекітпе* деп аталатын үшінші электрод пен бастаудың арасына E_C ЭҚК бекітпеге теріс полюспен қосылады, сондықтан *n*-арна мен бекітпедегі *p*-типті жартылай өткізгіштің арасындағы *p-n*-өткел кері бағытта қосылады. Жылжымалы тасушылармен жүқарған *p-n*-өткелдің ені (13.18-суретте штрих сызықпен берілген аймақ) *n*-арнаның еніне әсер етіп, сол арқылы оның өткізгіштігіне де әсер етеді.



p-n-переход – *p-n*-өткел; *n*-канал – *n*-арна
13.18-сурет



13.19-сурет

n -арналы және басқарылмалы p - n -өткелді далалық транзистордың жұмысын статикалық ағындық $I_C(U_{СИ})_{U_{ЗИ}=\text{const}}$ (13.19-сурет, а) және ағындық-бекітпелі $I_C(U_{ЗИ})_{U_{СИ}=\text{const}}$ (13.19-сурет, б) сипаттамалар анықтайды. Соңғысы өз тобында бір-бірінен аса қатты өзгешеленбейді, сондықтан бір сипаттамамен ұсынылған. $U_{СИ}$ кернеуінің шамадан тыс ұлғаюы бекітпе мен ағындының арасында көшкіндік тесіп өту тудырады. $U_{ЗИ}$ кернеуінде, $U_{СИки}$ төмен кернеуінде арна жабық болады ($I_C = -I_3$). $U_{СИ}$ және $U_{ЗИ}$ кернеулерінің полярлылығының өзгеруі бекітпенің жұмысын бұзады.

n -арнаның орнына p -типті жартылай өткізгіштен тұратын p -арна, ал бекітпе n -типті жартылай өткізгіштен болуы мүмкін.

Арнадағы заряд тасушылардың қозғалысына перпендикуляр бағытталған кернеулі электр өрісімен арна өткізгіштігін басқару транзистордың атауын – *далалық* дегенді білдіреді.

Далалық МДЖ-транзисторлардың p - n -өткелді далалық транзисторлардан айырмашылығы – оларда 3 бекітпесінің электроды арнадан диэлектрик қабатымен оқшауланған. Диэлектрик ретінде әдетте SiO_2 пайдаланылады. Сондықтан МДЖ терминімен қатар МОЖ термині де қолданылады, ол металл – оксид – жартылай өткізгіш құрылымын білдіреді (MOSFET — metal oxid semiconductor field effect transistor).

МДЖ-транзистор p немесе n -типті кремний тілімі болып есептеледі, ол *П төсеніш* деп аталады, онда өткізгіштіктің қарама-қарсы типі бар екі аймақ құрылады. Ол аймақтардың бірі *И бастау*, екіншісі *С ағынды* ретінде пайдаланылады.

МДЖ-транзисторлар кіріктірме және индуцирленген арналы бо-

лып бөлінеді.

Кіріктіріме *n*-арналы МДЖ-транзистор (13.20-сурет) *p*-типті жартылай өткізгіштен жасалған төсеніштен тұрады, онда ағынды мен бастауға арналған *n*-типті жартылай өткізгіштің екі аймағы құрылады. Диэлектрик пен төсеніштің бөліну шекарасында контактілік құбылыстардың салдарынан оның шекаралық қабатында инверсті қабат, яғни *n*-арна пайда болады. Бұл арна өз арасында $U_{зи} = 0$ кернеу жоқ кезде ағынды мен бастау аймақтарын жалғайды. $U_{зи} > 0$ болған кезде арна электрондармен байытылады, ал $U_{зи} < 0$ кезінде жұқарады.

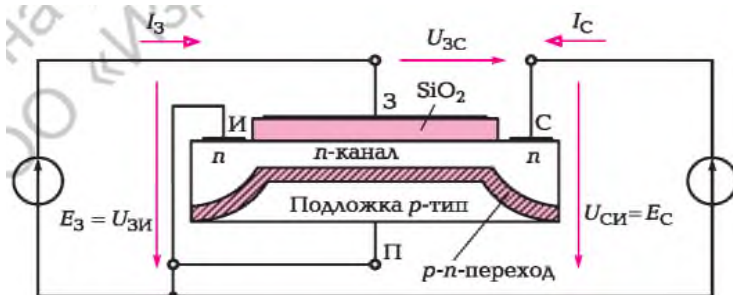
Кіріктіріме *n*-арналы МДЖ-транзистордың статикалық ағындық және ағындық-бекітпелі сипаттамалары 13.21, *a* және *б* суреттерінде келтірілген, ондағы $U_{зики}$ — қиылу кернеуі.

Кіріктіріме арналы МДЖ-транзистордың ерекшелігі – олардың арнаны жұқарту және байыту режимінде жұмыс істеу мүмкіндігі болып табылады.

Индукцияланған *n*-арналы МДЖ-транзистор 13.20-суреттегі құрылымда төсеніштің жартылай өткізгіш қабатын SiO_2 диэлектригінің астында акцепторлармен лигирлеген жағдайда алынады. Онда $U_{зи} = 0$ кернеуінде ағынды мен бастау арасында өткізгіш арна болмайды да, $U_{зи} > U_{зишек}$ кернеуінде пайда болады.

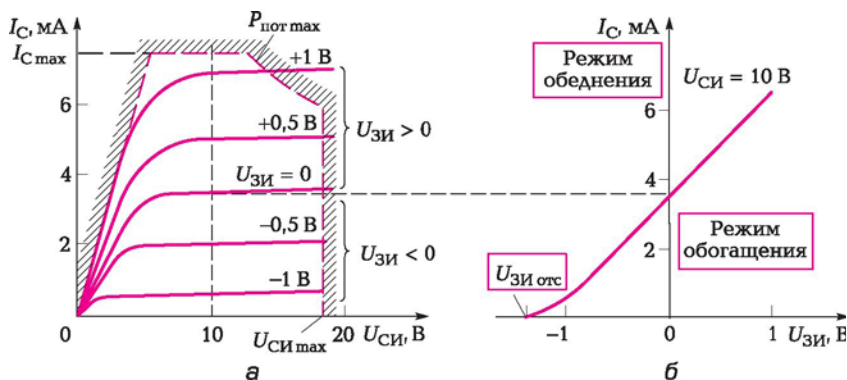
13.22, *a* және *б* суретінде индукцияланған *n*-арналы МДЖ-транзистордың ағындық және ағындық-бекітпелі статикалық сипаттамалары келтірілген.

МДЖ-транзисторларда төсеніш электроды не бастау электродымен бірігеді, не екінші бекітпе ретінде қызмет етеді.



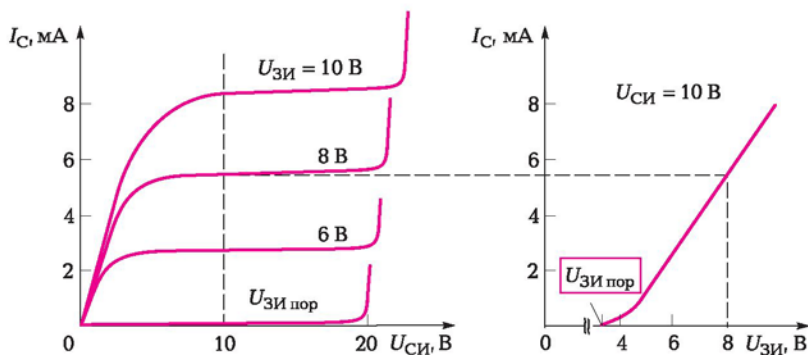
p-*n*-переход – *p*-*n*-өткел; *n*-канал – *n*-арна; подложка – төсеніш

13.20-сурет

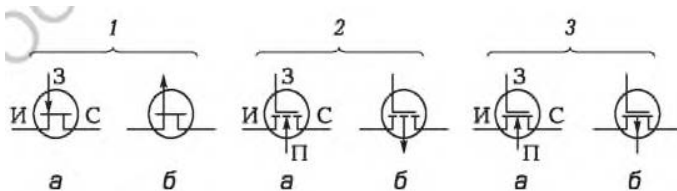


13.21-сурет

Басқарылмалы p - n -өткелді далалық транзисторлардың, индуцирленген n -арналы МДЖ-транзисторлардың және кіріктірілме арналы МДЖ-транзисторлардың шартты белгілері сәйкесінше 13.23-суреттің 1-3-позицияларында, а n -арна үшін және 13.23, б суреті p -арна үшін келтірілген.



13.22-сурет



13.23-сурет

Қаралып отырған жағдайларда бастау кіріс және шығыс тізбектердің ортақ электроды болып табылады. Далалық транзисторды қосудың мұндай схемасы *ортақ бастаулы* (ОИ) схема деп аталады. Транзистордың сипаттамалары бұл ретте оның жұмысының негізгі тыныштық, төмен сигнал және кілттік режимдерін талдау үшін пайдаланылады.

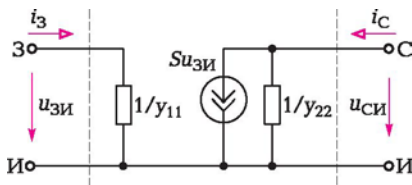
Тыныштық режимі. Тұрақты ток тізбегіндегі далалық транзистордың жұмысын статикалық ағындық және ағындық-бекітпелі сипаттамалар анықтайды (13.19, 13.21 және 13.22-суреттерді қараңыз).

Далалық транзисторлардың негізгі *статикалық* параметрлері (13.4-кесте): ағындының $I_{C,max}$ максималды рұқсат етілген тұрақты токтары, $U_{СИ,max}$ және $U_{ЗИ,max}$ кернеулері және $P_{К,max} = I_C U_{СИ}$ шығын қуаты. Олар 13.21, а суретінде штрих сызықпен белгіленген транзистордың жұмыс аймағын анықтайды.

Төмен сигнал режимі. Егер бекітпе мен бастаудың арасында $U_{СИ}$ және $U_{ЗИ}$ тұрақты кернеулерінен басқа уақыт бойынша өзгертін төмен мәнді $u_{ЗИ}$ кернеуі де әрекет етсе, онда далалық транзистордың жұмысын 13.24-суреттегі алмастыру схемасында $U_{ЗИ}$ кернеуі жоқ кездегі тыныштық режимі мен $U_{СИ}$ және $U_{ЗИ}$ кернеулері жоқ кездегі төмен сигнал режимінің қосындысы ретінде қарастыруға болады (оның дәлелі мұнда келтірілмейді), оның параметрлері мына мәндерге ие:

$$\left. \begin{aligned} y_{11} &= 10^{-7} \text{—} 10^{-9} \text{ См}; \\ y_{21} &= 1 \text{—} 10^{-1} \text{ мА/В}; \\ y_{22} &= 10^{-5} \text{—} 10^{-6} \text{ См}. \end{aligned} \right\} \quad (13.7)$$

13.24-суреттегі алмастыру схемасында: $1/y_{11} = R_{к\text{іріс}}$ және $1/y_{22} = R_{шығ}$ — кіріс және шығыс кедергілері; $Su_{ЗИ} = y_{21}u_{ЗИ} - u_{ЗИ}$ кернеуімен басқарылатын ток көзі. Соңғы жайт далалық транзисторды база тогымен басқарылатын биполярлық транзистормен (13.13-суретті қараңыз) салыстырғанда *кернеумен басқарылатын аспап* деп санауға мүмкіндік береді.



13.24-сурет

13.4-кесте. 25°C жағдайындағы түзеткіш диодтардың кейбір типтерінің электрлік параметрлері (Моторола компаниясының деректері бойынша)

Транзистор типі	$U_{СИ\max}$, В	$U_{ЗИ\max}$, В	$P_{шек.\max}$, Вт	$I_{C\max}$, А	S , мСм	$C_{к\text{ір}}$, пФ	$C_{шығ}$, пФ	$C_{пр}$, пФ	$I_{Скн}$, мКА
MTB2N40E	400	20	40	2	1,0	229	34	7,3	10
MTD1N50E	500	20	40	1	0,9	215	30,2	6,7	10
MTB50N06V	60	20	125	42	23	1 644	465	112	10
MTB75N05HD	50	20	125	75	15	2 600	1000	230	10

13.4-кестенің соңы

Транзистор типі	$R_{СИ\cos}^*$ Ом	$U_{СИ\cos}^*$ В	$\Delta t_{кан.кід}^*$ НС	$\Delta t_{кан}^*$ НС	$\Delta t_{аз.кід}^*$ НС	$\Delta t_{аз}^*$ НС	q_{*1}^* нКл	q_{*2}^* нКл	q_{*y}^* нКл
MTB2N40E	3,1	7,3	8	8,4	12	11	2,6	3,2	8,6
MTD1N50E	4,3	4,5	8	9	14	17	1,6	3,8	7,4
MTB50N06V	0,025	1,4	12	130	70	62	9	21	47
MTB75N05HD	0,007	0,64	15	170	70	100	13	33	71

* Параметрді өлшеу шарттары Моторола компаниясының анықтамалығында берілген.

$S = y_{21}$ шамасы *тікшіл ағындық-бекітпелі сипаттама* деп аталады және ол төмен сигнал режиміндегі далалық транзистордың негізгі параметрі болып табылады (13.4-кестені қараңыз).

Ағынды, бастау және бекітпе электродтарының арасындағы электрлік сыйымдылықтарды ескеретін болсақ, далалық транзистордың синусоидалық сигнал режиміндегі y -параметрлері жиілікке тәуелді болады. Сондықтан далалық транзисторды алмастыру схемасы (13.24-суретті қараңыз) элементтерінің (13.7) y -параметрлерінің мәндері тұрақты кезде төмен және орташа жиілікті төмен синусоидалық сигнал үшін дұрыс болмақ.

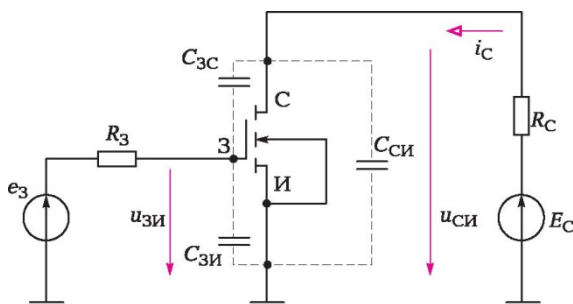
Кілттік режим. 13.25, *a* және *b* суреттерінде ОИ схемасы бойынша қосылған индуцирленген n -арналы МДЖ-транзисторды сынау мысалындағы өлшеу тізбегінің схемасы және оны қосу мен ажыратудың біріккен уақытша диаграммалары келтірілген.

Далалық транзистордың импульсті сипаттамалары негізінен 13.25, *a* суретінде штрих сызықпен көрсетілген $C_{зи}$, $C_{си}$, $C_{зс}$ электродтарының арасындағы сыйымдылықтармен анықталады.

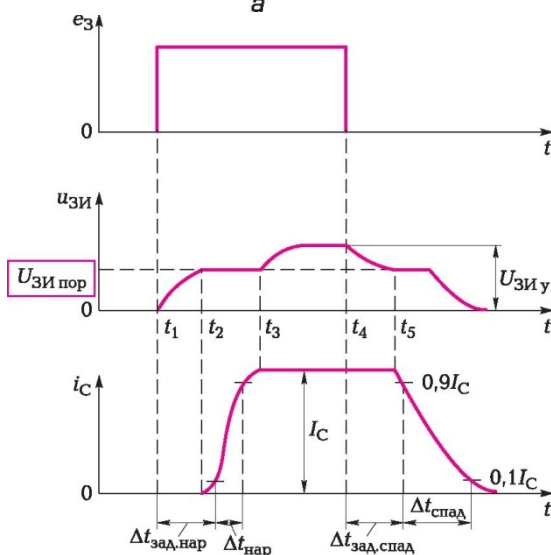
$e_3 = 0$, яғни $u_{зи} = 0$ ЭҚК мәніндегі бастапқы күйінде транзистор ажыратулы (13.22-суретті қараңыз) болады.

Далалық транзисторды қосу екі кезеңнен тұрады. Бірінші кезеңде негізінен $C_{зи}$ сыйымдылығы t_1 уақыт моментінде оның әрекеті басталғаннан бастап, $u_{зи}$ кернеуі $U_{зишөк}$ мәніне жететін t_2 уақыт моментіне дейінгі уақыт аралығында e_3 ЭҚК көзінен зарядталады. Бұл ретте n -арна жабық болып қала береді, ал транзистор ажыратулы болады. Екінші кезеңде t_2 уақыт моментінен бастап n -арна ашылады. i_c тогы ұлғаяды, $u_{си}$ кернеуі азаяды және e_3 ЭҚК көзінен $C_{зи}$ сыйымдылығы зарядталады. Бұл ретте $u_{зи} = U_{зишөк}$ кернеуі және $C_{зи}$ заряд сыйымдылығы ағын тогы $I_c \approx E_c/R_c$ максималды мәнге жететін (Миллер әсері) t_3 уақыт моментінде транзистор толық қосылғанға дейін мүлдем өзгеріссіз болады. Одан әрі біраз уақыт ішінде $C_{зи}$ және $C_{зс}$ сыйымдылықтары e_3 ЭҚК көзінен $u_{зи6}$ кернеудің белгіленген мәніне дейін зарядталады.

Далалық транзисторды ажырату екі кезеңнен тұрады. Бірінші кезеңде негізінен $C_{зи}$ және $C_{зс}$ сыйымдылықтары e_3 ЭҚК-ң әсер етеуі аяқталған t_4 уақыт моментінен бастап, $u_{зи}$ кернеуі $U_{зишөк}$ мәніне дейін азаятын t_5 уақыт моментіне дейін e_3 ЭҚК зарядтан ажырайды. Бұл ретте n -арна ашық болып қала береді, ал транзистор қосулы болады. Екінші кезеңде n -арна жабыла бастайды. i_c тогы азаяды, $u_{си}$ кернеуі ұлғаяды және E_c ЭҚК көзінен негізінен $C_{зс}$ сыйымдылығы зарядталады. Бұл ретте біраз уақыт ішінде n -арна толық жабылғанға дейін кернеу $u_{зи} = U_{зишөк}$ болады, одан соң нөлге дейін азаяды.



а

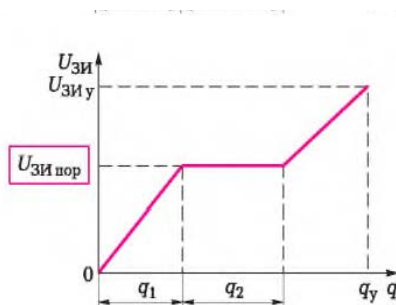


б

13.25-сурет

МДЖ-транзистордың негізі *импульсті* параметрлері (13.4-кестені қараңыз):

- $\Delta t_{\text{өс.кід}}$ ағын тогы өсімінің кідіру (13.25, б суретін қараңыз), $\Delta t_{\text{өс}}$ ағын тогының өсу, $\Delta t_{\text{аз.кід}}$ ағын тогы азаюының кідіру және $\Delta t_{\text{аз}}$ ағын тогының азаю уақытының аралықтары;
- кіріс $C_{\text{кір}} = C_{3C} + C_{3И}$, шығыс $C_{\text{шығ}} = C_{СИ} + C_{3C}$ және өтпелі $C_{\text{өтп}} = C_{3C}$ сыйымдылықтар;
- e_C ЭҚК көзінен негізінен $C_{\text{кір}}$ кіріс сыйымдылығымен $\Delta t_{\text{өс.кід}}$ және $\Delta t_{\text{өс}}$ уақыт аралығында алынатын q_1 және q_2 зарядтары (13.26-сурет) және белгіленген q_6 ;



13.26-сурет

- қосылған МДЖ-транзистор үшін ағын мен бастаудың арасындағы $R_{СИКОС}$ кедергісі мен $U_{СИКОС}$ кернеуі;
- ажыратылған МДЖ-транзистор үшін $I_{СКИ}$ ағын тогы (қиылу тогы);

Далалық транзисторлардың негізгі артықшылығы – кіріс тізбегінің жоғары кедергісі ($1 — 10^4$ МОм), бұл оларды төмен қуатты көзден басқаруды жеңілдетеді.

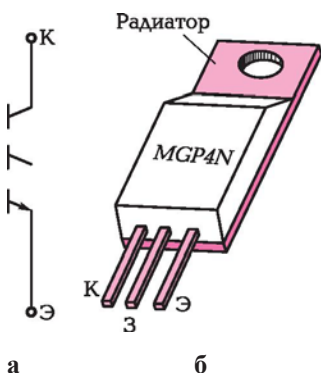
Негізгі кемшілігі – ағын мен бастаудың арасындағы кернеудің салыстырмалы түрде рұқсат етілген төмен мәндері (бірнеше жүз вольтқа дейін).

13.6.

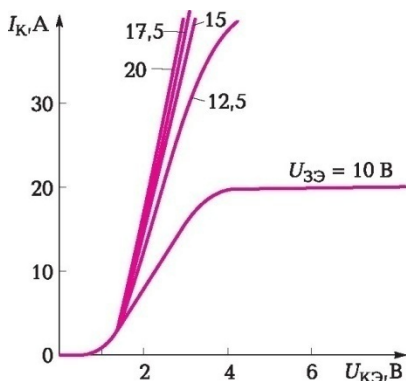
ТОЛЫҚ БАСҚАРЫЛАТЫН ЖОҒАРЫ ҚУАТТЫ ТРАНЗИСТОРЛЫҚ КІЛТТЕР

Төмен қуатты көздермен басқарылатын, *толық басқарылатын* (қосу және ажырату) жоғары қуатты *транзисторлық кілттер* энергетикалық электроникада кеңінен пайдаланылады.

Оларды қолдану электр энергиясын түрлендіру құрылғыларының жұмыс сипаттамаларын айтарлықтай жақсартып, олардың ПӘК-ін ұлғайтуға мүмкіндік береді. Транзисторлық кілттердің негізгі параметрлеріне тұйықталған және ажыратылған күйдегі ток пен кернеу мәндері, ауыстыру жиілігі, сондай-ақ тұйықталған және ажыратылған кілттің уақыт аралықтарына сәйкес келетін статикалық және оны қосу мен ажырату шептеріне сәйкес келетін динамикалық шығын қуаттары жатады.



13.27-сурет



13.28-сурет

Толық басқарылатын транзисторлық кілттер оқшауланған бекітпелі биполярлық және далалық транзисторлардың негізінде болады.

Оқшауланған бекітпелі биполярлық транзистор (ОҚБТ — IGBT, Insulated Gait Bipolar Transistor) басқару тізбегіндегі МДЖ-транзистормен құрама транзистор (13.17-суретті қараңыз) болып есептеледі. Бұл ретте жоғары қуатты биполярлық транзистордың (коммутацияланатын кернеулердің рұқсат етілген жоғары мәндері) және МДЖ-транзистордың оң сапалары (жоғары ауысу жылдамдығы, төмен басқару қуаты) ұштасады. 13.27, а және б суреттерінде ОҚБТ-ң шартты белгісі мен типтік конструкциясы келтірілген. ОҚБТ жұмысын статикалық коллекторлық сипаттамалар (13.28-сурет) айқындайды.

Ауданы 6 см² дейінгі бір кристалда транзисторлық құрылымдардың көп мөлшерін (1 см²-де бірнеше миллионға дейін) параллель жалғау және кристалдарды тізбектей және параллель жалғау ОҚБТ модульдерінде пайдаланылады. ОҚБТ модульдері 2400 А дейінгі токтарға, 6500 В дейінгі коммутацияланатын кернеулерге, және 150 кГц дейінгі ауыстыру жиілігіне арналып шығарылады.

ОҚБТ кемшіліктеріне олардың коллектор мен эмиттердің арасындағы артық кернеулерге және ток бойынша артық жүктемелерге сезімталдығы жатады.

Оқшауланған бекітпелі далалық транзисторларда, яғни МДЖ-транзисторлар мен олардың негізіндегі модульдерде ОҚБТ-мен салыстырғанда ток (200 А дейін) пен коммутацияланатын кернеу мәндері (400 В дейін) төмен болады, бірақ ауыстыру жиіліктері (1

МГц дейін) жоғары және кедергілері қосулы күйде төмен (10^{-3} Ом дейін) болады.

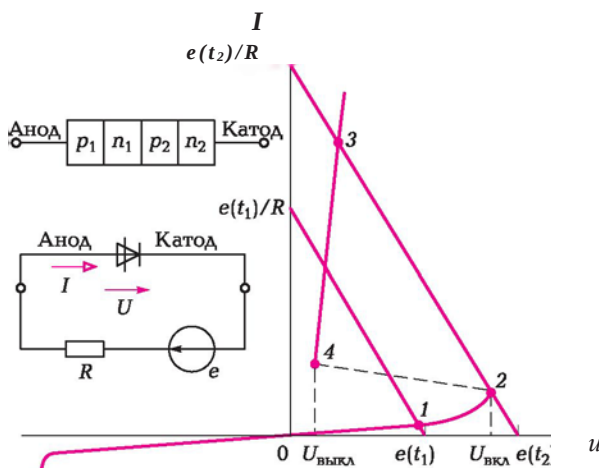
Төмен басқару қуаты энергетикалық электроника үшін бір кристалда күш элементтері орналастырылатын, толық басқарылатын транзисторлық кілттер, оларды қосу, ажырату және қорғау схемаларын, сондай-ақ жүктемені тексеру, басқару және реттеу схемаларын жасауға мүмкіндік береді. Мұндай транзисторлық кілттер *зерделі кілттер* (IPM— intelligent power module) деп аталады.

13.7. ТИРИСТОРЛАР

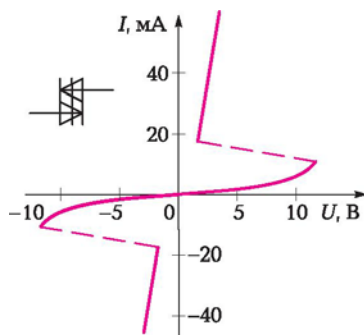
Тиристор — екі тұрақты күйі және жабық күйден ашық күйге, сондай-ақ керісінше ауыса алатын үш не одан көп тізбектей қосылған p - n -өткелдері жартылай өткізгіш аспап. Тиристордың p -және n -типті жартылай өткізгіштердің кезек-кезек төрт қабаты бар құрылымы ең кең таралған (13.29-сурет).

Тиристорлар басқарылатын не триодтық және басқарылмайтын не диодтық болып бөлінеді.

Диодтық тиристордың екі шықпасы болады — анодтық және катодтық. Оны айнымалы ток тізбегінде бір тұрақты күйден екіншісіне ауыстыру жүктемелік сипаттама әдісімен анықталады (2.32-суретті қараңыз). Осы жерде және одан әрі тиристорлардың



13.29-сурет



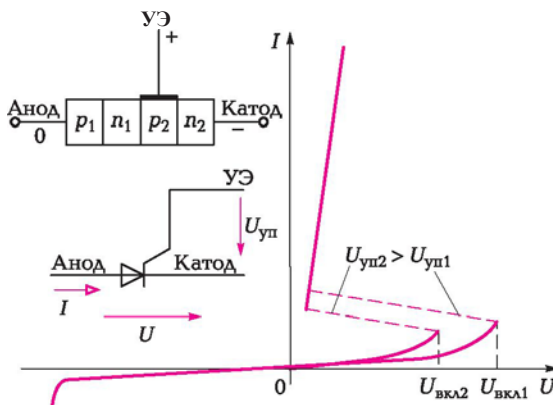
13.30-сурет

ВАС-ы бейинерциалды, яғни $I(U) = i(u)$ деп аламыз. $e = E_m \sin \omega t$ ЭҚК нөлдік мәнен біркелкі ұлғайған кезде диодтық тиристор әуелі жабық болады және тізбектегі ток аз болады (ВАС-тағы 1-нүкте, 13.29-суретті қараңыз). Диодтық тиристордың ВАС-ындағы 2-нүктеде кернеу $U = U_{\text{кос}}$ қосу кернеуіне жетеді. e ЭҚК-н одан әрі тіпті біраз ғана ұлғаюы тізбектің жұмыс режимінің күрт өзгеруіне (ВАС-тағы 3-нүкте), яғни диодтық тиристордың қосылуына

әкеледі. e ЭҚК азайған кезде тізбектегі процестер кері тәртіпте жүреді. ВАС 4-нүктесінде кернеу ажырату кернеуіне жетеді. e ЭҚК-н одан әрі азаюы диодтық тиристордың ажырауына әкеледі.

Симметриялық диодтық тиристорлар да қолданылады, олардың шартты белгісі мен ВАС-ы 13.30-суретте келтірілген.

Триодтық тиристорда (тиристор) анодтық және катодтық шықпалардан басқа басқарушы электрод (БЭ) шықпасы да болады, ол не катодқа жақын p -аймаққа, не анодқа жақын n -аймаққа қосылады. Осыған сәйкес тиристорды катодтық және анодтық басқару болады. Біріншісі ең көп таралған түрі болып табылады. Катодтық басқарылатын тиристордың құрылымы, шартты белгісі және ВАС-ы 13.31-суретте келтірілген.



13.31-сурет

$U_{\text{бас}}$ басқару кернеуі өзгерген кезде тиристорды $U_{\text{кос}}$ қосу кернеуі де өзгереді. Сәйкесінше, оны басқарылатын кілт ретінде пайдалануға болады.

Триодтық тиристорды ажырату үшін оның тогын нөлге дейін азайтып, одан кейін біраз уақыттың ішінде $U < 0$ кернеуін қосу қажет.

Триодтық тиристорлардың негізгі кемшілігі – $U_{\text{бас}}$ басқару кернеуі болмаған жағдайда, сондай-ақ анод пен катодтың арасындағы кернеудің ұлғаю жылдамдығы $dU/dt > 0$ жоғары болған жағдайда, өздігінен қосылу мүмкіндігі.

Бұл p - n -өткелдерінің токтар арқылы ұлғаюымен түсіндіріледі.

Триодтық тиристордың өздігінен қосылуы ол заряд тасушыларының термогенерациялану нәтижесінде қызған кезде де орын алуы мүмкін (13.3-суретті қараңыз).

Жабылмалы триодтық тиристорлар басқарылатын тиристорлардың бір түрі болып табылады, оларда жабу ұзақтығы жағынан қысқа, кері полярлылықты $U_{\text{бас}}$ кернеуі импульстарының есебінен де болуы мүмкін.

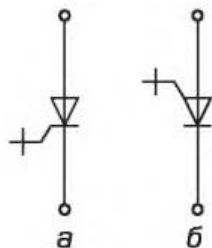
Олардың шартты белгісі катодтық және анодтық басқару үшін сәйкесінше 13.32, *а* және *б* суреттерінде келтірілген.

Тек басқарылмалы қосылатын тиристорлар *бір операциялық* деп аталады; ал басқарылмалы қосылатын және ажыратылатын тиристорлар *екі операциялық* деп аталады.

Жабылмалы тиристорлар (IGCT — Integrated Gate Commutated Thyristors) 4500 А дейінгі токтарға, 6000 В дейінгі коммутацияланатын кернеулерге және 20 кГц дейінгі коммутация жиілігіне арналып шығарылады.

Жабылмалы тиристорлардың негізгі артықшылығы оқшауланған бекітпелі биполярлық транзисторлармен салыстырғанда (13.6-бөлімшені қараңыз) – коммутацияланатын токтар мен кернеулердің жоғары мәндері және төмен статикалық шығындар қуаты.

Жабылмалы тиристорлар жоғары қуатты электр жетектер мен тұрақты токтағы беріліс желілеріне арналған электр энергиясын түрлендіру құрылғыларында басқарылатын кілттер ретінде қолданылады.



13.32-сурет

13.8. ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШ РЕЗИСТОРЛАР, КОНДЕНСАТОРЛАР, ОПТОЭЛЕКТРОНДЫҚ АСПАПТАР

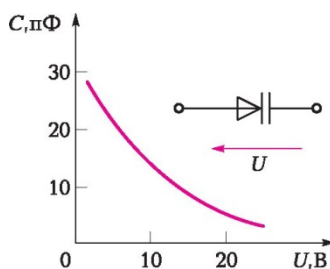
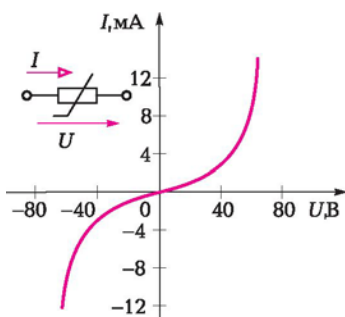
Жартылай өткізгіштердің негізінде тұрақты кедергілі резисторлар, сондай-ақ сызықтық емес ВАС-ты резисторлар дайындайды. Соңғысына *варистор* жатады. Оның типтік ВАС-ы мен шартты белгісі 13.33-суретте келтірілген. Варисторлар, мысалы тірек диод сияқты стабилизаторлар мен кернеу шектегіштерде қолданылады.

Терморезисторлар — кедергісі сыртқы ортаның температурасына тәуелді болатын жартылай өткізгіш резисторлар. Терморезисторлар оң және теріс температуралық коэффициентті кедергімен болады.

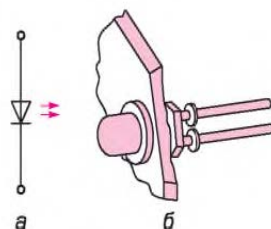
Варикаптар — *p-n*-өткелі сыйымдылығының қосылған кернеуге тәуелділігі пайдаланылатын жартылай өткізгіштер негізіндегі конденсаторлар. Варикаптың шартты белгісі мен типтік сипаттамасы 13.34-суретте келтірілген.

Оптоэлектрондық аспаптарға толқындар ұзындығының оптикалық диапазоны $\lambda = 0,2\text{—}50$ мкм болатын электромагниттік сәуле көздері (жарық шығарушы диодтар) мен қабылдағыштары (фоторезисторлар, фотодиодтар, фототранзисторлар, фототиристорлар) ретінде жұмыс жасауға қабілетті жартылай өткізгіш аспаптар жатады.

Шартты белгісі мен конструкциясы 13.35, *a* және *b* суреттерінде келтірілген *жарық шығарушы диодтың* жұмысы жарық кванттарының — *p-n*-өткелде заряд тасушылардың еркін рекомбинациясындағы, тура бағытта жылжыған фотондардың сәулеленуіне негізделген. Зарядтардың рекомбинациясы олардың



жоғары энергетикалық деңгейден төмен деңгейге өтуімен қатар жүреді. Бұл ретте артық энергия жарық квантының сәулеленуі арқылы бөлінеді. Көзге көрінетін жарық толқынының ұзындықтар диапазоны 0,45-0,68 мкм құрайды. Жарық шығарушы диодтарда жартылай өткізгіш материалдар қолданылады: галий фосфаты (GaP), кремний карбиді (SiC) және т.б. Активаторларды қосу диод сәулесінің түсін өзгертуі мүмкін. Мысалы, мырышпен,



13.35-сурет

оттектен не азотпен қоспаланған галий фосфатының негізінде жасыл, сары және қызыл жылтырақ түсті диодтар алынады.

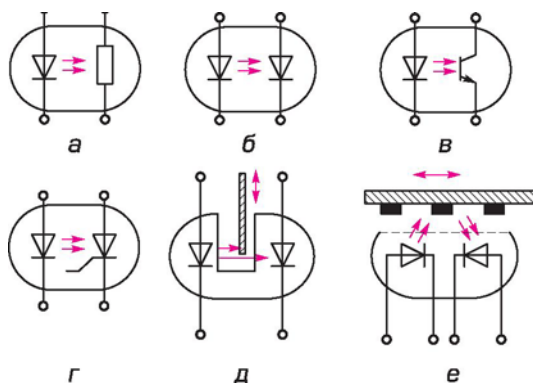
Инфрақызыл сәуле шығарушы диод жарық шығарушы диодтан айырмашылығы – көзге көрінбейтін инфрақызыл спектр аймағында электромагниттік энергия шығарады.

Фоторезисторлардың, фотодиодтардың, фототранзисторлар мен фототиристорлардың жұмысы ішкі фотоэффект құбылысына, яғни жартылай өткізгіштерде сәуленің әсерімен заряд тасушылардың – электрондар мен кемтіктердің артық жұптарының генерациясына негізделген.

Фоторезисторларда бұл жартылай өткізгіштің жарықтану кезінде электрлік өткізгіштігінің өзгеруіне әкеледі.

Фотодиодтарда артық бос электрондар мен кемтіктер p - n -өткелдің электр өрісімен бөлінеді және p -аймақты оң және n -аймақты теріс зарядтармен зарядтайды. Нәтижесінде фотодиодтың ажыратылған тізбегінің шықпаларының арасында *фотоЭҚК*-ке тең (0,7-0,8 В) кернеу (13.3) пайда болады. Фотодиодтың генераторлық және фотодиодтық жұмыс режимдері болады. *Генераторлық* режимде фотоЭҚК фотодиод тізбегіндегі электр энергиясының көзі ретінде пайдаланылады. *Фотодиодтық* режимде фотодиодка фотоЭҚК-ке кері кернеу қосылады. Бұл ретте сәулемен генерацияланатын электрондар мен кемтіктер кері тоқты ұлғайтады, оның мәні сәулелену қарқындылығына пропорционал ұлғаяды.

Фототранзистор кремний негізіндегі әдеттегі n - p - n биполярлық транзистор құрылымында болады. Фототранзистор тізбегіндегі ток коллектор мен эмиттер шықпаларының арасындағы кернеуге ғана емес, сондай-ақ оның жарықтылығына да тәуелді болады. Коллектор мен эмиттердің арасындағы кернеу 5 В болған жағдайда коллектор тогының типтік мәні фототранзистордың жарықтылығы жоқ (бар) болған кезде 0,1 мкА-ны құрайды (1 мА дейін). Жұмыс температура-



13.36-сурет

ларының диапазоны 40-85 °C-ты құрайды.

Үш p - n -өткелді *фоторезистордың* да екі шықпасы болады – анодтық және катодтық. Оның ВАС-ы триодтық тиристордың (13.31-суретті қараңыз) ВАС-ына $U_{\text{кос}}$ қосу кернеуі фототиристордың жарықтылығына тәуелді болуы бойынша ұқсайды.

Оптожұптар бір корпуста бір-бірімен өзара әрекеттесетін жарық шығарушы диоды мен фотоқабылдағышы бар оптоэлектрондық аспап болып есептеледі. Фоторезистор, фотодиод, фототранзистор және фототиристор түріндегі фотоқабылдағыштары бар оптожұптардың шартты белгілері 13.36, а, б, в және г суреттерінде келтірілген. Олардың негізгі артықшылықтары – оларда сәуле шығарғыш пен фотоқабылдағыштың электр тізбектерінің арасында гальваникалық және кері байланыстың болмауы және оптикалық арналардың бөгеуілден қорғанушылығы.

Саңылаулы (13.36-сурет д) шағылыс типті (13.36-сурет, е) ашық оптикалық арналы оптожұптар позициялық-сезімтал датчиктер ретінде пайдаланылады.

13.9. ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШ АСПАПТАРДЫ ТАҢБАЛАУ

Жартылай өткізгіш аспаптардың міндеті, негізгі электрлік параметрлері, бастапқы материалының типі, конструктивтік-технологиялық ерекшеліктері туралы ақпарат әріптік-цифрлық код негізіндегі шартты белгілер жүйесіне – таңбалауға енгізіледі.

13.5-кесте. Биполярлық және далалық транзисторлардың міндеттерін таңбалау кезінде белгілеу

Транзистордың қуаты $P_{K \max}$, Вт	Токтың бірлік беріліс жиілігі f_1 , МГц		
	төмен (3-ке дейін)	орташа (3 — 30)	жоғары (30-дан жоғары)
Төмен (0,3-ке дейін)	1	2	3
Орташа (0,3—1,5)	4	5	6
Жоғары (1,5-тен жоғары)	7	8	9

1964 жылдан бастап отандық жартылай өткізгіш аспаптарды таңбалау әріптік-цифрлық кодтан тұрады.

Бірінші элемент — бастапқы материал: германий — Г, кремний — К, галий қосылысы, мысалы галлий арсениді — А, индий қосылысы — И.

Екінші элемент — аспаптар тобы: диодтар — Д, транзисторлар — Т, далалық (полевые) транзисторлар — П, стабилитрондар — С, сәуле шығарушы оптрондық аспаптар — Л, оптожұптар — О, варисторлар — В.

Үшінші элемент — аспаптың міндеті. Мысалы, биполярлық және далалық транзисторлардың қуаты мен жиілігі (13.5-сурет), стабилитрондардың шығын қуаты және тұрақтандыру кернеуі (13.6-кесте).

13.6-кесте. Стабилитрондардың міндетін таңбалау кезінде белгілеу

Стабилитрон қуаты $P_{шгн \max}$, Вт	$U_{ст.ном}$ токты тұрақтандыру кернеуі, В		
	10-ға дейін	10—100	100-ден жоғары
Төмен (0,3 дейін)	1	2	3
Орташа (0,3—5)	4	5	6
Жоғары (5—10)	7	8	9

Төртінші, бесінші және алтыншы элементтер әзірлеменің реттік нөмірін білдіреді және 1-ден 999-ға дейінгі цифрлармен белгіленеді.

Стабилитрондар үшін төртінші және бесінші элементтер тұрақтандыру кернеуін, алтыншы элемент А-дан бастап Я-ға дейінгі әріптік белгілермен әзірлеменің реттілігін білдіреді.

Жетінші элемент – З, О және Ч-дан басқа, жазылуы жағынан ұқсас А-дан Я-ға дейінгі әріптер бірыңғай технология бойынша дайындалған аспаптардың параметрлері бойынша сыныптаманы білдіреді. Мысалы, жалпы өнеркәсіптік немесе арнайы мақсаттағы.

Мысалы: КТ7315А — кремний негізді, жоғары қуатты, төмен жиілікті биполярлық транзистор; КС107 — кремний негізді, төмен қуатты, тұрақтандыру кернеуі 7 В стабилитрон.

Егер аспаптардың габариттік өлшемдері әріптік не цифрлық белгілерді пайдалануға мүмкіндік бермесе, онда корпусына түрлі-түсті таңба (нүкте немесе түрлі-түсті жолақтар) салынады, оның мәні техникалық шарттарда түсіндіріледі.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Жартылай өткізгіш диодтар электрлік тізбектегі функционалдық міндеті бойынша қандай типтерге бөлінеді?
2. Транзисторлардың әрекет ету принципі бойынша қандай типтері бар?
3. Электр тізбегіндегі элемент ретінде транзистордың екі негізгі жұмыс режимін атаңыз.
4. Қандай жартылай өткізгіш аспаптар басқарылатын кілттер ретінде пайдаланылады?
5. Оптожұптардың электрлік байланысты аспаптарға қарағанда басымдығы неде?

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. Жартылай өткізгіш аспаптың таңбасы – КТ352А. Аспаптың типі мен негізгі параметрлерін анықтаңыз.
Жауабы: кремний негізді, төмен қуатты, жоғары жиілікті биполярлық транзистор.
2. Жартылай өткізгіш аспаптың таңбасы – КС433А. Аспаптың типі мен негізгі параметрлерін анықтаңыз.
Жауабы: кремний негізді, орташа қуатты, тұрақтандыру кернеуі 3,3 В стабилитрон.

ЭЛЕКТРОНДЫҚ ТҮЗЕТКІШТЕР ЖӘНЕ СТАБИЛИЗАТОРЛАР

14.1. ЭЛЕКТРОНДЫҚ ТҮРЛЕНДІРГІШ ҚҰРЫЛҒЫЛАРДЫ ЖІКТЕУ

Электрондық түрлендіргіш құрылғылар энергия көзінің кернеуі мен тогын энергия қабылдағышқа қажетті кернеу мен токқа түрлендіруді жүзеге асырады.

Энергия көзінің және қабылдағыштың кернеуі мен тогының түрлеріне байланысты:

- *түзеткіштер* — синусоидалық кернеумен мен токтарды тұрақтыға түрлендіруге арналған;
- *инверторлар* — тұрақты кернеулер мен токтарды синусоидалыққа түрлендіруге арналған;
- *конверторлар* — тұрақты кернеулер мен токтарды басқа мәндегі тұрақтыға түрлендіруге арналған.

Түзеткіш пен инверторды құрамдастыру бір жиілікті синусоидалық кернеу мен токты басқа жиілікті синусоидалық кернеу мен токқа түрлендіруді іске асырады.

Жоғары қуатты түрлендіргіштер (жүз және одан көп киловатқа дейін) электр жетекте, электр дәнекерлеу құрылғыларында, электротермияда және т.с.с. ал төмен қуатты түрлендіргіштер (бірнеше ондық ваттқа дейін) радио-электрондық аппаратураны қайталама электрмен қуаттау көздерінде (ҚЭҚК) қолданылады.

Түзеткіштердің әрекет ету принципі мен сипаттамаларын қарастырайық, олар түзетілген синусоидалық кернеу көзінің фазалар саны бойынша – бір фазалық және көп фазалық (көбінесе үш фазалы) түзеткіштер, схемотехникалық шешім бойынша – нөлдік нүктелі шықпасы бар трансформаторлы және көпірлі, түзетілген кернеуді реттеу мүмкіндіктері бойынша басқарылмайтын және басқарылатын болып жіктеледі.

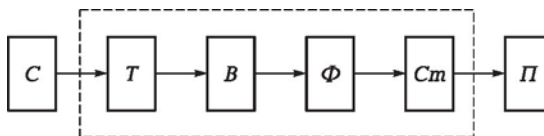
14.2. БАСҚАРЫЛМАЙТЫН БІР ФАЗАЛЫҚ ТҮЗЕТКІШТЕР

Жалпы түзеткіш құрылғының құрылымдық схемасы(14.1-сурет) T трансформаторды, B түзеткішті, Φ тегістегіш сүзгіні және C_m түзетілген кернеу стабилизаторын қамтиды. Трансформатор C желінің синусоидалық кернеуінің мәнін артынан түзетілетін қажетті деңгейге дейін өзгерту үшін қызмет етеді. Стабилизатор желі кернеуі өзгерген жағдайда Π қабылдағыштағы кернеуді өзгертпей сақтап тұрады. Түзеткіш құрылғының жекелеген түйіндері, мысалы трансформатор, болмауы мүмкін, бұл жұмыс жағдайына байланысты.

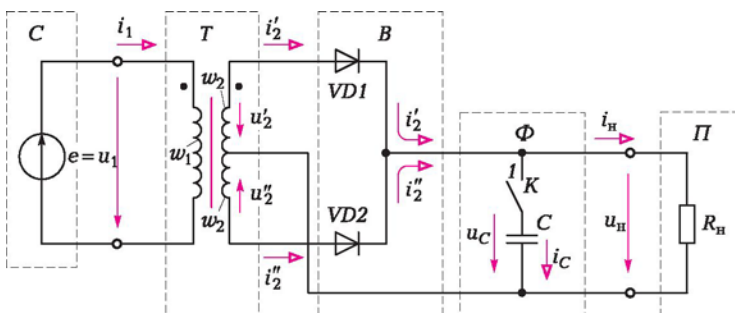
Бұдан әрі «түзеткіш құрылғы» терминінің орнына қысқартып «түзеткіш» деп қолданатын боламыз.

Басқарылмайтын түзеткіштерде синусоидалық кернеуді түзету үшін диодтар, яғни басқарылмайтын вентильдер қосылады, ал түзетілген кернеуді тегістеу үшін әдетте сыйымдылық сүзгілер қосылады.

Есептеуді жеңілдету үшін қабылдағышты $R_{\text{ж}}$ жүктеме кедергілі резистивтік қоспалықты деп, ал диодтарды тура бағытта ток үшін тізбектің қысқа тұйықталуын және кері бағытта ток үшін оның үзілуін іске асыратын идеалды кілттер деп аламыз.



14.1-сурет



14.2-сурет

Нөлдік шықпалы трансформаторлы түзеткіште қабылдағыш шықпаға трансформатордың екінші реттік орамасының ортасынан қосылады (14.2-сурет). Тегістегіш сүзгісіз түзеткіштің жұмысын қарастырайық (K кілті ажыратылған). Егер орамдар саны w_2 болатын екінші реттік ораманың әрбір жартысында тиісті диод қосулы болатын токтың бағытын оң деп есептесек, онда ораманың әрбір жартысындағы және әрбір диодтағы ток оң жарты периодтың ішінде (ос жарты үшін) синусоидалық болады және теріс жарты периодтың ішінде нөлге тең болады (14.3-сурет, а). Қабылдағышта екі токтың да оң бағыттары сәйкес келеді, яғни: $i_n = i'_2 + i''_2$ (14.3-сурет, б).

Синусоидалық токты мұндай түзету *екі жарты периодты* деп аталады. Егер w_2 екінші реттік орамалардың бірінің тізбегін ажыратылған болса, онда синусоидалық токты түзету *бір жарты периодты* болады.

Идеалды трансформаторда жүктеме тогының тұрақты құраушысы:

$$I_0 = \frac{2}{\pi} I_{m2} \approx 0,64 I_{m2} \quad (14.1)$$

және оның әсер етуші мәні:

$$I = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_{m2}^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_{m2}}{\sqrt{2}} \quad (14.2)$$

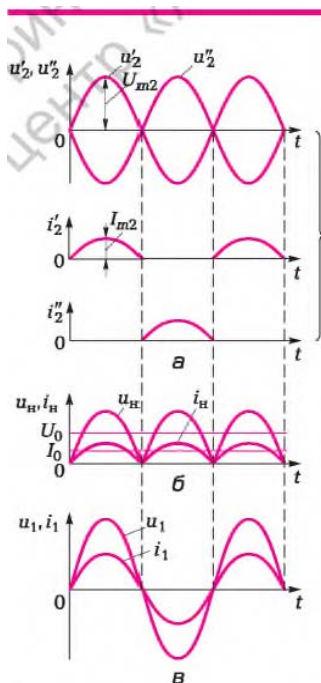
сол амплитудалы синусоидалық токтың сәйкес шамаларының мәндеріне тең.

Орамдар саны w_1 болатын трансформатордың бірінші реттік орамасындағы ток синусоидалық:

$$i_1 = (i'_2 - i''_2) \frac{w_2}{w_1} = I_{m2} \frac{w_2}{w_1} \sin \omega t$$

және фаза бойынша желінің синусоидалық кернеуімен сәйкес келеді (14.3-сурет, в)

$$u_1 = (u'_2 - u''_2) \frac{w_1}{2w_2} = U_{m2} \frac{w_1}{w_2} \sin \omega t.$$



14.3-сурет

Тегістегіш фильтрді қосқаннан кейін түзеткіштің жұмысы қалай өзгередінін қарастырайық (K кілті тұйықталған). Кирхгофтың бірінші заңы бойынша тізбектің 1 түйіні үшін $VD1$ диод тогы мынаған тең:

$$i'_2 = i_c + i_H,$$

немесе

$$i'_2 = C \frac{du_c}{dt} + u_H / R_H,$$

мұндағы $u_c = u_H = u'_2 = U_{m2} \sin \omega t$ және $i_c = C du_c / dt = \omega C U_{m2} \cos \omega t$ — сүзгі конденсаторындағы кернеу және оның ішіндегі ток.

Осы теңдеуге $i'_2 = 0$ ток мәнін қойып, диодты ажырататын t_1 уақытын анықтаймыз:

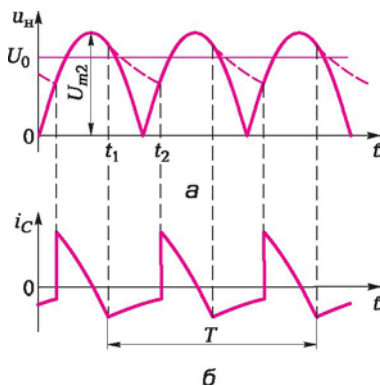
$$\omega C U_{m2} \cos \omega t_1 + \frac{U_{m2} \sin \omega t_1}{R_H} = 0,$$

бұдан

$$t_1 = \frac{\arctg(-\omega R_H C)}{\omega}.$$

t_1 уақыт моментінен бастап, қабылдағыштағы кернеу экспоненциалды өзгередін болады (1.5-бөлімшені қараңыз):

$$u_H = u_c = U_{m2} \sin \omega t_1 e^{-\frac{t-t_1}{R_H C}},$$



14.4-сурет

бұл 14.4, *a* суретінде штрих сызықпен көрсетілген.

t_2 уақыт моментінде u_C конденсатордағы және $u''_2 = U_{m2} \sin \omega t$ түзеткіш кірісіндегі кернеу тең болады және VD2 диоды қосылады. Бұдан әрі тізбектегі процесс жүйелі түрде қайталанады. Сүзгі конденсаторының энергия көзінен i_C тогымен жүйелі зарядталуы және оның қабылдағыш тізбегінде артынан токтан ажырауы жүзеге асады (14.4-сурет, *б*).

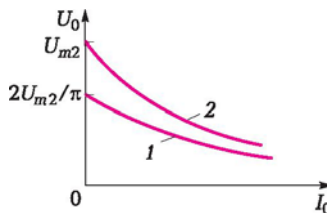
Тегістегіш сүзгіні қосу U_0 тұрақты құраушысын ұлғайтады және түзетілген кернеудің үйлесімді құраушыларының мөлшерін азайтады.

Түзеткіштің сыртқы сипаттамасы деп U_0 түзетілген кернеудің орташа мәнінің I_0 түзетілген токтың орташа мәніне тәуелділігін айтады.

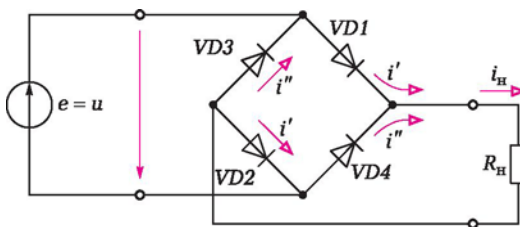
14.5-суретте тегістегіш сүзгісіз (1-тәуелділік) және тегістегіз сүзгілі (2-тәуелділік) бір фазалық түзеткіштің сыртқы сипаттамалары келтірілген.

Бірінші жағдайда жүктеме тізбегінің кедергісі азайған кезде және түзетілген ток ұлғайған кезде U_0 кернеуінің азаюы нақты диодта кернеу азаюының ұлғаюымен, ал екінші жағдайда конденсатордың токтан анағұрлым тез ажырауымен түсіндіріледі.

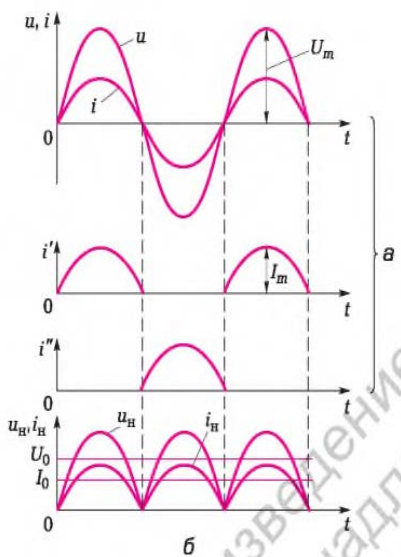
Түзеткіштің көпірлік схемасында (14.6-сурет) төрт диод түзеткіш көпірдің төрт иінін құрайды. Периодтың бірінші жартысында VD1 және VD2 диодтары қосылған және i' тогын өткізеді, ал VD3 және VD4 диодтары ажыратылған. Периодтың екінші жартысында VD3 және VD4 диодтары қосылған және i'' тогын өткізеді, ал VD1 және VD2 диодтары ажыратылған (14.7-сурет, *a*). Көпірлі схема үшін нөлдік шықпалы трансформаторлы түзеткішке



14.5-сурет



14.6-сурет



14.7-сурет

арналған жоғарыдағы қатынастар дұрыс болмақ. Бұл ретте жүктеме тогы $i_{ж} = i' + i''$ түзетілген (14.7-сурет, б), ал көз тогы $i = i' - i''$ синусоидалық (14.7-сурет, а) болады.

14.3. БАСҚАРЫЛМАЙТЫН КӨП ФАЗАЛЫҚ ТҮЗЕТКІШТЕР

Көп фазалық түзеткіштер бір фазалық түзеткіштермен салыстырғанда түзетілген кернеудің лүпілін азайтады.

14.8-суретте нөлдік шықпасы бар үш фазалық трансформаторлы (7.13, б суретін қараңыз) үш фазалық түзеткіштің схемасы көрсетілген. Әрбір берілген уақытта ток аноды трансформатордың екінші реттік орамасының шықпасымен жалғанған (а, б не с), кернеуі (u_a , u_b не u_c) оң және ең жоғары (14.9-сурет, а) болатын диодты ғана өткізеді.

Идеалды трансформатор үшін i_a , i_b және i_c екінші реттік орамалар токтары әрқайсысының қайталау периоды $T = 2\pi/\omega$, ұзақтығы $T/3$ және амплитудасы $I_{m2} = U_{m2}/R_H$ болатын, бір-біріне қатысты периодтың $1/3$ -іне жылжыған импульстардың үш реттілігінен тұрады (14.9-сурет, б).

Бірінші реттік орамалардың токтары мынаған тең:

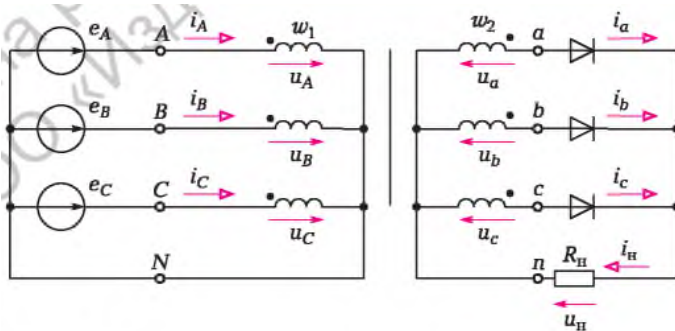
$$i_A = \frac{w_2}{w_1} i_a, \quad i_B = \frac{w_2}{w_1} i_b, \quad i_C = \frac{w_2}{w_1} i_c,$$

$i_H = i_a + i_b + i_c$ жүктеме тогының тұрақты I_0 құраушысы бар. Бұл жағдайда түзетілген кернеу екінші реттік орамалардың орай жанаспа оң жарты толқындарымен сәйкес келеді: $u_H = R_H i_H$ (14.9-сурет, ө). Трансформатордың екінші реттік және бірінші реттік орамаларындағы токтардың құраушылары $I_0/3$ және $w_2 I_0 / (3w_1)$ тұрақты, ал оның магнит өткізгішіндегі магнит ағыны айнымалы екенін атап өтеміз.

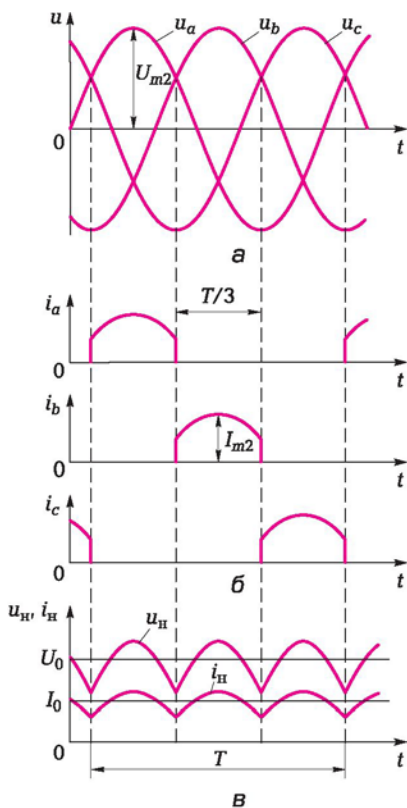
Түзеткіштің үш фазалық *көпірлік* схемасында үш фазалық трансформатордың екінші реттік орамасының нөлдік шықпасы қажет емес. Сондықтан оның екінші реттік орамалары жұлдызшамен де, үшбұрышпен де жалғануы мүмкін, егер жұмыс жағдайлары мүмкіндік берсе, үш фазалық трансформатор мүлдем болмауы да мүмкін. Үш фазалық трансформатор болмаған жағдайда түзеткіш үш фазалық көзге (14.10-сурет) $VD1$, $VD3$ және $VD5$ диодтары барлық катодтық шықпалар біріккен топ түзіп, ал $VD2$, $VD4$ және $VD6$ диодтары барлық анодтық шықпалар біріккен топ түзетіндей етіп қосылады.

Үш фазалық көздің N бейтарап нүктесі потенциалының мәні $v_N = 0$ деп аламыз. Бұл ретте оның A , B және C шықпаларының потенциалдары мынаған тең (14.11-сурет, а):

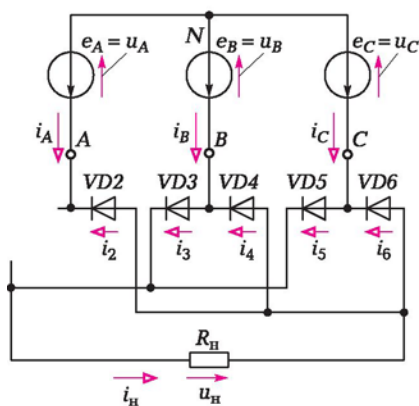
$$\begin{aligned} v_A &= u_A = U_m \sin \omega t; \\ v_B &= u_B = U_m \sin (\omega t - 2\pi/3); \\ v_C &= u_C = U_m \sin (\omega t - 4\pi/3). \end{aligned}$$



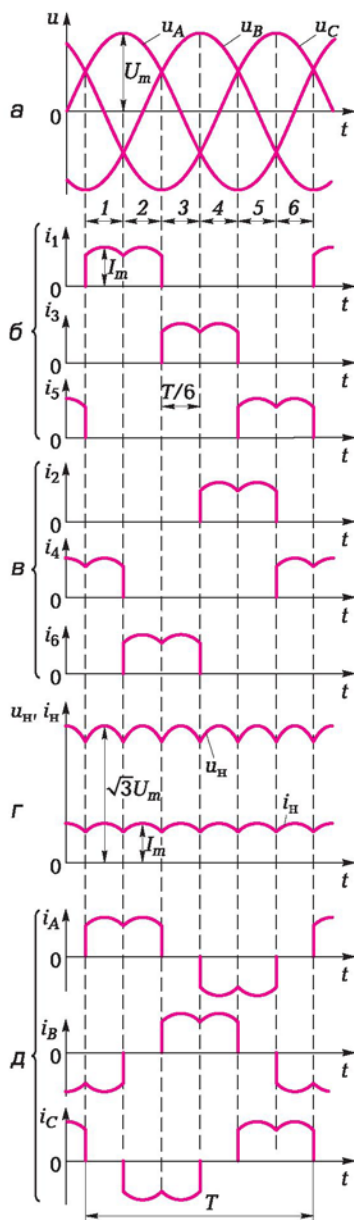
14.8-сурет



14.9-супер



14.10-супер



14.11-супер

Әрбір берілген уақытта анодтық шықпасы N бейтарап нүктесінің потенциалымен салыстырғанда ең жоғары оң потенциалдан $U_{\text{Анод.мах}} > 0$ тұратын бірінші топтың диоды, сонымен бірге катодтық шықпасы сол нүктенің потенциалымен салыстырғанда ең жоғары теріс потенциалдан $U_{\text{Кнод.мах}} < 0$ тұратын екінші топтың диоды қосылады. Диодтардың ауысу тәртібін бақылау үшін, тізбек жұмысының T бір периодын, 14.11, a суретінде көрсетілгендей, алты тең уақыт аралығына бөлеміз.

14.11-кестеде әрбір уақыт аралығы үшін бірінші топ диодтарының анодтарының потенциалы $U_{\text{Анод.мах}}$ ең жоғары оң және екінші топ диодтарының катодтарының потенциалы $U_{\text{Кнод.мах}}$ ең жоғары теріс болатын шамалар, сондай-ақ әрбір топтың қосылған диодтарының нөмірлері келтірілген. Бір периодтың ішінде алты ауысу болады, яғни $m = 3$ фазалар санынан екі есе көп.

Түзеткіштің жұмысын уақыт бойынша біріккен бірінші топ диодтарының i_1, i_3 және i_5 токтарының (14.11-сурет, b), екінші топ диодтарының i_2, i_4 және i_6 токтарының (14.11-сурет, $в$), $i_H = i_1 + i_3 + i_5 = i_2 + i_4 + i_6$ жүктеме тогының, $u_H = R_H i_H$ түзетілген кернеудің (14.11-сурет, $г$) және $i_A = i_1 - i_2, i_B = i_3 - i_4$ және $i_C = i_5 - i_6$ (14.11-сурет, $д$) үш фазалық көздің айнымалы фазалық токтарының тәуелділіктері көрсетеді. Түзетілген кернеудің максималды мәні $\sqrt{3}U_m$ үш фазалық көздің синусоидалық сызықтық кернеуінің амплитудасына тең, ал түзетілген токтың максималды мәні: $I_m = \sqrt{3} U_m R_n$.

Көп фазалық басқарылмайтын түзеткіштердің қуаты әдетте орташа не жоғары (оннан бастап жүздеген киловаттқа дейін және 100000 А-ға дейінгі токтарда одан да жоғары) болады. Бір фазалық басқарылмайтын түзеткіштердің қуаты төмен не орташа (бірліктен ондаған киловаттқа

14.1-кесте. Түзеткіштің үш фазалық көпірлі схемасында диодтардың ауысу тәртібі

Аралық нөмірі	$U_{\text{Анод.мах}} > 0$	$U_{\text{Кнод.мах}} < 0$	Бірінші топ диоды	Екінші топ диоды
1	U_A	U_B	VD1	VD4
2	U_A	U_C	VD1	VD6
3	U_B	U_C	VD3	VD6
4	U_B	U_A	VD3	VD2
5	U_C	U_A	VD5	VD2
6	U_C	U_B	VD5	VD4

Басқарылатын түзеткіштерде басқармайтын диодтардың орнына басқарылатын (тиристорлар, транзисторлар) вентильдер қолданылады, оларды қосу мен ажырату басқару жүйесі импульстарының реттілігімен беріледі.

14.4.

КЕРНЕУ МЕН ТОК СТАБИЛИЗАТОРЛАРЫ

Стабилизаторлар жүктеме өзгерген жағдайда және кері тұрақсыздандырушы факторлар әсер еткен жағдайда қабылдағыштың жұмыс режимін тұрақтандыруға арналған. Тұрақты кернеу мен токтың электрондық стабилизаторлары кең таралған.

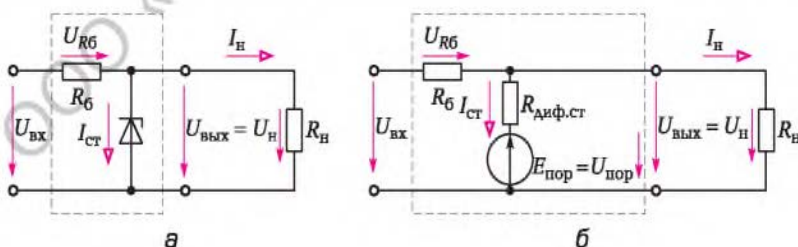
Кернеу стабилизаторлары. Параметрлік және өтемдеуші стабилизаторлар болады.

Параметрлік стабилизаторларда шығыстағы тұрақты кернеуді тұрақтандыру сызықтық емес вольт-амперлік сипаттамалары бар элементтермен жүзеге асырылады. Мұндай элементтердің бірі стабилитрон болып табылады (13.3-бөлімшені қараңыз).

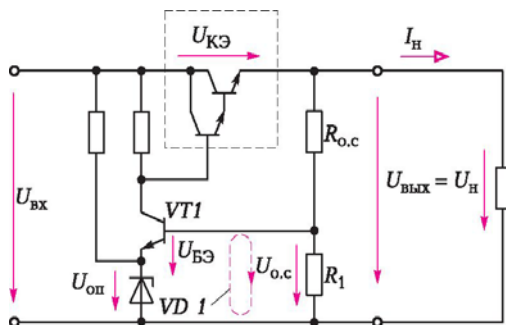
Стабилитрон негізіндегі кернеу стабилизаторының принциптік схемасы және оның алмастыру схемасы 14.12, *а* және *б* суреттерінде келтірілген, ондағы $R_{\text{диф.ст}}$, $I_{\text{ст}}$ және $U_{\text{шек}}$ – стабилитронның дифференциалды кедергісі, тогы және шектік өткізгіштік кернеуі (10.14-суретті қараңыз); $R_{\text{ж}}$ және $R_{\text{б}}$ – жүктеме тізбегі мен балластық резистордың кедергілері. Стабилизатор кірісіндегі кернеу өзгерген жағдайда:

$$U_{\text{кпр}} = U_{\text{шек}} + R_{\text{диф.ст}} I_{\text{ст}} + U_{R_{\text{б}}} = U_{\text{кпр}} + U_{R_{\text{б}}}$$

оның шығысындағы кернеу стабилитронның $R_{\text{диф.ст}}$ дифференциалды кедергісінің мәні төмен болған жағдайда, балластық резистордағы $U_{R_{\text{б}}}$ кернеудің төмендеу есебінен біраз өзгереді. Стабилитрондар негізді



14.12-сурет



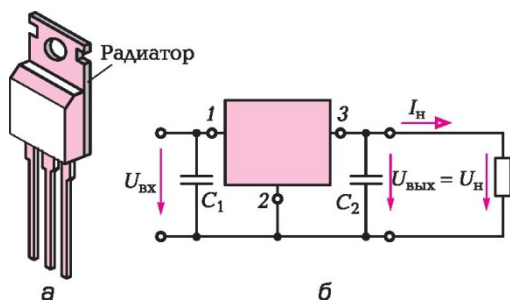
14.13-сурет

параметрлік стабилизаторлардың $U_{\text{ст.ном}} = 0,3\text{—}100$ В номиналды тұрақтанған кернеуінің және тұрақтандыру коэффициентінің 20-30 типтік мәндерінен тұрады:

$$K_{\text{стаб}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}} \cdot U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}} \cdot \Delta U_{\text{ВЫХ}}},$$

Өтемдеуші стабилизаторларда шығыстағы тұрақты токты тұрақтандыру кернеу бойынша теріс кері байланыстың көмегімен жүзеге асырылады (15.18, а суретін қараңыз).

Кез келген типтегі өтемдеуші стабилизатордың құрамына реттеуіш элемент, салыстыру құрылғысы және тұрақты ток күшейткіші кіреді. 14.13-суретте өтемдеуші стабилизатордың типтік схемасы келтірілген, онда салыстыру құрылғысы мен тұрақты ток күшейткішінің рөлін VT1 транзисторы, ал штрих сызықтың ішінде белгіленген реттеуіш элементтің рөлін құрама транзистор ойнайды (13.17-суретті қараңыз). VD стабилитронындағы $U_{\text{тр}}$ тірек кернеуі R_1 және $R_{\text{к.б}}$ резисторларындағы кернеу бөлгіші арқылы стабилизатор шығысындағы кернеуге пропорционал $U_{\text{к.б}} = R_1 / (R_1 + R_{\text{к.б}}) U_{\text{шығ}}$ кері байланыс кернеуімен салыстырылады. 1-контурға арналған Кирхгоф заңы бойынша бұл кернеулердің айырымы транзистор базасы мен эмиттерінің арасындағы кернеуді білдіреді: $VT1 U_{\text{БЭ}} = U_{\text{к.б}} - U_{\text{тр}}$. Стабилизатор шығысындағы $U_{\text{шығ}}$ кернеуінің ұлғаюы (азаяуы) $U_{\text{БЭ}}$ кернеуін ұлғайтады (азайтады). Сәйкесінше құрама транзистордың $I_{\text{Б}}$ база тогы азаяды (ұлғаяды) және оның коллекторы мен эмиттерінің арасындағы кернеу ұлғаяды (азаяды), бұл дегеніміз $U_{\text{шығ}}$ кернеуі мәнінің тұрақтанғанын білдіреді.



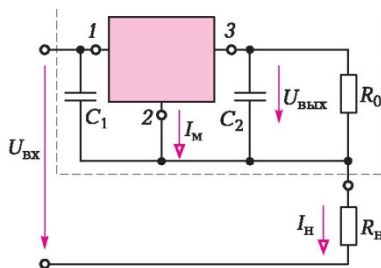
14.14-сурет

Шығыстағы кернеуі бекітілетін және реттелетін екі типтегі интегралдық схема түріндегі өтемдеуші кернеу стабилизаторлары шығарылады. Соңғысы өз жұмысы үшін бірқатар сыртқы элементтердің қосылуын қажет етеді (алты-сегіз резистор мен конденсаторға дейін). Шығыстағы кернеуі бекітілген стабилизатордың интегралдық схемасының үш шықпасы (14.14-сурет, а) бар және ол схема бойынша қосылады (14.14-сурет, б). Сыйымдылығы $C_2 \geq 2,2$ мкФ конденсатор $I_{ж}$ жүктеме тогы импульсті өзгерген жағдайда тұрақтылықты қамтамасыз етеді. Сыйымдылығы

14.2-кернеу. Бекітілетін кернеулі стабилизаторлардың интегралдық схемасының параметрлері

Параметрі	Мәні
Шығыстағы кернеу тұрақсыздығының коэффициенті: кірістегі кернеуен, %/В $K_U = \Delta U_{шығ} / \Delta U_{кір} U_{шығ} 100;$	0,05
жүктеме тогынан $0 < I_{ж} < I_{ж.мах}$, % $K_I = \Delta U_{шығ} / U_{шығ} 100;$	1,00
температурадан, %/°C $a_U = \Delta U_{шығ} / U_{шығ} \Delta \theta 100$	0,02
Стабилизатордағы кернеудің минималды азаюы, В	2,50
Интегралдық схеманың максималды тогы, мкА	10,0

$C_1 > 0,33$ мкФ конденсатор кірістегі кернеу лүпілін (бөгуілдерді) тегістейді. Кернеу стабилизаторларының интегралдық схемалары ток пен артық қызу бойынша артық жүктемеден кіріктіріме қорғанысты қамтиды, жүктеме тогы 8 А-ға дейін болған жағдайда 1,5-18 В тұрақтанған кернеуінің бірқатар номиналды мәндері бар (14.2-кесте).



14.15-сурет

Ток стабилизаторлары.

Тұрақты кернеудің өтемдеуші стабилизаторының 14.13-суреттегі схемасын тұрақты токтың өтемдеуші стабилизаторына түрлендіруге болады. Ол үшін R_1 резисторын жүктеме тізбегіне жүйелі қосу арқылы кернеу бойынша кері байланысты ток бойынша кері байланыспен (15.18-сурет, б) алмастыру қажет. Бұл ретте кері байланыс кернеуінің мәні жүктеме тогының мәніне пропорционал болады, яғни $U_{к.б} = R_1 I_{ж}$.

Токтың тұрақтанған көзін 14.15-суреттегі схема бойынша кернеу стабилизаторының интегралдық схемасының негізінде де іске асыруға болады, аталмыш суретте ток көзінің схемасы штрих сызықтың ішінде белгіленген. Интегралдық схеманың $I_{ж}$ тогын елемесек, жүктеме тізбегіндегі $I_{ж} = U_{шығ}/R_0$ тогы оның R_H кедергісіне тәуелді болмайды.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Түрлендіргіш құрылғылар функционалдық міндеті бойынша қандай типтерге бөлінеді?
2. Бір фазалық басқарылмайтын түзеткіштерге қарағанда көп фазалық басқарылмайтын түзеткіштерде түзетілген кернеу лүпілі неге аз болады?
3. Басқарылмайтын түзеткіштерде тегістегіш сүзгі қандай рөл атқарады?
4. Тұрақты ток стабилизаторлары әрекет ету принципі бойынша қандай типтерге бөлінеді?

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. Тегістегіш сүзгісіз нөлдік шықпалы трансформаторлы түзеткіште (14.2-суретті қараңыз) (К кілті ажыратылған)

қабылдағыш шықпаларының арасындағы U_0 кернеудің тұрақты құрауышын анықтаңыз (14.3-суретті қараңыз), бұл ретте параметр мәндері: төмендеткіш трансформатор кернеуінің трансформация коэффициенті: $n_{12} = w_1/w_2 = 4$, желі кернеуінің әсерлік мәні: $U_1 = 220$ В, схеманың барлық элементтері идеал.

Жауабы: 49,5 В.

2. 14.12-суреттегі схеманың тұрақты кернеуінің тұрақтандыру коэффициенті неге тең, бұл ретте параметр мәндері: $U_{\text{кпр}} = 10$ В, $\Delta U_{\text{шығ}} = 1$ В, $U_{\text{шығ}} = 3$ В, $\Delta U_{\text{шығ}} = 10$ мВ?

Жауабы: 30.

ЭЛЕКТРОНДЫҚ КҮШЕЙТКІШТЕР

15.1. ЭЛЕКТРОНДЫҚ КҮШЕЙТКІШТЕРДІ ЖІКТЕУ

Күшейткіштер деп қосылған қуаттау көзі энергиясының есебінен электр сигналдары параметрлерінің мәндерін ұлғайтуға арналған құрылғыларды айтады. Күшейткіштер сигналдардың қандай да бір параметрлерін барынша күшейту үшін қолданылады. Осы белгісіне қарап оларды кернеу, ток және қуат күшейткіштері деп бөледі.

Күшейткіштің сызықтық және сызықтық емес жұмыс режимдері болуы мүмкін.

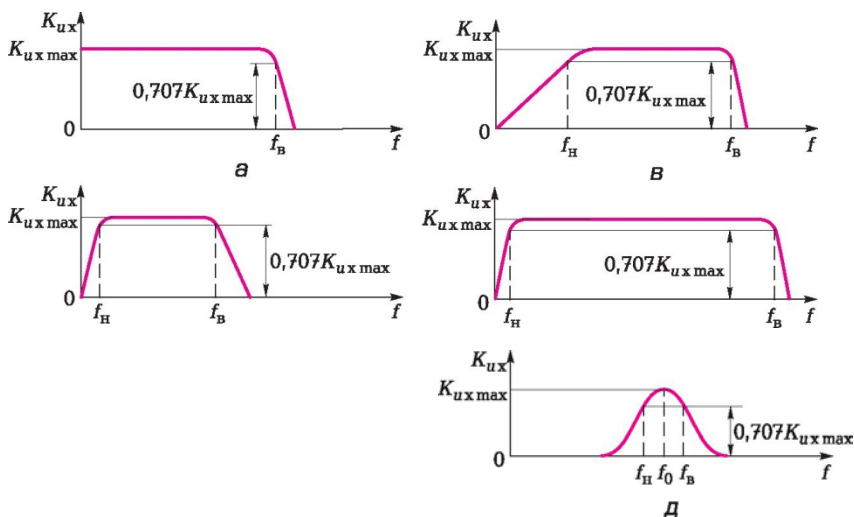
Сызықтық жұмыс режимді күшейткіштерде әртүрлі жиілік гармоникаларының жиынтығы ретінде ұсынуға болатын (4.17-бөлімшені қараңыз) күшейтілетін сигнал формасының бұрмалануы минималды болады. Егер сигналдың барлық гармоникалық құраушылары бұрмаланбастан ұлғайса, онда сигналдың бұрмалануы минималды болады. Күшейткіштің сигналдың гармоникалық құраушыларының амплитудасын ұлғайту қасиеті оның амплитудалық-жиіліктік сипаттамасын (АЖС) (4.49) сипаттайды.

$$K_{и\kappa}(\omega) = \frac{U_{вых\kappa}}{U_{вх}}, \quad (15.1)$$

мұндағы $U_{к\text{ірі}}$ және $U_{шығ.ж}$ — бос жүріс режиміндегі күшейткіштің кірісі мен шығысындағы синусоидалық кернеулердің әсерлік мәндері.

АЖС типі бойынша күшейткіштер баяу өзгертін кернеулер мен токтар немесе тұрақты ток (15.1-сурет, *а*), төмен жиіліктер (15.1-сурет, *б*), жоғары жиіліктер (15.1-сурет, *в*) күшейткіштері, кең жолақты (15.1-сурет, *г*) және тар жолақты (15.1-сурет, *д*) күшейткіштер болып бөлінеді.

Әртүрлі типтегі күшейткіштер АЖС-ң жиіліктерінің төменгі және жоғарғы шекараларының типтік мәндері 15.1-кестеде келтірілген.



15.1-сурет

Сызықтық емес жұмыс режимді күшейткіштерде кірістегі кернеу мәні шекаралық деңгейден біраз үлғайған жағдайда шығыстағы кернеу мүлдем болмайды. Мұндай күшейткіштер импульсті, оның ішінде логикалық техника құрылғыларында қолданылады.

Қазіргі уақытта интегралдық атқарымдағы күшейткіштер кеңінен пайдаланылады. Сондықтан күшейткіштерді әзірлеу емес, оларды автоматика, басқару және өлшеу жүйелерінің әртүрлі функционалдық түйіндерін іске асыру үшін қолдану өзекті болмақ.

15.1-кесте. Күшейткіштің амплитудалық-жиіліктік сипаттамасы жиіліктерінің төменгі және жоғарғы шекаралары

Күшейткіш типі	Жиілік шекаралары, Гц	
	төменгі f_T	жоғарғы $f_{ж}$
Тұрақты ток күшейткіші	0	$10^3 - 10^8$
Төмен жиілік күшейткіші	20-50	$10^4 - 2 \cdot 10^4$
Жоғары жиілік күшейткіші	$10^4 - 10^5$	$10^7 - 10^8$
Кең жолақты күшейткіш	20-50	$10^7 - 10^8$

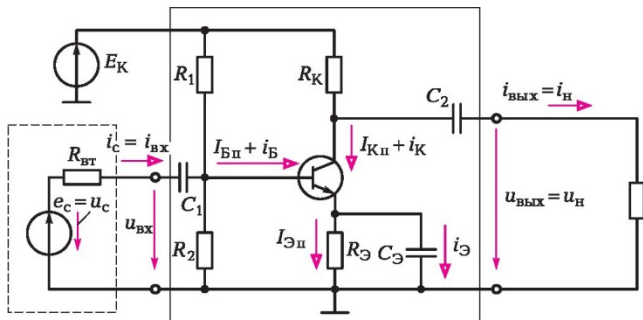
Биполярлық транзисторлардағы күшейткіш каскадтардың негізгі үш типі бар: ортақ эмиттерлі (ОЖ), ортақ коллекторлы (ОК) және ортақ базалы (ОБ).

Каскадтардың атаулары олардың төмен сигнал режиміндегі кіріс және шығыс тізбектерін алмастыру схемаларында транзистор эмиттеріне (15.4-суретті қараңыз), коллекторына (15.9-суретті қараңыз) және базасына сәйкес келетін ортақ нүктенің барын көрсетеді.

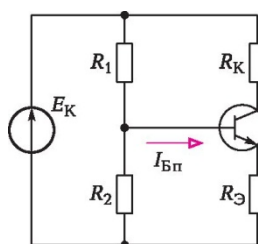
Төмен жиілікті күшейткіш каскадтардың жұмыс принциптері мен сипаттамаларын қарастырайық.

ОЭ-лі күшейткіш каскад. ОЭ-лі күшейткіш каскадтың типтік схемасы 15.2-суретте тұтас сызықпен белгіленген. Бұнда және бұдан әрі күшейткіштің кірісі мен шығысының ортақ түйінін жерге қосу арқылы белгілетін боламыз. Штрих сызықтың ішінде көрсетілген күшейтілетін сигналдың көзі күшейткіш каскадтың кіріс шықпасына қосылады және ол ішкі кедергісі $R_{\text{ш}}$ және ЭҚК $e_c = u_c$ болатын көз болып есептеледі. Жоғары сыйымдылықты C_1 және C_2 конденсаторлары тұрақты ток тізбегін (қуаттау тізбегін) сигнал көзінің тізбегінен және күшейткіш каскадтың кіріс шықпаларына қосылатын жүктеме кедергісі $R_{\text{ж}}$ қабылдағыш тізбегінен бөледі. Бұл ретте C_1 , C_2 , сондай-ақ C_3 синусоидалық ток конденсаторларының X_C кедергілері төмен болады.

Кіріс сигналының u_c кернеуі төмен болса, онда күшейткіш каскадтың жұмысын E_K ЭҚК көзінің ғана әсер ету жағдайында $I_{\text{БТ}}$, $I_{\text{КТ}}$ коллектор және $I_{\text{ЭТ}}$ токтарының құрауыштары тұрақты болатын



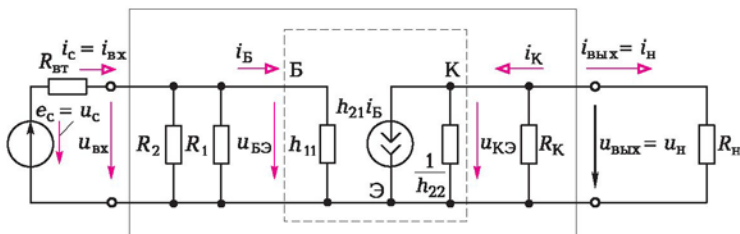
15.2-сурет



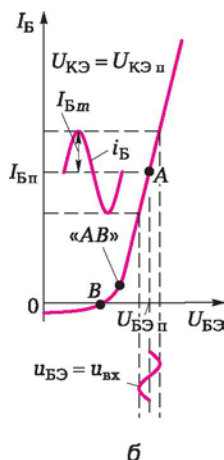
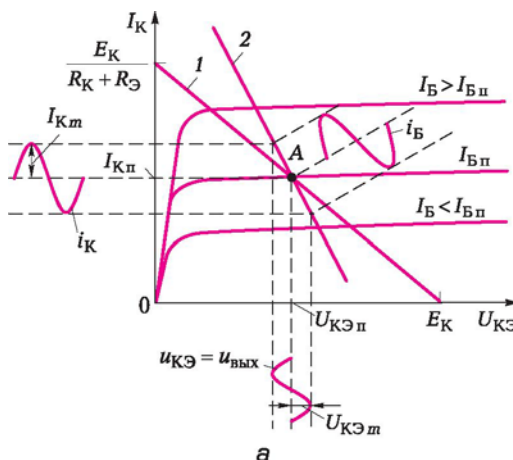
15.3-сурет

тыныштық режимі (15.3-сурет) мен i_c тогы күшейткіш каскад кірісіндегі $i_{к\text{ірі}}$ тогына тең e_c ЭҚК басқа көзінің (15.4-сурет) әсер ету жағдайында i_B , i_K коллектор және $i_Э$ токтарының құрауыштары айнымалы болатын төмен сигнал режимінің қосындысы ретінде қарастырған қолайлы болмақ. Күшейткіш каскад шығысындағы $i_{\text{шығ}}$ тогына тең $i_{\text{ж}}$ жүктеме тогының оң бағыты транзистордың ортақ шығысына, яғни эмиттерге қабылданған.

Тыныштық режимін 2.32-суреттегі сияқты, $I_{БТ} < I_{КТ}$, яғни $I_{ЭТ} \approx I_{БТ}$ деп алатын болсақ, жүктемелік сипаттама әдісі бойынша транзистордың статикалық коллекторлық сипаттамаларындағы A



15.4-сурет



15.5-сурет

$$I_K = \frac{E - U_{KЭ}}{R_K + R_Э}, \quad (15.2)$$

жұмыс нүктесі анықтайды (15.1-сурет, $a - 1$ -түзу).

Қажетті тыныштық режимін R_2 және R_3 резисторларынсыз да алуға болатынын атап өтеміз. Алайда соңғысы қоршаған орта температурасы өзгерген жағдайда A жұмыс нүктесінің күйін тұрақтандыруға мүмкіндік береді. Қоршаған орта температурасының жоғарылауы транзистордың параметрлерін база, коллектор және эмиттер токтары өзге өзгермейтін жағдайларда ұлғаятындай етіп өзгертеді. Эмиттер тізбегінде $R_Э$ резисторы болған жағдайда бұл онда кернеудің ұлғаюына әкеледі. Сонымен қатар базаның $U_{БЭ}$ кернеуі мен тогы азаяды. Осылайша теріс кері байланыс іске асып, тыныштық режимі тұрақтанады. Төмен сигнал режимінде теріс кері байланыстың сипатталған механизмі жоқ, себебі $R_Э$ резисторына параллель $C_Э$ жоғары сыйымдылықты конденсаторы қосылған.

Төмен сигнал режимі 15.4-суреттегі күшейткіш каскадты алмастыру схемасы бойынша есептеледі, онда тұрақты h -параметрлі (13.6) транзисторды алмастыру схемасы штрих сызықтың ішінде, ал күшейткіш каскадты алмастыру схемасы тұтас сызықтың ішінде көрсетілген.

Алмастыру схемасынан басқа резистивтік элементтермен салыстырғанда кедергілері жоғары $1/h_{22}$, R_1 және R_2 резистивтік элементтерін алып тастап, сигнал кернеуінің өзгеруін синусоидалық деп және жүктеме тізбегін $R_{ж} = \infty$ деп алып, ОЭ-лі күшейткіш каскадтың *негізгі параметрлерін* аламыз:

$$R_{к\text{іріс}} = h_{11} \quad (15.3)$$

— кіріс кедергісі (1—10 кОм);

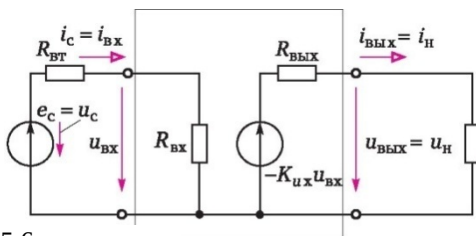
$$R_{ш\text{ығыс}} = R_K \quad (15.3a)$$

— шығыс кедергісі (10—100 кОм);

$$u_{н.х} = -\frac{h_{21}R_K}{h_{11}}u_{вх} \quad (15.3б)$$

— $u_{нх} = h_{11}i_B$ кернеуінің полярлылығына қатысты $u_{нх} = -h_{21}R_K i_B$ кернеуінің полярлылығының инверттеу (15.5-суретті қараңыз);

$$K_{u\text{х}} = \frac{U_{н.х}}{U_{вх}} = \frac{h_{21}R_K}{h_{11}} \quad (15.3в)$$



15.6-сурет

РИС. 15.6

— $u_{нх}$ және $u_{вх}$ синусоидальқ кернеулерінің әсерлік мәндерінің қатынасына тең кернеудің (10-100) күшею коэффициенті.

(15.3) өрнектеріне ОЭ-лі күшейткіш каскадтың (15.6-сурет) кіріс және шығыс тізбектерін орналастырудың жалпылама схемасына сәйкес келеді, оны да энергия көзін орналастырудың екі схемасының эквиваленттілігімен (2.11-суретті қараңыз) алуға болады.

Каскадты жүктеме тізбегіне қосқан кезде сигнал көзі кернеуінің күшею коэффициенті мынаған тең болады:

$$K_u = \frac{U_n}{U_c} = \frac{h_{21} R_n R_K}{(R_{вт} + h_{11})(R_n + R_K)}, \quad (15.4)$$

мұндағы $U_c = (h_n + R_{вт})I_b$, $U_{ж} = h_n I_b R_{ж} R_K / (R_{ж} + R_K)$ және $I_b - u_c$, $u_{ж}$ синусоидальқ кернеулері мен i_b тогының әсерлік мәндері.

Бұл күшею коэффициенті күшейткіштің негізгі параметрі болып табылмайды, себебі сигнал мен жүктеме көзі тізбектерінің кедергісіне тәуелді болады.

ОЭ-лі күшейткіш каскадтың негізгі кемшілігі – кіріс кедергісінің төмен мәні. Бұл сигнал көзінің тогы мен шығын қуатын, сондай-ақ оның ішкі кедергісіндегі кернеудің төмендеуін ұлғайтады.

15.4-суреттегі алмастыру схемасына айнаымалы құраушы бойынша ОЭ-лі күшейткіш каскадтың шығыс тізбегінің сыртқы сипаттамасы сәйкес келеді (15.5. а суретін қараңыз, 2-түзу):

$$u_{кЭ} = -\frac{R_K R_n}{R_K + R_n} i_K. \quad (15.5)$$

Бұл ретте жүктеме тізбегіндегі ток мынаған тең.

$$i_n = -\frac{R_K}{R_n + R_K} i_K.$$

Тыныштық режимінің жұмыс нүктесінің орналасуы бойынша A , B және AB кластарындағы күшейткіштер болады.

A класында эмиттер мен базаның арасындағы p - n -өткел тура бағытта (тыныштық режимінің A жұмыс нүктесі 15.5, a , b суреттерінде) жылжыған және төмен сигнал режимінде күшейткіш барлық кернеулер мен токтар синусоидалық түрде өзгертін сызықтық тізбек болып есептеледі.

B класында эмиттер мен базаның арасындағы p - n -өткел (тыныштық режимінің B жұмыс нүктесі 15.5, b суретінде) оның шектік өткізгіштік кернеуінің аймағына жылжыған, сондықтан $u_{bx} = u_{бэ}$ синусоидалық сигналының күшеюі оның оң жарты период уақыт моментінде ғана болады.

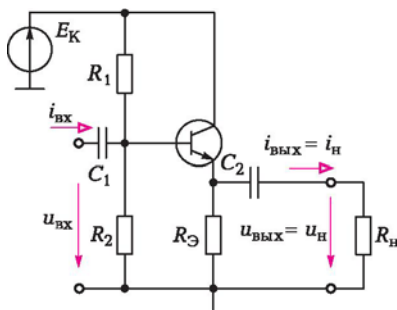
AB класында тыныштық режимінің « AB » жұмыс нүктесі A және B кластарындағы күшейткіштердің $I_B(U_{бэ})$ сипаттамасындағы оның орындарының арасындағы аралық орынды алады (15.5-сурет, b), сондықтан синусоидалық сигналдың оң (теріс) жарты периодының күшеюі осы сипаттаманың сызықтық $AB - A$ (сызықтық емес $AB - B$) бөлігінде болады.

A класының күшейткіштерінде токтың тұрақты құрауышы жоғары, B және AB кластарының күшейткіштерінде төмен болады. Сондықтан біріншісі көбінесе кернеу күшейткіштері ретінде, ал екіншісі ПЭК мәні біршама қуат күшейткіштері ретінде пайдаланылады (15.8-бөлімшені қараңыз). Бұл ретте синусоидалық сигналды күшейту үшін оны оң және теріс жарты периодтар уақыт моментінде күшейтеді де, нәтижелерін қосады.

(15.4) өрнектен K_u кернеуінің күшею коэффициентін ұлғайтуға және оның жүктеме тізбегінің кедергісіне тәуелділігін азайтуға арналған жағдайлардың қарама-қайшы екенін көруге болады. Күшейткіш каскадтың $R_{шығ} = R_K$ шығыс кедергісі неғұрлым жоғары болған сайын, кернеудің күшею коэффициентінің мәні де, оның жүктеме тізбегіне тәуелділігі де соғұрлым жоғары болады. Кернеудің күшею коэффициентін ұлғайтып, оның R_K кедергісіне тәуелділігін азайту үшін, ОЭ-лі күшейткіш каскад шығысы мен қабылдағыштың арасына кіріс және шығыс кедергілері жоғары келістіруші құрылғы қосу қажет. Мұндай құрылғының рөлін ОК-лы күшейткіш каскад атқара алады, ол сонымен қоса *эмиттерлік қайталағыш* деп аталады.

ОК-лы күшейткіш каскад. 15.7-суретте эмиттерлік қайталағыштың типтік схемасы келтірілген.

Күшейткіш каскадты алмастыру схемасынан (15.8-сурет), алдыңғы жолдағыдай, басқа резистивтік элементтермен салыстырғанда кедергілері жоғары $1/h_{22}$, R_1 және R_2 резистивтік



15.7-сурет

элементтерін алып тастап, $u_{\text{кпр}}$ кернеуін синусоидалық деп аламыз. Онда 1-контурға арналған Кирхгофтың екінші заңы бойынша $R_{\text{ж}} = \infty$ бос жүріс режиміндегі каскад кірісіндегі кернеу мынаған тең болады:

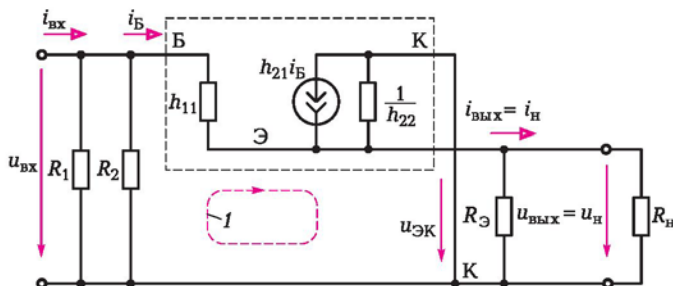
$$u_{\text{кпр}} = h_{11} i_{\text{б}} + U_{\text{ж.ж}} \quad (15.6)$$

мұндағы $U_{\text{ж.ж}} = (1 + h_{21})i_{\text{б}}R_{\text{Э}}$ — каскад шығысындағы кернеу; напряжение на выходе каскада; $i_{\text{б}} = i_{\text{кпр}}$ — каскад кірісіндегі ток.

(15.6) өрнектен ОК-лы күшейткіш каскадтың негізгі параметрлерін аламыз:

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{вх}} &= \frac{u_{\text{вх}}}{i_{\text{вх}}} = h_{11} + (1 + h_{21})R_{\text{Э}}; \\ K_{\text{вх}} &= \frac{u_{\text{вх}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{(1 + h_{21})R_{\text{Э}}}{h_{11} + (1 + h_{21})R_{\text{Э}}} \end{aligned} \right\} \quad (15.7)$$

— оның кіріс кедергісі (100-300 кОм) ОЭ-лі күшейткіш каскадтың кіріс кедергісінен едәуір жоғары және кернеудің күшею коэффициентін аламыз. Оның мәні бірлікке жақын (0,8-0,9), ал $u_{\text{кпр}}$ және $U_{\text{ж.ж}}$ кернеулері фаза бойынша сәйкес келеді. Бұл ОК-лы күш-



15.8-сурет

ейткіш каскадтың «қайталағыш» деген атауын білдіреді.

Эмиттерлік қайталағыштың шығыс кедергісі (10-50 Ом) ОЭ-лі күшейткіш каскадтың шығыс кедергісінен біршама аз.

ОБ-лы күшейткіш каскад. ОЭ-лі күшейткіш каскадпен салыстырғанда ОБ-лы күшейткіштің каскадтың кернеуінің күшею коэффициенті шамалас мәнде болған кезде, шекаралық жиілігінің мәндері жоғары болады. Алайда оның кіріс және шығыс кедергілері төмен. Осы себептерге байланысты ОБ-лы күшейткіш каскад сирек қолданылады.

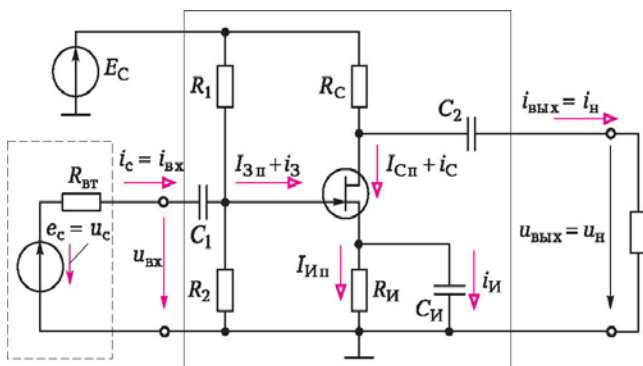
15.3.

ДАЛАЛЫҚ ТРАНЗИСТОРЛАРДАҒЫ КҮШЕЙТКІШ КАСКАДТАР

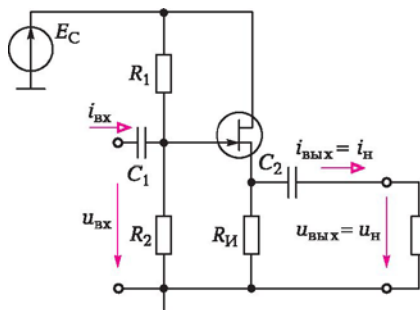
ОБ-лы, ОЭ-лі және ОК-лы биполярлық транзисторлардағы күшейткіш каскадтар сияқты, далалық транзисторлардағы күшейткіш каскадтардың үш типі болады: ортақ бекітпелі (ОЗ), ортақ бастаулы (ОИ) және ортақ ағынды (ОС). ОИ-лыкүшейткіш каскад басқаларына қарағанда жиі пайдаланылады.

ОИ-лы далалық транзисторлардағы күшейткіш каскад 15.9-суретте тұтас сызықпен белгіленген типтік схема бойынша іске асырылады.

Схеманың барлық элементтерінің міндеттері олардың ОЭ-лі биполярлық транзистордағы күшейткіш каскадтағы (15.2-суретті қараңыз) міндеттеріне ұқсайды, ал төмен сигнал режиміге 15.6-суреттегі жалпылама алмастыру схемасы сәйкес келеді.



15.9-сурет



15.10-сурет

ОЭ-лі биполярлық транзистордағы күшейткіш каскадпен салыстырғанда ОИ-лы далалық транзистордағы күшейткіш каскадтың негізгі артықшылығы – оларда шығыс кедергісінің (10–100 кОм) және бос жүріс режиміндегі кернеудің күшею коэффициентінің (10–100) мәндері шамалас болған жағдайда кіріс кедергісінің (10^2 – 10^3 кОм) мәні жоғары болады.

ОС-лы күшейткіш каскад (15.10-сурет) *бастаулы қайталағыш* деп те алады, ол функционалдық жағынан эмиттерлік қайталағышқа (15.7-суретті қараңыз) ұқсайды. Бастаулы қайталағыш кернеуінің күшею коэффициенті $K_{б.ж} = 0,8—0,9$ бірлікке жақын, шығыс кедергісі $R_{шығ} = 10—50$ Ом, ал кіріс кедергісі $R_{кір} = 1—10^3$ МОм.

ОЗ-лы күшейткіш каскадтар электроника құрылғыларында мүлдем қолданылмайды.

Энергия қабылдағыш ретінде күшейткіш каскадтың шығысына тағы бір күшейткіш каскад қосылуы мүмкін. Мұндай каскадтардың жиынтығы *көп каскадтық күшейткіш* құрайды.

Төмен және жоғары жиілікті, сондай-ақ кең жолақты және тар жолақты күшейткіштерде каскадтардың арасындағы электрлік байланыс конденсаторлармен, ал тұрақты ток күшейткіштерінде резисторлармен не тікелей байланыстармен жүзеге асырылады. Соңғы жағдайда тұрақсыздандырушы факторлардың, әдетте температураның әсерінен транзистор параметрлерінің тұрақсыздығына байланысты бір каскадтың шығысындағы тұрақты кернеудің кез келген өзгерістері басқа каскадтардың жұмыс режиміне әсер етеді, бұл көп каскадтық күшейткіштің шығысында тіпті күшейткіш сигнал жоқ болса да, кернеудің өзгеруіне әкеледі. Бұл құбылыс *нөл дрейфі* деп аталады.

Нөл дрейфін азайтуға және басқа пайдалы сапалар алуға дифференциалды күшейткіш каскадтар мүмкіндік береді.

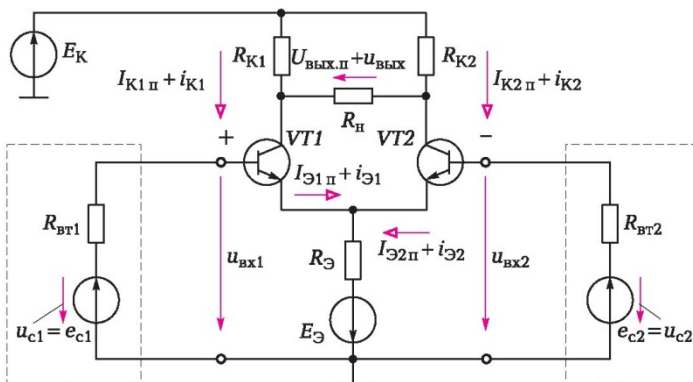
Иіндері $R_{K1} = R_{K2}$ резисторларымен және эмиттерлері біріктірілген бір типті $VT1$ және $VT2$ биполярлық транзисторларымен құрылған тұрақты ток көпірі негізіндегі дифференциалды күшейткіш каскадтың (15.11-сурет) схемасы ең кең таралған.

Көпірдің тиімді теңгерімі үшін транзисторларды бір кристалда бірыңғай технология бойынша дайындайды, сондықтан олардың параметрлері 1-5%-ға өзгешеленеді. Екі сигнал көзі бейсимметриялық кірістер деп аталатын транзисторлар базаларының тізбегіне қосылады, ал жүктеме кедергісі $R_{ж}$ қабылдағыш транзисторлардың коллекторларының арасына қосылады (*симметриялық шығыс*).

Каскадтың тыныштық режимі $u_{к1p1} = u_{к1p2} = 0$ кернеулерде немесе кірістердің қысқа тұйықталуымен кернеуді анықтайды:

$$U_{БЭТ} = E_{Э} - R_{Э} (I_{Э1T} + I_{Э1T}) > 0,$$

ол екі транзистор үшін де бірдей болады. Сондықтан олардың жұмыс режимдері аса өзгешеленбейді. Мұндай каскадта тыныш режимін тұрақтандыру жүзеге асырылады. Егер тұрақсыздандырғыш факторлардың, мысалы қызудың, әсерінен коллекторлардың I_{K1T} , I_{K2T} және эмиттерлердің $I_{Э1T}$, $I_{Э2T}$ токтары өссе, онда $U_{БЭТ}$ кернеуі азаяды, эмиттерлік өткелдер аз ток өткізетін болады; нәтижесінде шығыстағы I_{K1T} , I_{K2T} токтары мен тыныштық



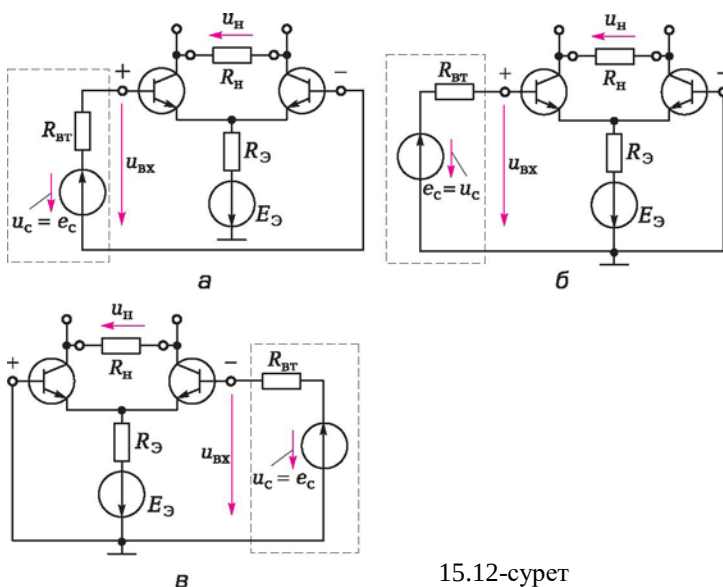
15.11-сурет

кернеуі тұрақтанады:

$$U_{\text{шығ.т}} = R_{K1} I_{K1T} - R_{K2} I_{K2T} \quad (15.8)$$

(15.8) формуласынан каскадтың аттас иіндеріндегі кез келген бірдей өзгерістердің $U_{\text{шығ.т}}$ кернеуінің өзгерістерін, яғни нөл дрейфін тудырмайтыны көрініп тұр. Нағыз каскадтарда элементтердің толық симметриясы болмайды, алайда дифференциалды күшейткіш каскадтағы $U_{\text{шығ.т}}$ кернеуінің дрейфі биполярлық (15.2-суретті қараңыз) және далалық (15.9-суретті қараңыз) транзисторлардағы күшейткіш каскадтармен салыстырғанда бірнеше мәрте төмендейді. Дифференциалды күшейткіш каскад әртүрлі режимде жұмыс жасайды.

Бір көз сигналының күшеюі. Сигнал көзі симметриялы (15.12-сурет) немесе бейсимметриялық (15.12-сурет, б және в) қосылады. 15.12, б суретіндегі схемада күшейткіш каскадтың шығысындағы $u_{\text{шығ}} = u_{\text{ж}}$ және кірісіндегі $u_{\text{кір}}$ кернеулерінің фазалары сәйкес келетінін ($u_{\text{шығ}} > 0, u_{\text{ж}} > 0$; $u_{\text{шығ}} < 0, u_{\text{ж}} < 0$), ал 15.12, в суретіндегі схемада қарама-қайшы екенін ($u_{\text{шығ}} > 0, u_{\text{ж}} < 0$; $u_{\text{шығ}} < 0, u_{\text{ж}} > 0$) атап өтеміз. Күшейткіштің тиісті кірістері *терістемейтін* және *терістейтін* деп аталады және олар схемада плюс, минус белгілерімен белгіленеді.



15.12-сурет

Тәуелсіз сигнал көздерінің екі кіріске қосылуы. Екі сигнал көзін, яғни тізбектің ортақ түйініне қатысты қарама-қарсы және бірдей полярлылықтағы көздерді фазаға қарсы және синфазалық қосу болады.

15.11-суреттегі $u_{c1} > 0$ және $u_{c2} < 0$ фазаға қарсы қосу (немесе керісінше) кезінде VT1 транзисторының базасы мен коллекторының токтары артады, ал VT2 транзисторында сол мәндерге азаяды (немесе керісінше). Сонымен қатар сәйкес транзисторларда коллекторлардың электрлік потенциалдары азаяды және ұлғаяды (немесе керісінше), олардың айырымы күшейткіш каскадтың шығысындағы кернеуді білдіреді.

$u_{c1} = u_{c2}$ тең мәндегі синфазалық сигналдардың әсері транзисторлардың жұмыс режимдерінің бірдей өзгеруіне сәйкес келеді. Бұл ретте (15.8) формула бойынша иіндері идеалды симметриялы күшейткіш каскадтың шығысында кернеу өзгерістері болмайды. Бұл өте маңызды, себебі синфазалық сигналдар әртүрлі тектегі бөгеуілдерден (атмосфералық, желілік және т.б.) тұрады.

Терістемейтін $u_{к1р1} = u_{ни}$ және терістейтін $u_{к1р2} = u_{ни}$ кірістердегі кернеулердің, терістемейтін және терістейтін кірістердің арасындағы потенциалдар айырымына тең, айырымын күшейту қабілеті:

$$u_{к1р} = u_{ни} - u_{и} = v_{ни} - v_{и},$$

күшейткіш каскадтың «дифференциалды» деген атауын білдіреді.

Дифференциалды күшейткіш каскадта биполярлық транзисторлардың орнына далалық транзисторлар қолданылуы мүмкін.

Биполярлық және далалық транзисторлардағы дифференциалды күшейткіш каскадтардың негізгі параметрлерінің мәндері сәйкесінше ОЭ-лі және ОИ-лы каскадтардағы сияқты тәртіпте болады.

Дифференциалды күшейткіш каскадтардың негізгі артықшылықтары – синфазалық бөгеуілдерге төзімділік және төмен нөл дрейфі $-1 \text{ — } 10 \text{ мкВ/}^{\circ}\text{С}$ дейін, бұл тұрақты токтың теңгерімді күшейткіштерінде нөл дрейфінен 20-100 есеге төмен. Осы себепке байланысты дифференциалды күшейткіш каскадтар, көбінесе, операциялық күшейткіштердің кіріс каскадтарды ретінде қолданылады.

15.5. ОПЕРАЦИЯЛЫҚ КҮШЕЙТКІШТЕР

Операциялық күшейткіштер (ОК) тұрақты ток күшейткіштерінің

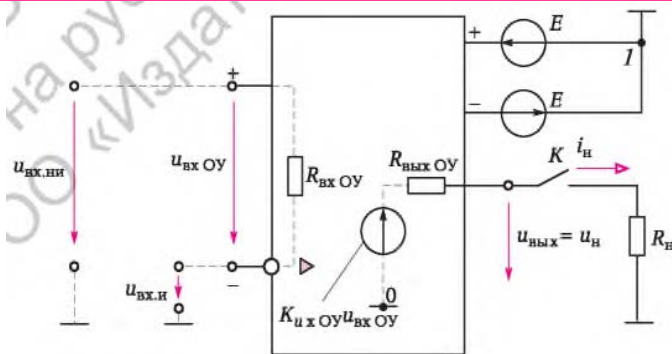
(15.1, *a* суретін қараңыз) бір түрі болып есептеледі. Бұл типтегі «операциялық» күшейткіштердің атауы олардың бастапқыда көбінесе аналогты шамаларға қатысты математикалық операцияларды (қосу, азайту, интегралдар және т.б.) орындау үшін қолданылғанына байланысты берілген. Қазіргі уақытта ОК әртүрлі функционалдық мақсаттағы электрондық құрылғыларды (кернеу стабилизаторларын, әртүрлі формадағы сигнал генераторларын) құрастыру кезінде қолданылады. Операциялық күшейткіштер тікелей байланыстары бар көп каскадтық болып жасалады. ОК кірісінде нөл дрейфін азайту үшін тұрақты тоқтың дифференциалды күшейткіш каскады (далалық транзисторларда және кіріс кедергісін ұлғайту үшін), одан кейін қажетті күшейтуді алу үшін аралық күшейткіш каскадтар қосылады және шығыста шығыс кедергісін азайту үшін кернеу қайталағыш қосылады. ОК әзірлеу – күрделі проблема. Алайда бұл оларды практикада қолдануды қиындатпайды, себебі олар интегралдық схемалар түрінде дайындалады.

Нақты операциялық күшейткіш. *Төмен сигнал режимінде* ОК-ң кіріс және шығыс тізбектері 15.13-суреттегі алмастыру схемасымен ұсынылады, оның элементтері ОК-ң *негізгі параметрлерін* көрсетеді:

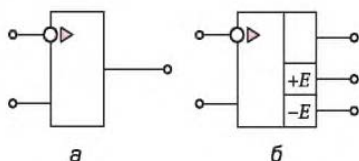
$$R_{\text{ОКкіріс}} = 10^4 - 10^{10} \text{ Ом} \quad (15.9)$$

— кіріс кедергісі;

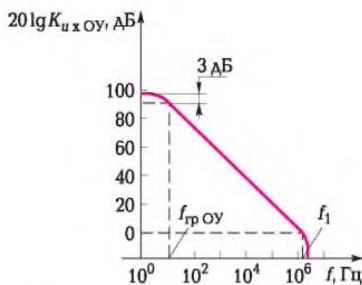
$$R_{\text{ОКшығыс}} = 10 - 50 \text{ Ом} \quad (15.9a)$$



15.13-сурет



15.14-сурет



15.15-сурет

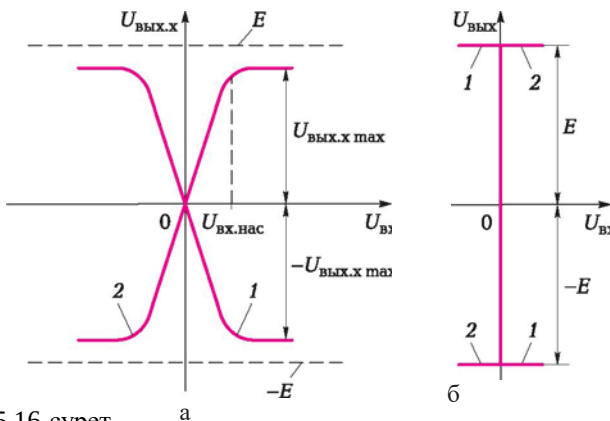
— шығыс кедергісі;

$$K_{\text{иХОК}} = U_{\text{шығ.ж}} / U_{\text{ОКкір}}. \quad (15.96)$$

— бос жүріс режиміндегі ОК шығысы мен кірісіндегі синусоидальк кернеулердің әсерлік мәндерінің қатынасына тең кернейдің күшею коэффициенті ($R_{\text{ж}} = \infty$).

0 нөлдік потенциалды түйін ОК шығыс тізбегін алмастыру схемасында қуаттау тізбегінің 1 эквипотенциалдық нүктесіне сәйкес келеді. 15.14, а және б суреттерінде ОК-ң шартты белгілері келтірілген, оларда терістейтін кіріс шеңбермен белгіленген.

ОК-ң күшейткіш қасиеттерін оның жүктеме тізбегі ажыратулы болған кездегі жиіліктік және табыстама сипаттамалары айқындайды.



15.16-сурет

ОК-ң *логарифмалық амплитудалық-жиіліктік сипаттамасы* (15.15-сурет) биполярлық транзистордың ЛАЖС-ына (13.14-суретті қараңыз) ұқсайды. Соңғысы сияқты операциялық күшейткіштің ЛАЖС-ында $f_{шк.ОК}$ *шекаралық жиілігін* бөледі, онда ОК кернеуінің күшею коэффициентін оның нөлдік жиіліктегі мәнімен салыстырғанда:

$$K_{и.хОК}(0) = 10^4 — 10^5 \quad (15.10)$$

$\sqrt{2}$ -ге немесе 0,707 есеге азаяды, ал $20 \lg K_{и.хОК}$ шамасы — $20 \lg \sqrt{2} = 3$ дБ-ға азаяды, сондай-ақ f_1 *бірлік күшею жиілігін* бөледі, онда ОК кернеуінің күшею коэффициенті: $K_{и.хОК} = 1$.

ОК-ң табыстама сипаттамаларын оның шығысындағы кернеудің жүктеме тізбегі ажыратылған кездегі тұрақты ток режиміндегі $U_{кпр.ни} = 0$ кезіндегі $U_{шығ.ж} (U_{кпр.и})$ терістейтін және $U_{кпр.и} = 0$ кезіндегі $U_{шығ.ж} (U_{кпр.ни})$ терістемейтін кірістеріндегі кернеулерге тәуелділігі анықтайды (15.16-сурет, а, 1 және 2-тәуелділіктер).

15.2-кесте. Операциялық күшейткіштердің кейбір типтерінің параметрлері

Параметр	Операциялық күшейткіштің типі			
	К140УД6	К140УД7	К140УА17	К140УД8
$\pm E$, В	± 15	± 15	± 15	± 15
$I_{ку}$, мА	3	2,8	5	5
$I_{кпрОК}$, нА, көп емес	50	400	10	0,2
$\Delta I_{кпрОК}$, нА, көп емес	15	200	5	0,1
$R_{ж}$, кОм, аз емес	1	2	2	2
$U_{шығ.ж тах}$, В	± 12	$\pm 10,5$	12	10
f_1 , МГц	1	0,8	0,4	1
$K_{ос.сф}$, дБ	70	70	100	70
$K_{ахОК}(0)$, аз емес	30 000	30000	200 000	50 000
$U_{см}$, мВ, көп емес	± 8	± 9	$\pm 0,25$	± 50
$R_{ахОК}$, МОм, аз емес	1	0,4	30	10

Қуаттау көзінің ЭҚК-ң $E = 10$ В типтік мәні үшін (15.10) өрнегін ескере отырып, шығыс каскадты транзистордың қанығуы $U_{\text{к.кан}} = E/K_{\text{ухОК}}(0) = \pm(0,1 - 1)$ мВ кезінде жүзеге асады. $U_{\text{к.р}}$ кернеуінің одан әрі ұлғаюы шығыстағы кернеу өзгерісін тудырмайды.

Бос жүріс режиміндегі $K_{\text{ухОК}}(0)$ нөлдік жиіліктегі ОК кернеуінің күшею коэффициентінің, f_1 бірлік күшею жиілігінің, номиналды қуаттау кернеуіндегі ОК шығысындағы максималды тұрақты $U_{\text{шығ.мах}}$ кернеуінің және $R_{\text{к.р.ОК}}$ кіріс кедегісінің мәндері анықтамалықтарда көрсетіледі.

Анықтамалықтарда тізілген мәндерден басқа ОК-ң басқа да параметрлерінің мәндері көрсетіледі (15.2-кесте):

- шығыстағы кернеу нөлге тең кезде $U_{\text{к.р}}$ кірістегі ең жоғары тұрақты жылжу кернеуі;
- $I_{\text{к.р.ОК}}$ терістемейтін және терістейтін кірістер бойынша тұрақты ток және осы токтардың айырымы $\Delta I_{\text{к.р.ОК}}$;
- $K_{\text{ос.сф}}$ синфазалық кернеулердің бәсеңсу коэффициенті;
- $\pm E$ номиналды кернеу мен $I_{\text{к.у}}$ қуаттау тогы;
- $R_{\text{ж}}$ жүктеме тідбегінің минималды рұқсат етілген кедергісі.

Идеалды операциялық күшейткіш. $U_{\text{к.кан}}$ қанығу кернеуінің төмен мәндерін елемей, *идеалды ОК* ұғымын енгіземіз, оның бос жүріс режиміндегі кернеуінің күшею коэффициенті, кіріс және шығыс кедергілері жиілікке тәуелді болады және мына мәндерден тұрады:

$$\boxed{K_{\text{ухОУ}} \rightarrow \infty; \quad R_{\text{вхОУ}} \rightarrow \infty; \quad R_{\text{выхОУ}} = 0,} \quad (15.11a)$$

яғни, терістемейтін және терістейтін кірістердің арасындағы потенциалдардың айырымына тең кернеу және сигналдар күшеюінің *сызықтық* режиміндегі идеалды ОК кірісіндегі ток нөлге тең:

$$\boxed{u_{\text{вхОУ}} = v_{\text{ин}} - v_{\text{и}} = u_{\text{вых}}/K_{\text{ухОУ}} = 0; \quad i_{\text{вхОУ}} = u_{\text{вхОУ}}/R_{\text{вхОУ}} = 0,} \quad (15.11b)$$

ал оның терістемейтін және терістейтін кірістер бойынша табыстама сипаттамалары $R_{\text{ж}} > 0$ жүктеме тізбегінің кез келген кедергісінде 15.16, б суретіндегі 1 және 2-сынық сызықтар сияқты болады.

Идеалды ОК-ң қанығу режимінде, яғни *сызықтық емес* режимде $u_{\text{к.р.ОК}} \neq 0$, ал ток $i_{\text{к.р.ОК}} = 0$.

Бұдан әрі ОК кірісіндегі кернеу астындағы электрондық құрылғыларды талдау кезінде $u_{\text{к.р.ОК}} = v_{\text{ин}} - v_{\text{и}}$, және $u_{\text{к.р.ОК}} = v_{\text{и}} - v_{\text{ни}}$, схемаларда кернеудің оң бағытын нұсқармен көрсете отырып түсінетін боламыз.

Егер ОК сигналдар күшеюінің сызықтық режимінде қолданылса,

онда оны 15.14, *а* суретіндегі шартты белгімен пайдаланамыз, ал егер сызықтық емес режимде қолданылса, онда 15.14, *б* белгімен пайдаланамыз. 15.14. *б* суретінде қанығу режиміндегі идеалды ОК шығысындағы кернеулер мен E немесе $-E$ қуаттау көздерінің тепе-теңдігін түсіндіреді.

15.6. КҮШЕЙТКІШТЕРДЕГІ КЕРІ БАЙЛАНЫС

Күшейткіштегі *кері байланыс* (КБ) деп энергия бөлігін шығысынан кірісіне беруді айтады.

Кері байланыс күшейткіштің күшею коэффициентін азайтса *теріс* болады, кері жағдайда *оң* болады.

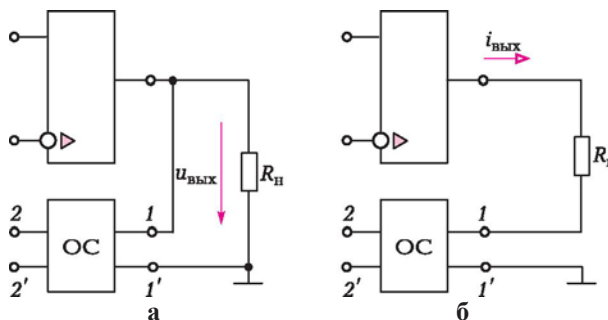
Кері байланыстар мақсатты құрылса *пайдалы*, өздігінен туындаса *паразитті* (зиянды) болады.

Орналасу орны бойынша кері байланыстар күшейткіш каскад тізбегінің ішінде жүзеге асырылған жағдайда *ішкі* және олардың тізбектері күшейткіш каскадты сырттан қамтыған жағдайда *сыртқы* болуы мүмкін.

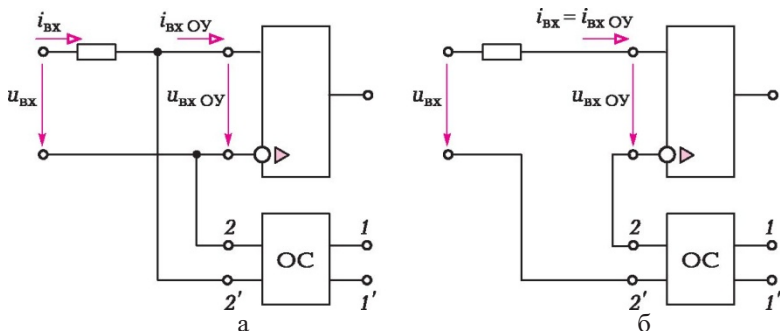
Жалпы сыртқы КБ тізбегі өз шықпаларымен ОК-ң шығыс және кіріс тізбектеріне қосылатын пассивті төрт полюсті құрылым болып есептеледі.

КБ төрт полюсті құрылымының $1 — 1'$ кіріс шықпаларының қосылу тәсілі бойынша кері байланыс *кернеу* бойынша және *ток* бойынша деп бөлінеді (15.17-сурет, *а* және *б*), оның $2 — 2'$ шығыс шықпаларының қосылу тәсілі бойынша *параллель* және *тізбектей* болып бөлінеді (15.18-сурет, *а* және *б*).

Жалпы кері байланысты күшейткіштегі кернеу мен ток және ОК кірісіндегі аттас шамалар сәйкес келмейтінін атап өтеміз.



15.17-сурет



15.18-сурет

Оң КБ күшейткіштерде мүлдем қолданылмайды, бірақ әртүрлі тектегі синусоидалық тербеліс автогенераторлары (15.9-суретті қараңыз) мен регенеративтік құрылғылар (15.6-суретті қараңыз) жұмысының негізінде жатыр.

Теріс КБ күшейткіштерде өте кеңінен пайдаланылады. Ол әртүрлі функционалдық мақсаттағы құрылғыларды құруға мүмкіндік береді, сондай-ақ күшейткіштердің параметрлерін жақсартады: шығыс кедергісінің мәнін азайтады, $f_{\text{шек}}$ шекаралық жиілігінің мәнін, сәйкесінше, сигналдар күшеюінің $0 \leq f \leq f_{\text{шек}}$ жиіліктер жолағын ұлғайтады, шығыстағы кернеудің сызықтық емес бұрмалануын және күшейткіш параметрлері мәндерінің тұрақсыздандырғыш факторларға (әдетте температураға) тәуелділігін азайтады.

Теріс кері байланыстың пайдалы қасиеттеріне күшейткіш кернеуінің күшею коэффициентінің мәндерін азайту арқылы жетеді. Алайда, бұл айтарлықтай маңызға ие емес, себебі ОК кернеуінің меншікті күшею коэффициенті өте жоғары болып табылады (15.10).

15.7. ТЕРІС КЕРІ БАЙЛАНЫСТЫ КҮШЕЙТКІШТЕР

ОК негізіндегі теріс кері байланысты күшейткіштердің мысалдарын, оларды идеалды деп алып, қарастырамыз (15.11).

Терістемейтін күшейткіш. Терістемейтін күшейткіште (15.19-сурет) кернеу бойынша тізбектей теріс КБ пайдаланылады. Бұдан әрі кері байланыстың төрт полюсті құрылымының орнына күшейткіштер схемаларында оны алмастыру схемаларының эле-

менттерін ғана көрсететін боламыз.

Кирхгофтың 1-контурға арналған екінші заңы бойынша теңдеуден:

$$u_{\text{о.с}} - u_{\text{о.с}} = u_{\text{вх}} \ominus u = 0,$$

мұндағы кернеу

$$u_{\text{о.с}} = \frac{R_1}{R_1 + R_{\text{о.с}}} u_{\text{вх}}$$

тізбектей теріс кері байланысты сипаттайды, терістемейтін күшейткіштің кірісі мен шығысындағы кернеулердің арасындағы

$$u_{\text{вх}} = \frac{R_1 + R_{\text{о.с}}}{R_1} u_{\text{вх}}. \quad (15.12)$$

қатынас шығады:

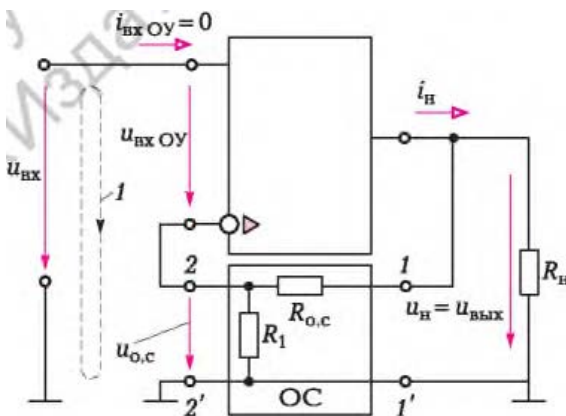
Терістемейтін күшейткіштің кірісі мен шығысындағы кернеулердің полярлылығы сәйкес келеді, ал кернеудің күшею коэффициенті мынаған тең:

$$K_u = \frac{R_1 + R_{\text{о.с}}}{R_1}. \quad (15.13)$$

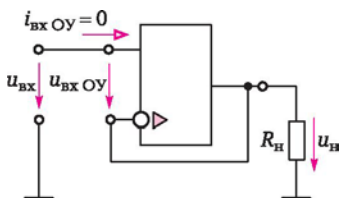
Идеалды ОК негізіндегі терістемейтін күшейткіштің кіріс және шығыс кедергілері мынаған тең:

$$\left. \begin{array}{l} R_{\text{вх}} = 0, \\ R_{\text{вх}} = \infty. \end{array} \right\} \quad (15.14)$$

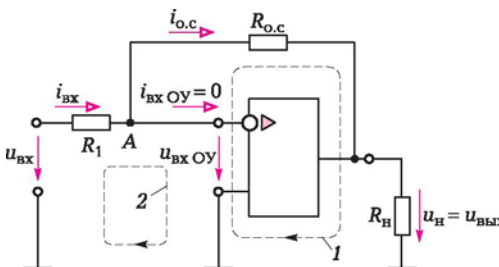
Кернеу қайталағышы. $R_1 \gg R_{\text{о.с}}$ шартын орындаған жағдайда (15.13) терістемейтін күшейткіш кернеуінің күшею коэффициентінің мәні бірлікке жақындайды. Шекті жағдайда ($R_1 \rightarrow \infty$; $R_{\text{о.с}} \rightarrow 0$) терістемейтін күшейткіш $u_{\text{н}} = u_{\text{кп}}$ кернеу қайталағышына түрленеді.



15.19-сурет



15.20-сурет



15.21-сурет

Терістейтін күшейткіш. Терістейтін күшейткіште кернеу бойынша параллель теріс кері байланыс пайдаланылады, ал сигнал көзі мен R_1 және $R_{\text{о.с}}$ кедергілі кері байланыстың тізбектері операциялық күшейткіштің терістейтін кірісіне қосылады (15.21-сурет).

Кирхгофтың бірінші (A түйініне арналған) және екінші (1 және 2-контурларға арналған) заңдары бойынша теңдеулер жүйесін құрастырамыз:

$$\left. \begin{aligned} i_{\text{к.б}} - i_{\text{к.р}} &= i_{\text{к.р.ОК}} = 0; \\ R_{\text{к.б}} i_{\text{к.б}} + u_{\text{н}} &= u_{\text{к.р.ОК}} = 0; \\ u_{\text{к.р}} - R_1 i_{\text{к.р}} &= u_{\text{к.р.ОК}} = 0; \end{aligned} \right\} \quad (15.15)$$

мұндағы $i_{\text{к.б}}$, $i_{\text{к.р}}$, $i_{\text{к.р.ОК}}$ — кері байланыс тізбегіндегі, терістейтін күшейткіш кірісіндегі және ОК кірісіндегі ток.

(15.15) теңдеулер жүйесінен терістейтін күшейткіштің кірісі мен шығысындағы кернеулердің арасындағы қатынас және оның кіріс кедергісі шығады:

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{вых}} &= -\frac{R_{\text{о.с}}}{R_1} u_{\text{вх}}; \\ R_{\text{вх}} &= u_{\text{вх}} / i_{\text{вх}} = R_1. \end{aligned} \right\} \quad (15.16)$$

Терістейтін күшейткіштің кірісі мен шығысындағы кернеулер әртүрлі полярлылыққа ие, ал олардың абсолюттік мәндерінің қатынасы кернеудің күшею коэффициентін анықтайды:

$$K_u = \frac{R_{\text{о.с}}}{R_1}. \quad (15.17)$$

Терістейтін күшейткіштің шығыс кедергісі терістемейтін күшейткіштегі сияқты (15.14) төмен.

Таңдаушы күшейткіш. Таңдаушы күшейткіште (15.22-сурет, а) кернеу бойынша параллель теріс кері байланыстың тізбегі резонанстық бөгеуіш сүзгіден тұрады (4.42, а суретін қараңыз). $u_{\text{кiр}}$ синусоидалық кернеуінде күшейткішті есептеу үшін кешенді әдісті қолданамыз.

Токтың тұрақты және айнымалы құраушыларын бөлу үшін кері байланыс тізбегіне C_1 жоғары сыйымдылықты конденсатор қосылған, оның X_{C1} кедергісін елемеге болады.

(15.16) теңдеудегі $u_{\text{кiр}}$ және $u_{\text{шығ}}$ кернеулерін кешенді $\dot{U}_{\text{кiр}}$ және $\dot{U}_{\text{шығ}}$ кернеулерімен, ал $R_{\text{к.б.}}$ теріс кері байланыс кедергісін бөгеуіш сүзгінің кешенді кедергісімен алмастырып:

$$\underline{Z} = \frac{jX_L(-jX_C)}{jX_L - jX_C} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC}$$

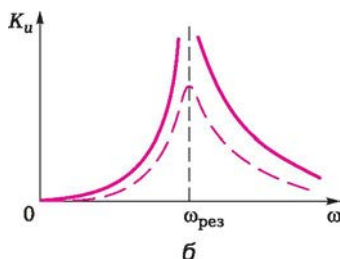
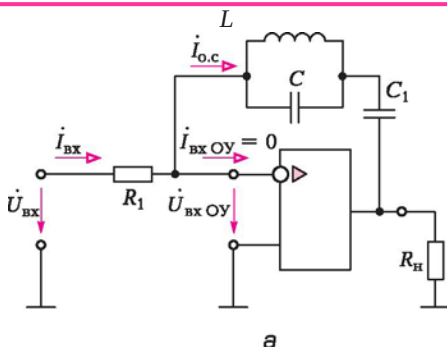
таңдаушы күшейткіш кернеуі күшеюінің кешенді коэффициентін:

$$\underline{K}_u = K_u(\omega) e^{j\theta_u(\omega)} = \frac{\dot{U}_{\text{ш}}}{\dot{U}_{\text{вх}}} = -\frac{\underline{Z}}{R} = \frac{-j\omega L}{(1 - \omega^2 LC)R_1}$$

және оның амплитудалық-жиіліктік сипаттамасын табамыз:

$$K_u(\omega) = \frac{\omega L}{|(1 - \omega^2 LC)R_1|} \quad (15.18)$$

Резонанстық бұрыштық $\omega_{\text{рез}} = 1/\sqrt{LC}$ жиілігінде (15.22, б суретінде — үздіксіз сызық) кернеудің күшею коэффициентінің мәні $K_u \rightarrow \infty$. Нақты резонанстық бөгеуіш сүзгідегі энергия шығынын ескеретін болсақ, таңдаушы күшейткіштің АЖС-ы идеалды күшейткіштен өзгешеленетін болады (15.22, б суретінде — штрих сызық).



15.22-сурет

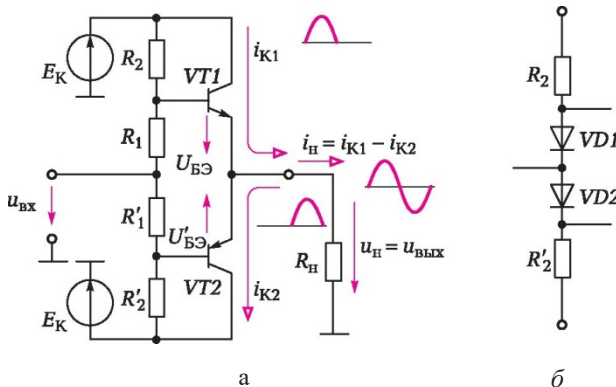
Кері байланыс тізбегінде бөгеуіш RC -сүзгісін пайдалану (4.43, *a* суретін қараңыз) балама нәтижелерге әкеледі. Алайда RC -сүзгілері практикада қолданғанға жеңіл, сондықтан көп жағдайда резонанстық бөгеуіштерге қарағанда дұрысырақ болады. Мұндай ОК негізіндегі сүзгілерді *активті RC -сүзгілер* деп атайды.

15.8. ҚУАТ КҮШЕЙТКІШТЕР

Қуат күшейткіш әдетте сигнал күшейткіш тізбегіндегі соңғы каскад болып табылады. Оның шығысына жоғары қуатты қабылдағыш қосылады. Сондықтан қуат күшейткіштің маңызды параметрлерінің бірі оның ПӘК-і болып табылады.

Синусоидалық және басқа да қос полярлық сигналдарды күшейту үшін ең жоғары ПӘК-ке қос тактілі қуат күшейткіш ие, оның төмен шығыс кедергілі эмиттерлік қайталағыштар (15.2-бөлімшені қараңыз) негізіндегі типтік схемасы 15.23, *a* суретінде келтірілген. R_1 және R'_1 резисторларындағы кернеулердің тұрақты құраушылары B және AB кластарындағы эмиттерлік қайталағыштардың (15.5-сурет, *б*) жұмысы үшін қажетті транзисторлардың эмиттерлері мен базаларының арасындағы p - n -өткелдердің жылжуын қамтамасыз етеді. Бұл ретте қуат күшейткіштің ПӘК-і мынаған тең:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{Е}}} 100 \leq 78,5 \%,$$



15.23-сурет

мұндағы $P_E = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_K I_{K.m} \sin \omega t d\omega t = 2E_K I_{K.m} / \pi$ и $P_H = \frac{I_{H.m} U_{H.m}}{2}$ — тұрақты

E_K ЭҚК екі қуаттау көзінің және $I_{H.m} < I_{K.m}$ және $U_{H.m} < E_K$ кезіндегі жүктеме тізбегінің қуаты, ал шығыстағы кернеу $u_H = u_{шығ} = R_H(i_{K1} - i_{K2})$ формасы жағынан кірістегі синусоидалық кернеуге жақын.

Температураның өзгеруі транзисторлардың эмиттерлері мен базаларының арасындағы өткелдің шектік өткізгіштік кернеуінің мәні өзгертеді, бұл олардың үйлесімді жұмысын бұзады. Бұл құбылысты жою үшін R_1 және R'_1 резисторларының орнына шектік өткізгіштік кернеуі (13.5-суретті қараңыз) сол температуралық коэффициентке ие, тура бағытта жылжыған диодтарды қосады (15.23, б суретін қараңыз).

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Биполярлық транзисторлардағы күшейткіш каскадтардың үш негізгі типін атаңыз.
2. A және B кластарындағы күшейткіштердің негізгі айырмашылықтары неде?
3. Далалық транзисторлардағы күшейткіш каскадтардың үш негізгі типін атаңыз.
4. Тұрақты токтың күшейткіш дифференциалды каскады неге электрлік бөгеуілдерді (атмосфералық, желілік және т.б.) күшейтпейді?
5. Операциялық күшейткіштердің кіріс және шығыс кедергілері мен кернеу күшею коэффициенті мәндерінің тәртібі қандай?
6. Идеалды операциялық күшейткіштің қасиеттерін атаңыз.

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. Терістемейтін күшейткіштің (15.19-суретті қараңыз) кернеуінің күшею коэффициенті $R_L = 1,5$ кОм кедергісінде $K_u = 50$ -ге теңесу үшін оның кері байланыс тізбегінің $R_{к.б.}$ кедергісі қандай болуы тиіс?

Жауабы: 74,5 кОм.

2. Терістейтін күшейткіштің (15.21-суретті қараңыз) кіріс кедергісі элемент параметрлерінің мынадай мәндерінде неге тең: $R_1 = 1$ кОм, $R_{к.б.} = 10$ кОм, $R_H = 2$ кОм, ОК идеал?

Жауабы: 1 кОм.

ЭЛЕКТРОНДЫҚ ГЕНЕРАТОРЛАР ЖӘНЕ ИМПУЛЬСТІ ҚҰРЫЛҒЫЛАР

16.1. СИНУСОИДАЛЫҚ ТЕРБЕЛІСТЕР ГЕНЕРАТОРЛАРЫ

Синусоидалық тербелістер генераторлары тұрақты токтағы электр энергиясын қажетті жиіліктегі синусоидалық токтағы электр энергиясына түрлендіреді. Генераторлар өздігінен қозатын (автогенераторлар) және тәуелсіз қозатын генераторлар болып бөлінеді. Соңғысы төмен қуатты автогенераторлардың сигналдарын күшейтетін қуат күшейткіштері болып есептеледі.

Автогенераторларды оң кері байланысты күшейткіштер ретінде қарауға болады. Кернеу бойынша кері байланыс ең жиі қолданылады (16.1-сурет). Автогенератор жұмысының белгіленген режимін талдау үшін кешенді әдісті пайдаланамыз.

Автогенератор шығысындағы және кері байланыс тізбегінің төрт полюсті құрылымының кірісіндегі кернеулер бірдей $\dot{U}_{\text{шығ}} = \dot{U}_{\text{к.б.кір}}$ және мына шартты қанағаттандырады:

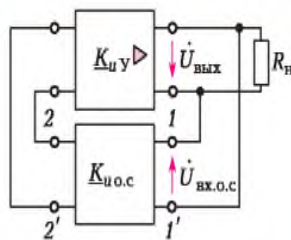
$$\dot{U}_{\text{шығ}} = \underline{K}_{uy} \underline{K}_{uk.б.} \dot{U}_{\text{к.б.кір}} \quad 16.1$$

мұндағы $\underline{K}_{uy} = K_{uy}(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$ — күшейткіш кернеуі күшеюінің кешенді коэффициенті; $\underline{K}_{uk.б.} = K_{uk.б.}(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$ — кері байланыстың төрт полюсті құрылымы кернеуінің кешенді беріліс коэффициенті (4.48).

(16.1) формуладан

$$\underline{K}_{uy} \underline{K}_{uk.б.} = K_{uy}(\omega) = \underline{K}_{uk.б.}(\omega) e^{j\varphi(\omega) + j\varphi(\omega)}$$

=1 шығады, яғни:



16.1-сурет

$$\left. \begin{array}{l} K_{uy}(\omega)K_{uo,c}(\omega) = 1; \\ \theta'(\omega) + \theta''(\omega) = 2\pi n, \end{array} \right\} \quad (16.2)$$

мұндағы $n = 0, 1, 3, \dots$

(16.2) шарттары автогенератор жұмысының ω бұрыштық жиілігінде орындалуы тиіс.

Генератордың энергия көзіне қосылған кезінен бастап өздігінен қозуы $K_{uy}(\omega)K_{uo,c}(\omega) > 1$ шартымен анықталады, ол өтпелі процесс аяқталғаннан кейін, транзисторлардың (15.16-суретті қараңыз) сызықтық емес қасиеттерімен байланысты синусоидалық тербелістер амплитудасының ұлғаю жағдайында K_{uy} мәнінің азаю салдарынан (16.2) автогенератордың белгіленген жұмыс режимінің жағдайына өтеді.

LC- және RC-автогенераторлары болады. Біріншісінің оң кері байланыс тізбектерінде индуктивтілік катушкалары мен конденсаторлар, екіншісінде резисторлар мен конденсаторлар болады. Екіншісі интегралдық схема түрінде іске асырғанға жеңіл.

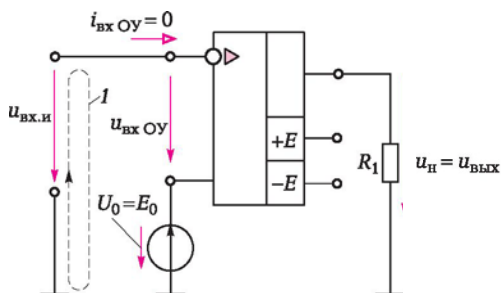
16.2. ОПЕРАЦИЯЛЫҚ КҮШЕЙТКІШТІҢ СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҰМЫС РЕЖИМІ. КОМПАРАТОР

Сызықтық емес режимдегі ОК жұмысын тізбек (16.2-сурет) мысалында түсіндіреміз, онда ОК терістемейтін кірісіндегі кернеу тұрақты E_0 ЭҚК көзін анықтайды, ал терістейтін кірістегі кернеу сызықтық негізде уақыт бойынша өзгереді: $U_{\text{кр.и}} = kt$ (16.3-сурет, а). ОК-ті идеалды деп алып, теңдеуден Кирхгофтың 1-контурға арналған екінші заңы бойынша:

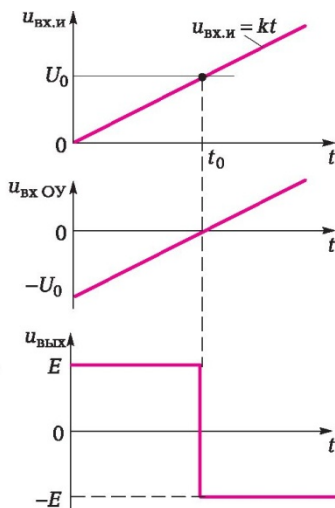
$$u_{\text{вх.оу}} = u_{\text{вх.и}} - U_0$$

$t_0 = U_0/k$ уақыт моментінде $u_{\text{кр.ОК}}$ кернеуінің теріс мәндері оң мәндермен алмасатыны шығады (16.3-сурет, б). Сонымен қатар идеалды ОК-ң табыстама сипаттамасы бойынша (15.7, б суретін қараңыз – 1-сынық сызық) оның шығысындағы кернеу секіріп, қуаттау көзінің E ЭҚК-ң оң мәнінен теріс мәніне дейін өзгереді (16.3-сурет, в).

ОК-ң сызықтық емес жұмыс режимі терістейтін кірістегі кернеуді салыстыру үшін қолданылатын, терістемейтін кірістегі кернеуі, *тірек кернеуі* (немесе керісінше) берілген құрылғылар *компараторлар* деп аталады.



16.2-сурет



16.3-сурет

16.3.

ТРАНЗИСТОР ЖҰМЫСЫНЫҢ КІЛТТІК РЕЖИМІ

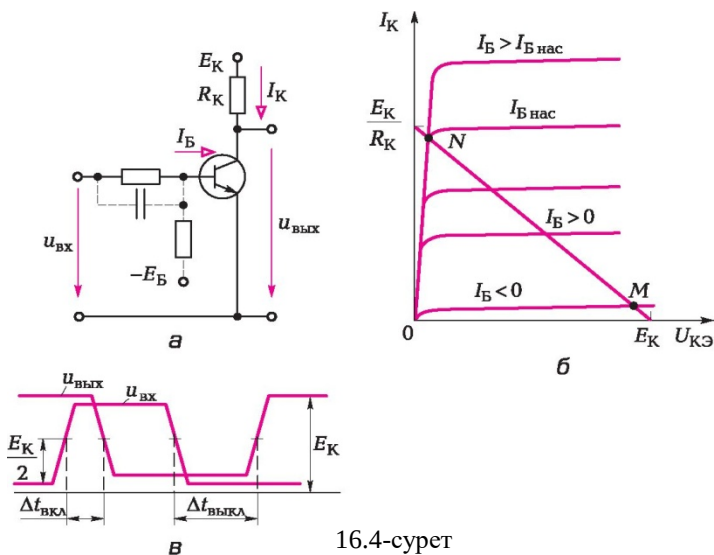
Ақпараттық электроникада ауыстыру жиілігі 500 МГц дейін болатын, төмен қуатты (шығын қуаты 0,1 мкВт дейін) транзисторлық кілттер қолданылады, олардың параметрлері энергетикалық электрониканың транзисторлық кілттерінен (13.6-бөлімшені қараңыз) өзгеше болады.

Мұндай кілттердің жұмысын ОЭ-лі схема бойынша қосылған биполярлық транзистор (16.4-сурет, а) мысалында қарастырайық.

Кілт кірісіндегі $U_{кпр} \leq 0$ тұрақты кернеу жағдайында коллектор мен база тізбектеріндегі токтар бірдей және p - n -өткел арқылы кері қосылған база мен коллектордың арасындағы токқа тең болады. Бұл транзистордың қиылу режиміне (13.4-бөлімшені қараңыз), яғни кілттің ажыратылған күйіне сәйкес келеді (16.4-сурет, б, M нүктесі).

Базаның $U_{кпр} \geq 0$ кернеуі тұрақты және тогы $I_{Бқан}$ қанығу тоғынан жоғары болған жағдайда коллектордың тогы E_K/R_K тең болады (16.4-сурет, б, N нүктесі). Бұл режим кілттің ажыратылған күйіне сәйкес келеді.

Кілттің динамикалық қасиеттері $\Delta t_{қос}$ қосу және $\Delta t_{ажыр}$ ажырату уақыт аралықтарымен анықталады (16.4-сурет, в). $\Delta t_{қос}$ уақытын



16.4-сурет

азайту үшін база тізбегіндегі резистор конденсатормен шунтталады, ал $\Delta t_{\text{ажыр}}$ уақыт моментін азайту үшін база тізбегіне E_B ЭҚК қосылады (16.4, а суретінде штрих сызықпен көрсетілген).

Басқа типтегі кілттердің, мысалы электрмеханикалық кілттердің орнына транзисторды кілт ретінде қолдану бірқатар басымдықтарға ие. Транзисторлық кілт тозуға ұшыраған жылжымалы бөліктерден тұрмайды, тезәрекеттікке ие және өлшемдері кіші. Транзисторлық кілтті басқару үшін төмен қуатты энергия көзі талап етіледі.

Бұдан әрі барлық импульсті және цифрлық электрондық құрылғылардың жұмысын, ОК мен транзисторлық кілттерді идеалды деп алып, қарастырамыз.

16.4. ЛОГИКАЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕР

Технологиялық процестердің режимдерін сақтау мақсатында қажетті жабдықты уақыт моментінде қосу мен ажырату нақты жағдайларға байланысты қандай да бір шешімдердің қабылдануын талап етеді. Егер әрбір жағдайдың бар-жоғы әртүрлі деңгейдегі электр сигналының кернеуімен теңестірілсе, онда логикалық элементтердің негізіндегі электрондық құрылғылардың көмегімен шешім қабылдауға болады. Мұндай құрылғылар жұмыс жағдайлары туралы сигналдардың жиынтығын технологиялық процестерді бас-

қару сигналдарының жиынтығына түрлендіруді іске асырады.

Логикалық элементтердің схематехникалық іске асырылуына байланысты олардың кірістері мен шығыстарындағы сигналдарда не нөлден басқа кернеулер (оң – «оң логика» немесе теріс – «теріс логика»), не нөлге жақын кернеулер болады, оларды шартты түрде логикалық бірлікпен және нөлмен теңестіру қабылданған. Бұл ретте логикалық элементтің жұмысын F шығыс сигналының логикалық мәнінің x кіріс сигналдарының логикалық мәндерінің жиынтығына тәуелділігімен сипаттауға болады. Мұндай тәуелділікті *ақиқат кестесімен* ұсыну қабылданған.

Кез келген логикалық түрленімдер үшін мына операцияларды: логикалық терістеуді (логикалық **ЕМЕС**), логикалық қосуды (логикалық **НЕМЕСЕ**) және логикалық көбейтуді (логикалық **ЖӘНЕ**) орындайтын үш қарапайым логикалық элементтің жеткілікті екенін дәлелдеуге болады.

Логикалық элементтер логикалық функцияларды іске асырады:

■ **ЕМЕС** элементі (инвертор) —

$$F = \bar{x},$$

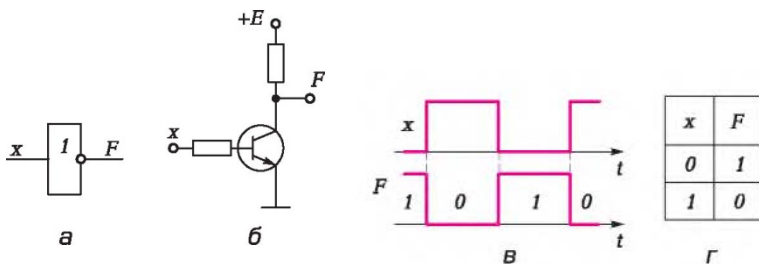
■ **НЕМЕСЕ** элементі (дизъюнктор) екі кіріске —

$$F = x_1 + x_2, \text{ немесе } F = x_1 \vee x_2;$$

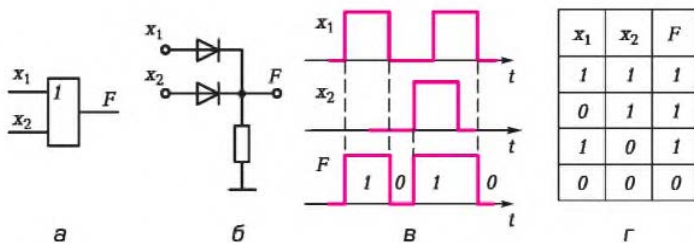
■ **ЖӘНЕ** элементі (конъюнктор) екі кіріске —

$$F = x_1 x_2, \text{ немесе } F = x_1 \wedge x_2;$$

Олардың шартты белгілері, схемалық іске асыру мысалдары, уақытша жұмыс диаграммалары және ақиқат кестелері 16.5-16.7-суреттерде келтірілген.



16.5-сурет



16.6-сурет

Практикада көбінесе төмендегі логикалық функцияларды іске асыратын логикалық элементтердің кеңейтілген жинағы пайдаланылады:

- **НЕМЕСЕ—ЕМЕС** (Пирс нұсқары) (16.8-сурет, а) —

$$F = \overline{X_1 + X_2};$$

- **ЖӘНЕ—ЕМЕС** (Шеффер штрихы) (16.8-сурет, б) —

$$F = \overline{X_1 X_2};$$

- импликация (16.8-сурет, в) —

$$F = X_1 + \overline{X_2};$$

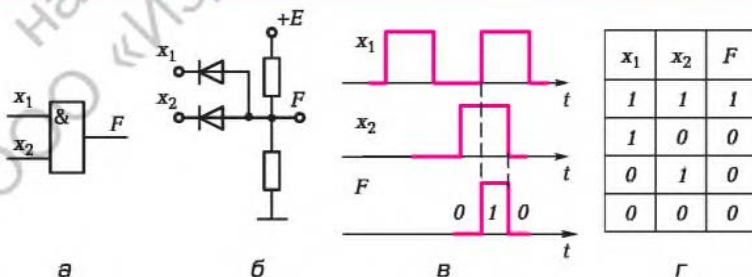
- тыйым (16.8-сурет, г) —

$$F = X_1 \overline{X_2};$$

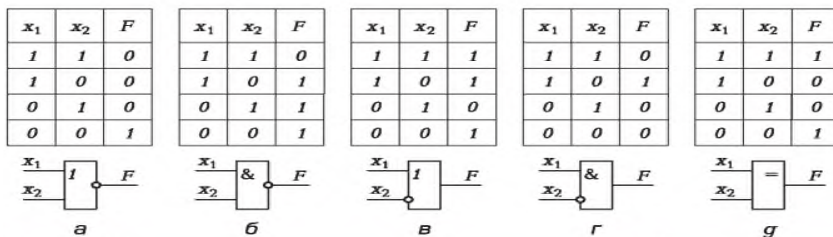
- мәні бірдейлік (16.8-сурет, д) —

$$F = X_1 X_2 + \overline{X_1} \overline{X_2};$$

Логикалық схемаларды бір кірістегі сигналдардың логикалық мәндері цифрлық деректердің басқа кірістер бойынша шығыстан өтіп кетуіне тыйым салатындай немесе рұқсат ететіндей етіп құрыл-



16.7-сурет



16.8-сурет

уы тиіс. Логикалық элементтердің басқа кірістермен басқарылатын кірістері не сигналдары *стробтаушы* деп аталады. Мысалы, ЖӘНЕ логикалық элементі үшін (16.7-суретті қараңыз) x_2 кірісі x_1 кірісі үшін стробтаушы ретінде және керісінше қызмет етуі мүмкін.

Жоғарыда қаралған екі күйлі логикалық элементтерден басқа «үш күйлі логикалық элементтер» қолданылады: кернеуі нөлден басқа не нөлге жақын немесе кедергісінің мәні жоғары. Соңғысы элементтің ажыратылған шығыс тізбегіне сәйкес келеді. Мұндай элементтердің көмегімен бірнеше логикалық схемалардың шығыстарын бөлек жұмыс үшін деректерді берудің екі бағытты бір сызығына параллель жалғанады.

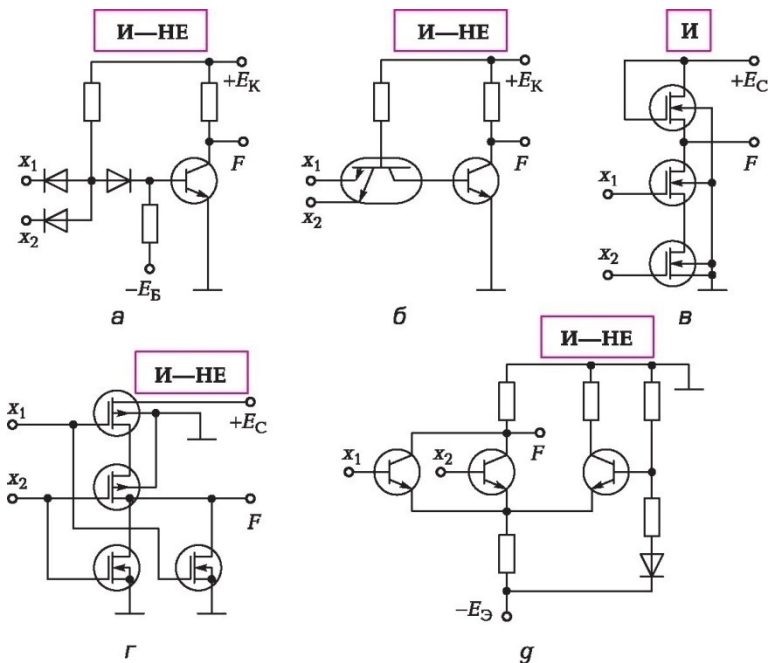
Схемотехникалық іске асыру бойынша ДТЛ (диодтық-транзисторлық логика), ТТЛ (биполярлық транзисторлардағы транзисторлық-транзисторлық логика), МДПТЛ (сол сияқты МДЖ-транзисторларда), КМДПТЛ (сол сияқты өзара толықтыратын¹, немесе комплементарлық, МДЖ-транзисторларда), ТТЛШ (сол сияқты Шоттки транзисторларында), ЭБЛ (эмиттерлік-байланысты логика) және И²Л (инжекциялық логика) элементтер сериялары болады.

ДТЛ, ТТЛ, МДПТЛ, КМДПТЛ және ЭБЛ серияларының кейбір логикалық элементтерінің схемотехникалық реакциясының мысалдары 16.9, а – д суреттерінде келтірілген.

Логикалық элементтердің жұмыс қасиеттерін бірқатар параметрлер айқындайды:

- *тез әрекеттік* — кіріс және шығыс сигналдар күйлерінің ауысым арасындағы уақыт кідірісі (16.4, в суретін қараңыз);

¹Тізбектей жалғанған p - және n -өткелді МДЖ-транзисторлардың бірін қосу екіншісін ажыратумен қатар жүрсе, онда олар өзара толықтырушы деп аталады. Бұл логикалық элементтерде шығын қуатын азайтады.



16.9-сурет

- *жүктемелік қабілет*, немесе тамақталу коэффициенті – бір шығысқа қосуға болатын кірістер саны;
- *бөгеуілге төзімділік* – жалған ауысу тудырмайтын бөгеуіл кернеуінің максималды рұқсат етілген деңгейі;
- *бөгеуілдерді генерациялау дәрежесі* – элементтерді ауыстырған кезде ток тербелістерінің қарқындылығы;
- *сейіл қуаты* – элементтерді энергияның шығын қуаты.

16.5. УАҚЫТША ТҰРАҚТЫ КҮЙЛІ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ИМПУЛЬСТІ ҚҰРЫЛҒЫЛАР

Уақытша тұрақты күйлі электрондық импульсті құрылғылар кернеу импульстарының көздері болып табылады, олардың мәні, ұзақтығы кең шектерде іске асуы мүмкін.

Мультивибратор деп тікбұрышты пішіндегі керену импульстарының генераторы болып есептелетін екі уақытша тұрақты күйлі құрылғыны айтады. Әдетте ол басқа импульсті құрылғыларды бірлескен синхронды жұмыс кезінде жұмысқа қосу

үшін қызмет етеді.

ОК негізіндегі мультивибраторлар ең кең таралған. Симметриялық және бейсимметриялық мультивибраторлар болады. Тікбұрышты импульстардың ұзақтықтары және олардың арасындағы уақыт аралықтары симметриялық мультивибраторларда тең, бейсимметриялық мультивибраторларда әртүрлі болады.

Симметриялық мультивибратордың схемасы 16.10, а суретінде келтірілген, онда ОК компаратор болып табылады (16.3-суретті қараңыз). Кирхгофтың тізбектің 1-контурына арналған екінші заңы бойынша мынадай теңдеу құрамыз:

$$u_{\text{кпр.ОК}} - u_C + u_1 = 0, \quad (16.3)$$

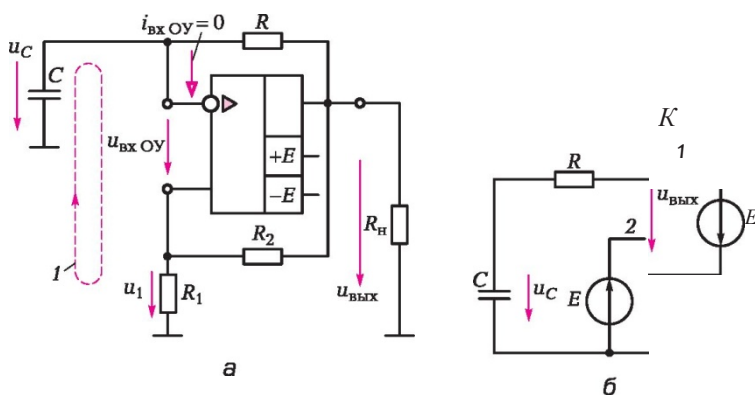
мұндағы $u_1 = R_1 u_{\text{шығ}} / (R_1 + R_2)$ және u_C — кернеу бойынша оң тізбектей және теріс параллель кері байланыстың кернеулері (15.6-бөлімшені қараңыз).

$t = 0$ уақыт моментінде ОК кірісіндегі кернеу $u_{\text{кпр.ОК}}(0) > 0$ деп алайық (16.11-сурет, з). Онда идеалды ОК-ң табыстама сипаттамасы бойынша (15.16, б суретін қараңыз, 1-сынық сызық) оның шығысындағы кернеу:

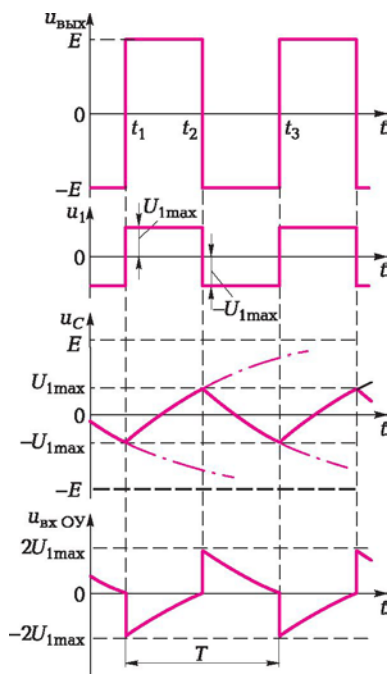
$$u_{\text{шығ}}(0) = -E,$$

ал кері байланыс кернеуі мынаған тең болады:

$$u_1(0) = -R_1 E / (R_1 + R_2) = -U_{1\text{max}}$$



16.10-сурет



16.11-сурет

(16.3) теңдеуді ескеретін болсақ:

$$u_C(0) > u_1(0) = -U_{1\max}$$

мұндағы E — қуаттау көзінің кернеуі (16.11-сурет, a — θ).

16.10, б суретіндегі алмастыру схемасы (1-күйдегі K кілті) сәйкес келетін мультивибратор тізбегінің мұндай күйі тұрақсыз. Шын мәнінде, мультивибратор шығысындағы және конденсатордағы кернеулер әртүрлі: $u_C(0) > u_{\text{шығ}}(0)$. Сондықтан R резисторы арқылы теріс кері байланыс тізбектері және ОК шығысына қосылған тізбек токтан ажырайтын болады, ал ондағы кернеу экспоненциалды өзгеріп (1.11-суретті қараңыз), ЭҚК ($-E = u_{\text{шығ}}$) мәніне жақындайды. $u_{\text{кір.ОК}}(t_1) = 0$, яғни $u_C(t_1) = -U_{1\max}$ шартымен анықталатын t_1 уақыт моментінде ОК кірісіндегі кернеу оң мәнін теріс мәнге өзгертеді. Нәтижесінде оның табыстама сипаттама бойынша ауысуы жүзеге асады және секіріспен кернеуі өзгереді:

$$u_{\text{шығ}}(t_{1+}) = E; u_1(t_{1+}) = R_1 E / (R_1 + R_2) = U_{1\max};$$

$$u_{\text{кір.ОК}}(t_{1+}) = u_C(t_{1+}) - u_1(t_{1+}) = -2U_{1\max}$$

мұнда конденсатордағы кернеу (1.16) коммутация заңы бойынша

секіріспен өзгермейтіні ескерілген: $u_C(t_{1-}) = u_C(t_{1+})$. Сонымен қатар конденсатордың разрядталуы оның 16.10, б суретіндегі (2-күйдегі K кілті) алмастыру схемасы бойынша зарядталуымен алмасады:

$$u_C(t_1) = -U_{1\max} + (E + U_{1\max})(1 - e^{-(t-t_1)/(RC)}), \quad (16.4a)$$

ол $u_{\text{кп.ОК}}(t_{2-}) = 0$ шартымен, яғни (16.3) бойынша анықталатын t_2 уақыт моментінде аяқталады:

$$u_C(t_2) = U_{1\max}. \quad (16.4б)$$

Бұл уақытта кернеу қайта секіріспен өзгереді:

$$\begin{aligned} u_{\text{шығ}}(t_{2+}) &= -E; u_1(t_{2+}) = -U_{1\max} \\ u_{\text{кп.ОК}}(t_{2+}) &= u_C(t_{2+}) - u_1(t_{2+}) = 2U_{1\max} \end{aligned}$$

ал конденсатордың зарядталуы оның 16.10, б суретіндегі (1-күйдегі K кілті) алмастыру схемасы бойынша разрядталуымен алмасады:

$$u_C(t) = U_{1\max} - (E + U_{1\max})(1 - e^{-(t-t_2)/(RC)})$$

ол мына шартпен анықталатын t_3 уақыт моментінде аяқталады:

$$u_{\text{кп.ОК}}(t_{3-}) = 0, \text{ яғни } u_C(t_{3-}) = -U_{1\max}$$

Одан әрі мультивибратор тізбегіндегі процестер жүйелі түрде қайталанады.

Кернеудің оң импульстарының ұзақтығы (16.4) формулаларымен анықталады:

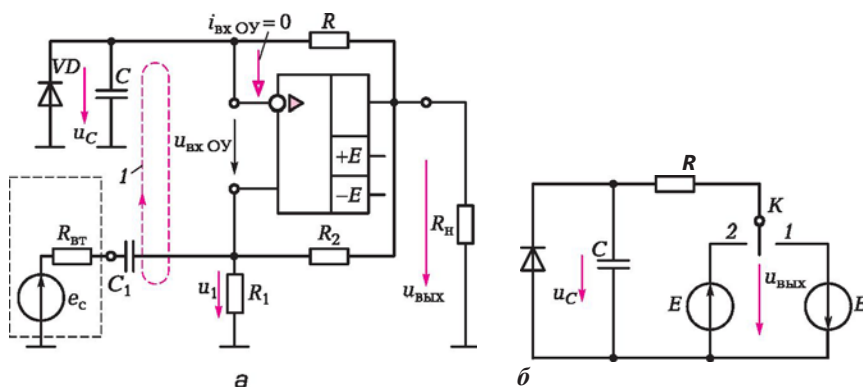
$$t_2 - t_1 = RC \ln(1 + 2R_1/R_2),$$

ал симметриялық мультивибратор жұмысының жиілігі, $t_3 - t_2 = t_2 - t_1$ қатынасын ескергенде мынаған тең:

$$f = \frac{1}{2(t_2 - t_1)} = \frac{1}{2RC \ln(1 + 2R_1/R_2)}.$$

Бейсимметриялық мультивибраторда конденсатордың $t_2 - t_1$ зарядтау және $t_3 - t_2$ разрядтау уақыт аралықтары әртүрлі. Бұл теріс кері байланыс тізбегіне екі параллель жалғанған резисторларды қосу арқылы іске асады: біреуі конденсаторды зарядтау үшін, ал екіншісі разрядтау үшін. Әрбір резистормен тізбектей түрде тура тогы зарядтау тогына не разрядтау тогына сәйкес келетін диод қосылады.

Бірвибратор деп өз шығысында импульс кірісінде сыртқы көзден кернеу әсер еткен жағдайда қажетті ұзақтықтағы бір реттік тікбұрышты кернеу импульсін құруға арналған, бір тұрақты және бір уақытша күйлері бар құрылғыны айтады.



16.12-сурет

Бірвибраторлар кернеу импульстарын ұзақтығы бойынша стандарттау, электромагниттік релелердің жұмысын басқару, кернеу импульстарын кідірту және олардың қайталану жиілігін бөлу үшін қолданылады.

ОК негізіндегі бірвибратордың схемасы (16.12-сурет, а) мультивибратордың схемасынан (16.10, а суретін қараңыз) өзгешеленеді, онда конденсаторға параллель теріс кері байланыс тізбегіне диод қосылады, оны бұдан әрі идеалды деп санаймыз. Бірвибратордың жұмысын біріккен уақытша диаграмма көрсетеді (16.13-сурет, а-д).

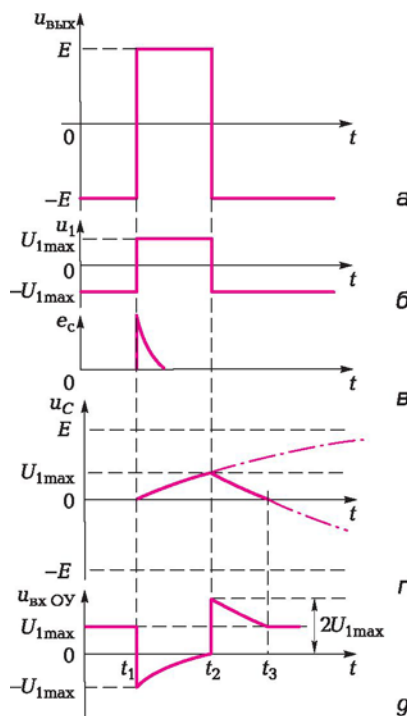
Кирхгофтың 1-контурға арналған 16.12, а суретіндегі екінші заңы бойынша кез келген уақытта (16.3) қатынасы дұрыс болмақ.

Бірвибратордың тұрақты күйіне 16.12, б суретіндегі (1-күйдегі К кілті) алмастыру схемасы сәйкес келеді. Оның элементтеріндегі кернеулер тұрақты және мынаған тең:

$$u_{\text{шығ}} = -E; u_1 = -R_1 E / (R_1 + R_2) = -U_{1\text{max}} \\ u_{\text{кір.ОК}} = u_C - u_1 = U_{1\text{max}} > 0$$

(16.13, а, б және д суреттерін қараңыз), себебі диод тура бағытта қосылған, ал конденсатордағы кернеу $u_C = 0$.

Егер t_1 уақыт моментінде бірвибратордың кірісіне сигнал көзінен амплитудасы бойынша айтарлықтай жоғары, оң полярлы кернеу импульсын беретін болсақ, онда e_c ЭҚК әсерімен (16.13, в суретін қараңыз) ОК кірісіндегі кернеу теріс мәнге айналуы мүмкін. Нәтижесінде жоғарыда сипатталған мультивибратордағы сияқты ОК-ң ауысуы жүзеге асады және кернеу секіріспен өзгереді:



16.13-сурет

$$u_{\text{шығ}}(t_{1+}) = E; u_1(t_{1+}) = R_1 E / (R_1 + R_2) = U_{1\max};$$

$$u_{\text{кпр.ОК}}(t_{1+}) = u_c(t_{1+}) - u_1(t_{1+}) = -U_{1\max} < 0,$$

себебі конденсатордағы кернеу секіріспен өзгермейді (1.16). Бірвибратордың 16.12, б суретіндегі (2-күйдегі K кілті) алмастыру схемасы сәйкес келетін бұл күйі уақытша тұрақты.

Шын мәнінде, ОК ауысқаннан кейін (1.21) теріс кері байланыс тізбегінің R резисторы арқылы конденсатордың зарядталуы басталады:

$$u_c = E (1 - e^{-(t-t_1)/(RC)}) \quad (16.5a)$$

бұл $u_{\text{кпр.ОК}}(t_2) = 0$ шартымен анықталатын t_2 уақытына дейін болады:

$$u_c(t_2) = U_{1\max} = R_1 E / (R_1 + R_2) \quad (16.56)$$

Бұл уақытта ОК-ң ауысуы жүзеге асады және кернеу секіріспен өзгереді:

$$u_{\text{шығ}}(t_{2+}) = -E; u_1(t_{2+}) = -U_{1\text{max}}$$

$$u_{\text{кір.ОК}}(t_{2+}) = u_C(t_{2+}) - u_1(t_{2+}) = 2U_{1\text{max}}$$

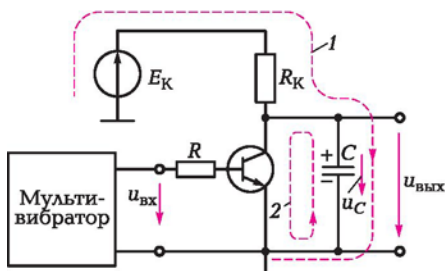
Сонымен қатар конденсаторды заряддау процесі $u_C(t_3) = 0$ шартымен анықталатын t_3 уақытына дейін оның 16.12, суретіндегі (1-күйдегі K кілті) алмастыру схемасындағы разрядтау процесімен алмасады. Бұдан әрі бірвибратордың барлық элементтеріндегі кернеулер тұрақты болады және оның тұрақты күйіне сәйкес келеді.

Бірвибратор шығысындағы кернеудің оң тікбұрышты импульсының ұзақтығы (16.5) формулаларымен анықталады:

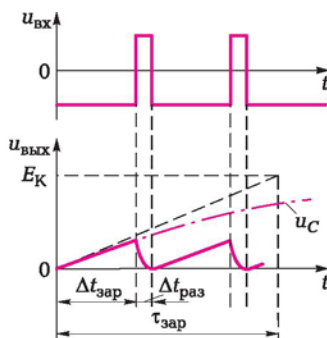
$$t_2 - t_1 = RC \ln(1 + R_1/R_2).$$

Сызықтық өзгертін кернеу генераторлары компараторлардың, осциллограф экраны бойынша электрондық сәуленің жылжуын басқару құрылғыларының және т.б. құрамына кіреді.

Сызықтық өзгертін кернеудің қарапайым генераторы (16.14-сурет) кернеуі кілттік режимдегі транзистордың жұмысын басқару үшін пайдаланылатын бейсимметриялық мультивибраторды (16.15-сурет, а) қамтиды. $\Delta t_{\text{раз}}$ уақыт аралықтарында транзистор ажыратулы болады да, сыйымдылығы C конденсатордың E_K ЭҚК көзінен $t_{\text{зар}} = R_K C$ резисторы арқылы жоғары тұрақты $R_K C$ уақытымен зарядталуы жүзеге асады, ал $\Delta t_{\text{зар}}$ уақыт аралықтарында транзистор қосулы болады да, $\tau_{\text{раз}} = 0$ (2-контур) төмен тұрақты уақытымен разрядталуы жүзеге асады.



16.14-сурет



16.15-сурет

$\Delta t_{\text{зар}} \ll \tau_{\text{раз}}$ шартын сақтаған жағдайда конденсатордағы кернеу оны зарядтаған кезде (1.21) іс жүзінде сызықтық болып өзгереді (16.15-сурет, б).

16.6. ТҰРАҚТЫ КҮЙЛІ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ИМПУЛЬСТІ ҚҰРЫЛҒЫЛАР. ТРИГГЕРЛЕР

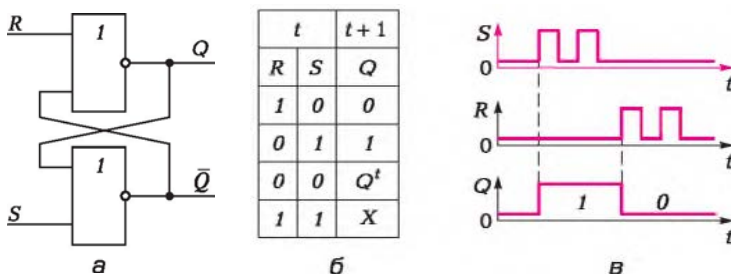
Триггерлер деп ақпараттық шығыстарында кернеулердің әртүрлі мәндері сәйкес келетін, екі тұрақты күйлі электрондық импульсті құрылғыларды айтады. Оларды кернеу импульстарын есептегіштерде, кернеу импульстарын бақылау жиілігін белгіштерде және т.б. қолданады.

Басқару тәсілі бойынша триггерлер асинхронды және синхронды болып бөлінеді.

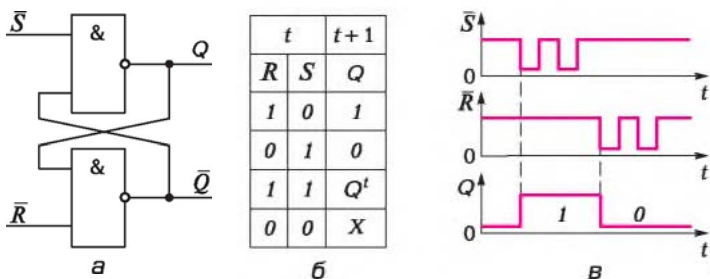
Асинхронды триггерлерде бір күйден екінші күйге ауыстыру басқару кірістердегі кернеу импульстарының белгілі бір жиынтығының әсерімен жүзеге асырылады.

Синхронды триггерлерде басқару кірістердегі кернеу импульстарының белгілі бір жиынтығы мен синхрондау кірісіндегі кернеу импульсы уақыт бойынша сәйкес келген жағдайда ғана ауыстыруға болады.

Триггерлердің бірнегше типтері бар: *RS- D-, JK-*триггерлер және т.б. Триггерлер әдетте логикалық элементтердің негізінде іске асырылады және интегралдық схемалар түрінде шығарылады. Сондықтан бұдан әрі триггерлердің шартты белгілерін пайдалана отырып, олардың әртүрлі типтерінің функционалдық мүмкіндіктерін қарастырумен шектелеміз. Асинхронды *RS-* және синхронды *D-* және *JK-*триггерлер ең көп қолданылады.



16.16-сурет



16.17-сурет

RS-триггер (Reset—Set, яғни, түсіру — орнату) екі кіріске арналған **НЕМЕСЕ – ЕМЕС** логикалық элементтерінің негізінде іске асырылады (16.16-сурет, а), онда тура Q және инверсті $\bar{Q}$ ақпараттық шығыстары белгіленген. *RS-триггердің* жұмысын біраз t уақытындағы R және S басқарушы кірістеріндегі сигналдардың мәндері және оларға сәйкес келетін, өтпелі процесс ақталғаннан кейінгі $t + 1$ уақытындағы Q шығысындағы мәндер көрсетілген 16.16, б суретіндегі ақиқат кестесі, сондай-ақ уақытша диаграмма (16.16-сурет, в) көрсетеді.

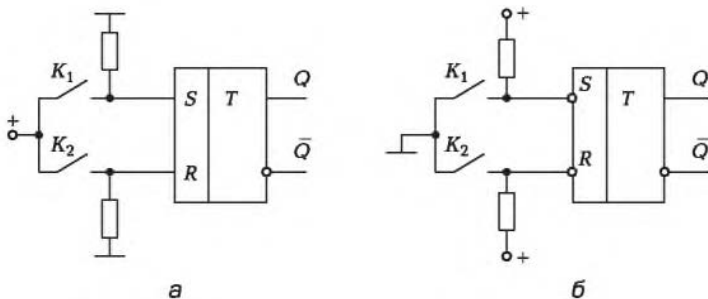
Триггердің күйі ($Q = Q^1$) кірістердегі $R = 0$ және $S = 0$ сигналдарының жиынтығында сақталады және $R = 1$ мен $S = 1$. Жағдайында анықталмаған. Соңғы күйге тыйым салынған.

R және S кірістеріндегі сигналдарының мәндері инверсті *RS-триггер ЖӘНЕ – ЕМЕС* логикалық элементтерінің негізінде іске асырылады. Оның схемасы, ақиқат кестесі және уақытша диаграммасы 16.17, а-в суреттерінде келтірілген. Триггердің күйі кірістеріндегі сигналдардың мәндері $\bar{R} = 1$ және $S = 1$ болған жағдайда сақталады және $R = 0$ мен $S = 0$ жағдайында анықталмаған. Соңғы күйге тыйым салынған.

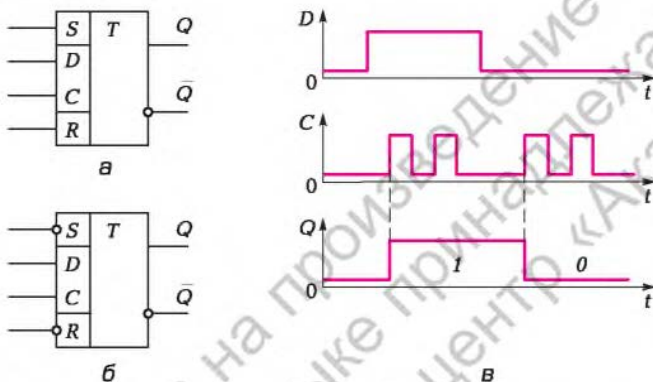
Тура және инверсті кірісті *RS-триггерлердің* шартты белгілері 16.18, а және б суреттерінде келтірілген. K_1 немесе K_2 кілтін қысқа мерзімге тұйықтау арқылы $Q = 1$ не $Q = 0$ триггерлердің тұрақты күйлері орнатылады.

D-триггердің тура (16.19-сурет, а) не инверсті (16.19-сурет, б) орнатушы R және S кірістері, бір басқарушы D кірісі және C синхрондау кірісі бар. R және S кірістері *D-триггерді* 16.18-суреттегі сияқты $Q = 1$ не $Q = 0$ күйіне алдын ала орнату үшін қызмет ететіндіктен, орнатушы деп аталады.

$D = 1$ не $D = 0$ басқарушы кірісіндегі сигнал триггерді синхрондау кірісіндегі оң полярлы импульстың қатар әсер ету жағдайында ғана $Q = 1$ не $Q = 0$ тура ақпараттық шығысындағы ат-



16.18-сурет

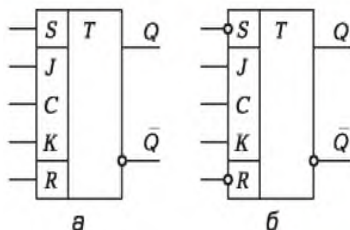


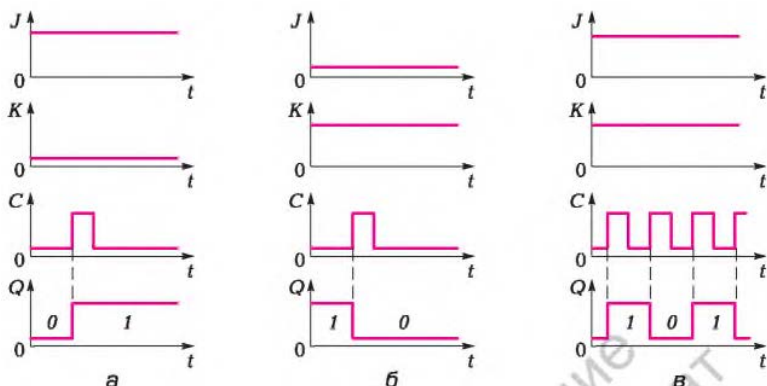
16.19-сурет

тас мәнмен ғана тұрақты күйге орнатады. Әдетте триггердің ауысуы синхрондау импульсының алдыңғы шебінің әсер ету уақыт моментінде жүзеге асады (16.19-сурет, в).

JK-триггер *RS-* және *D-* триггерлермен салыстырығанда бірқатар басымдықтарға ие. Оның *R* және *S* тура не инверсті орнатушы кірістерімен шартты белгілері 16.20, *a* және *б* суреттерінде келтірілген, онда *J* және *K* — басқарушы кірістері, *C* — синхрондау кірісі белгіленген.

JK-триггердің бастапқы күйі орнатылған деп санап, оның жұмыс істеу ережелерін қарастырайық.





16.21-сурет

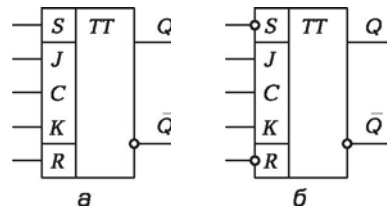
1. Егер $J = 1$ және $K = 0$ болса, онда оң полярлы синхрондау импульсының алдыңғы шебінің әсер ету уақыт моментінде триггер $Q = 1$ күйіне орнатылады (16.21-сурет, а).

2. Егер $J = 0$ және $K = 1$ болса, онда оң полярлы синхрондау импульсының алдыңғы шебінің әсер ету уақыт моментінде триггер $Q = 0$ күйіне орнатылады (16.21-сурет, б).

3. Егер $J = 1$ және $K = 1$, онда өзінің бастапқы Q күйіне қарамастан, триггер оң полярлы синхрондау импульсының алдыңғы шебінің әсер ету уақыт моментінде ауысатын болады. Бұл ретте триггер шығысындағы кернеудің өзгеру жиілігі синхрондау импульстарының жиілігінен екі есе төмен болады (16.21-сурет, в).

4. Егер $J = 0$ және $K = 0$ болса, онда триггердің бастапқы Q күйі синхрондау импульсының әсерімен өзгермейді,

Практикада ура не инверсті R және S орнатушы кірістері бар, екі сатылы JK -триггерлер (шартты белгісі TT) жиі кездеседі (16.22-сурет, а және б). Олардың жұмыс істеу ережелерінің жоғарыда сипатталғаннан өзгешелігі – онда триггер күйінің өзгеруі синхрондау импульсының алдыңғы шебінің әсер ету уақыт моментінде емес, оның артқы шебінің әсер ету уақыт моментінде жүзеге асады.



16.22-сурет

Логикалық элементтер мен импульсті құрылғылардың негізінде цифрлық логикалық автоматтар құрылады.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Электрондық генераторларда қандай кері байланыс (оң не теріс) қолданылады?
2. Үш негізгі логикалық операцияны және оларға сәйкес келетін, кез келген логикалық түрленімдер үшін жеткілікті логикалық элементтерді атаңыз.
3. Симметриялық және бейсимметриялық мультивибратор шығысындағы кернеудің уақытша диаграммасын бейнелеңіз.
4. Асинхронды және синхронды триггерлердің арасындағы айырмашылық неде?

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. Элементтер параметрлерінің мәндері $R_1 = 2 \text{ кОм}$, $R_0 = 10 \text{ кОм}$, $C = 0,5 \text{ мкФ}$, ОК идеалды болған жағдайда жұмыс жиілігі $f = 1 \text{ кГц}$ болатын симметриялық мультивибратор схемасындағы (16.10, *a* суретін қараңыз) резистивтік элемент кедергісінің мәнін анықтаңыз.
Жауабы: 3 кОм.
2. Элементтер параметрлерінің мәндері $R = 5 \text{ кОм}$, $C = 0,1 \text{ мкФ}$, ОК және VD диод идеалды болған жағдайда ұзақтығы $t_2 - t_1 = 100 \text{ мкс}$, $u_{\text{шығ}}$ шығысынағы кернеуінің импульсы тікбұрышты болатын, 16.12, *a* суретіндегі бірвибратор схемасындағы R_1/R_2 резистивтік элементтері кедергілерінің қатынасын анықтаңыз.
Жауабы: 0,2214

ЭЛЕКТРОНДЫҚ ЦИФРЛЫҚ ҚҰРЫЛҒЫЛАР

17.1. ЦИФРЛЫҚ ЛОГИКАЛЫҚ АВТОМАТТАРДЫҢ АРИФМЕТИКАЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ

Цифрлық логикалық автоматтарда негізі 2 болып табылатын екілік санау жүйесі пайдаланылады. Солдан оңға қарайғы разрядтардың салмағы мынадай реттіліктен тұрады:

$$\dots 2^4 2^3 2^2 2^1 2^0, 2^{-1} 2^{-2} 2^{-3} \dots,$$

ол екілік санды ондық санға ауыстыру үшін пайдаланылады. Мысалы, 10111 екілік саны 23 ондық санына балама:

$$2^4 \cdot 1 + 2^3 \cdot 0 + 2^2 \cdot 1 + 2^1 \cdot 1 + 2^0 \cdot 1 = 23.$$

Цифрлық логикалық автоматтарда арнайы терминдер пайдаланылады: бит, екілік разряд, байт.

Бит, немесе *екілік разряд*, екілік сандағы қандай да бір белгіні білдіреді. Мысалы, 101 екілік санының үш разряды бар. Оң жақтағы салмағы ең аз шеткі разряд *кіші*, сол жақтағы салмағы ең жоғары шеткі разряд *үлкен* деп аталады.

Байт ақпараттың 8-разрядты бірлігін білдіреді. Мысалы, 10001111 немесе 00101001 және т.б.

Санды екілік санау жүйесінде беру үшін екілік разрядтардың көп саны талап етіледі. Сегіздік және он алтылық санау жүйесін пайдаланатын болсақ, жазу жеңілдей түседі. *Сегіздік* жүйенің негізі $8 = 2^3$, ал *он алтылық* жүйенің негізі — $16 = 2^4$ саны болып табылады. Екілік санды сегіздік (он алтылық) санға ауыстыру үшін екілік санды үш (төрт) биттік топқа бөлу жеткілікті: бүтін бөлігін оңнан солға қарай, бөлшек бөлігін үтірден солдан оңға қарай. Шеткі топтар толық болмауы мүмкін.

17.1-кесте. Кодтар кестесі

Ондық сан	Екілік сан	Сегіздік сан	Он алтылық сан
0	0000	0	0
1	0001	1	1
2	0010	2	2
3	0011	3	3
4	0100	4	4
5	0101	5	5
6	0110	6	6
7	0111	7	7
8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F

Әрбір екілік топ тиісті сегіздік не он алтылық цифрмен беріледі (17.1-кесте). Мысалы, 1100110000101001 екілік саны он алтылық жүйеде CC29 санымен, сегіздік жүйеде 146051 санымен беріледі.

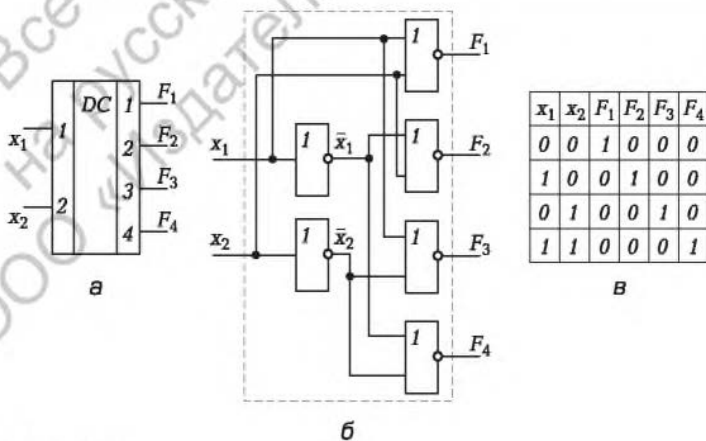
Пайдаланушыға ондық санау жүйесі ең қолайлысы болмақ. Сондықтан көптеген цифрлық логикалық автоматтар екілік сандармен жұмыс жасай отырып, ондық сандарды қабылдауды және пайдаланушыға беруді жүзеге асырады. Бұл ретте екілік-ондық код жиі қолданылады.

Екілік-ондық код ондық санда әрбір ондық цифрды осы цифрдың 17.1-кесте бойынша төрт разрядты екілік нұсқасымен алмастыру арқылы жасалады. Мысалы, $11_{10} \ 00010001_{2-10}$ ретінде беріледі. Бұл ретте әрбір байтта екілік-ондық кодта берілген екі ондық цифр орналасады. Екілік-ондық код мұндай түрленімде ондық санға балама екілік сан болып табылмайтынын атап өтеміз.

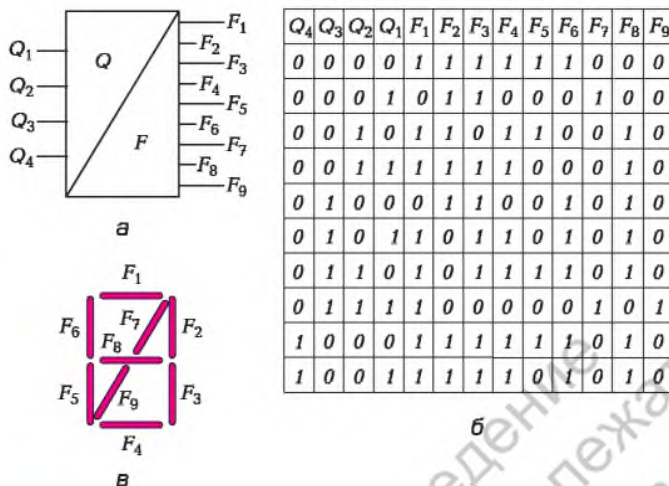
17.2. ЖАДСЫЗ ЦИФРЛЫҚ ЛОГИКАЛЫҚ АВТОМАТТАР

Жадсыз цифрлық логикалық автоматтар, немесе комбинациялық логикалық құрылғылар, деп шығыстарындағы логикалық мәндері берілген уақыт моментіндегі кірістердегі логикалық мәндердің жиынтығымен бір мағыналы анықталатын электрондық цифрлық құрылғыларды айтады. Жадсыз логикалық автоматтарға дешифраторлар, шифраторлар, мультиплексорлар, демультиплексорлар, сумматорлар және интегралдық схема түрінде шығарылатын басқа да цифрлық құрылғылар жатады.

Дешифратор деп n кірістердегі екілік санның кодына байланысты өзінің 2^n шығыстарының бірінде ғана логикалық 1 сигналын шығаратын құрылғыны айтады. 17.1, а-в суреттерінде: $n = 2$ кірісіне және $2^n = 4$ шығысына арналған дешифратордың интегралдық схемасының шартты белгісі, оның функционалдық схемасы және ақиқат кестесі келтірілген.



17.1-сурет



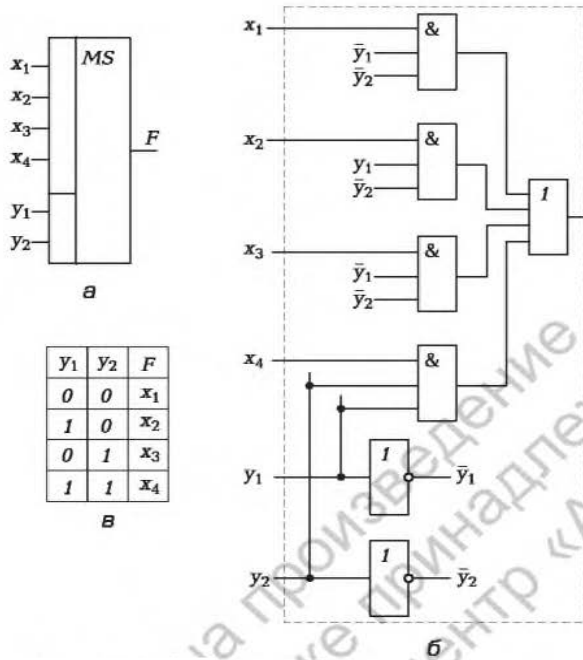
17.2-сурет

Көбінесе дешифраторлардың схемалары қосымша кірістермен, мысалы рұқсат ету (стробтау) кірісімен жасалады. Стробтау дешифратордың шығысында жалған сигналдардың пайда болуына жол бермей, кірістегі цифрлық код өзгерген кезде өтпелі процестің уақыт аралығында оның жұмысына тыйым салады.

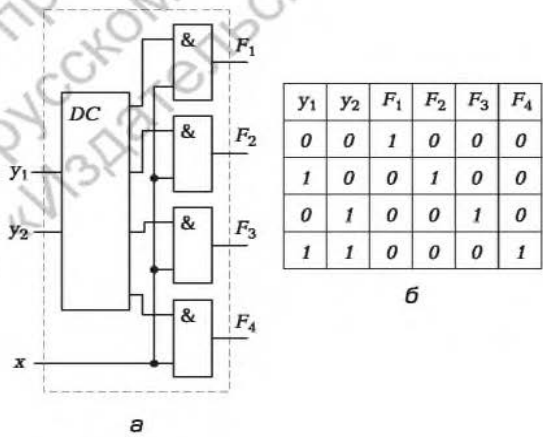
Кодтарды түрлендіргіш дешифратордан кірістегі әрбір логикалық 1 және 0 жинағын шығыстағы логикалық 1 және 0 жинағымен бір қатарлы сәйкестікке келтіретінімен өзгешеленеді. Мысал ретінде интегралдық схема мен оның 17.2, а және б суреттеріндегі, $Q_4Q_3Q_2Q_1$ екілік санының кодын (индекстердегі цифрлар разрядтар нөмірін көрсетеді) $F_1 — F_9$ басқару сигналдарына желілік индикатордың тоғыз сегментімен түрлендіретін ақиқат кестесін алуға болады (17.2-сурет, в).

Шифратор дешифраторға кері функцияны атқарады. Оның 2^n кірісі болады, олардың бірінде логикалық 1, ал қалғандарында – 0. Бұл ретте n шығыстарда екілік санның коды бірлік кодтың нөміріне сәйкес келуі тиіс.

Мультиплексор деп 2^m ақпараттық кірістерінің бірін бір шығысқа коммутациялауға арналған құрылғыны айтады. Қажетті коммутацияны іске асыру үшін мультиплексордың ақпараттық кірістерден басқа m адрестік кірістері болады. Адрестік кірістерде екілік кодтағы санның мәні коммутацияланатын ақпараттық кірістің адресін білдіреді.



17.3-сурет



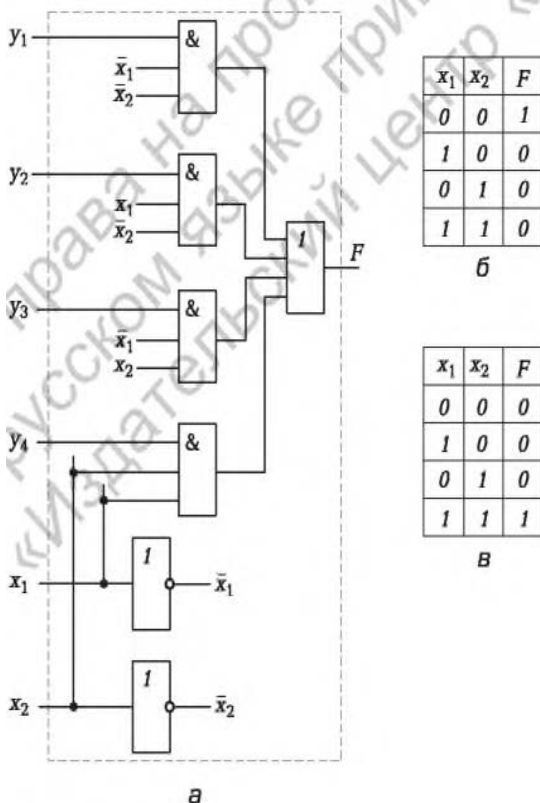
17.4-сурет

Екі адресі $m = 2$ (y_1 және y_2) және төрт ақпараттық $2^m = 4$ (x_1, x_2, x_3, x_4) кірісті мультиплексордың интегралдық схемасының шартты белгісі, оның функционалдық схемасы және ақиқат кестесі 17.3, *а-в* суреттерінде келтірілген.

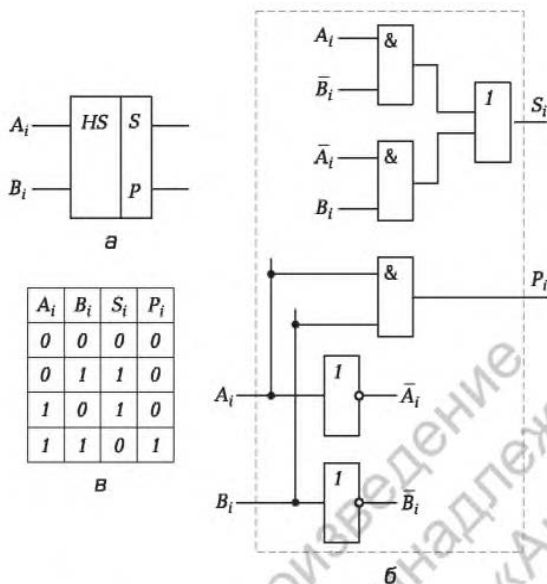
Демультимплексор мультиплексорға кері функцияны атқарады. Оның көмегімен a адресі кірістерде екілік кодтағы санның мәніне байланысты бір ақпараттық кірісті 2^m ақпараттық шығыстардың біріне коммутациялау жүзеге асырылады.

Екі адресі $m = 2$ (y_1 және y_2) және төрт ақпараттық $2^m = 4$ (F_1, F_2, F_3, F_4) шығысты демультимплексордың схемалық іске асыру мысалы, оның дешифратордың ақиқат кестесі (17.1, *в* суретін қараңыз) ескерілген ақиқат кестесі 17.4, *а* және *б* суреттерінде келтірілген.

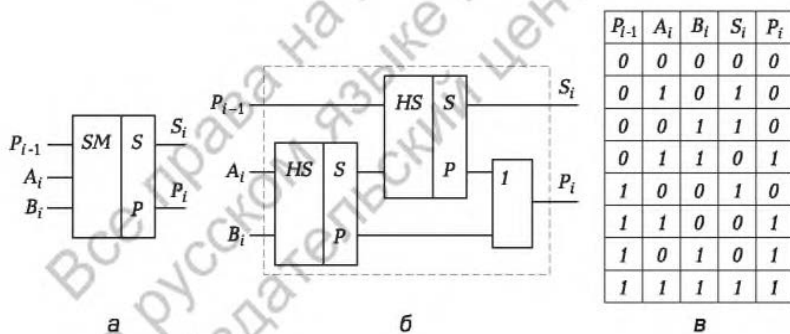
Логикалық функциялар генераторы деп өз шығысында оның ақпараттық кірістеріндегі логикалық шамалар мәндерінің қажетті функциясын алуға мүмкіндік беретін құрылғыны айтады. Мұндай



17.5-сурет

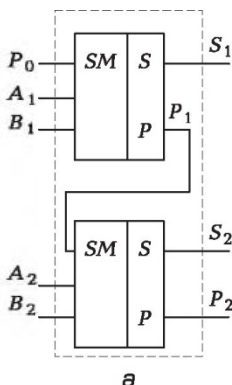


17.6-сурет

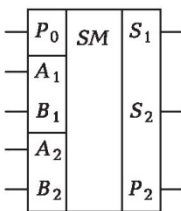


17.7-сурет

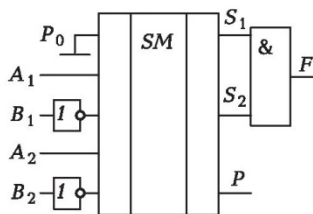
генераторлар басқарушы және ақпараттық кірістерінің міндетін орындарымен алмастыру қажет мультиплексорлардың негізінде (17.3, б суретін қараңыз) іске асырылады. Мысалы, логикалық функциялар генераторының (17.5-сурет, а) y_1 , y_2 , y_3 , y_4 басқарушы кірістерінде сәйкес логикалық 1 және 0 мәндерін бере отырып, шығыста ақпараттық x_1 және x_2 кірістеріндегі шамалардың кез келген F функциясын аламыз. Мысалы, $F = X_1 + X_2$ және $F = x_1 \wedge x_2$



17.8-сурет



б



17.9-сурет

логикалық функцияларына, яғни 17.5, б және в суреттеріндегі ақиқат кестелеріне $y_1, y_2, y_3, y_4 = 1000$ және 0001 мәндері сәйкес келеді. Логикалық функцияларды алудың мұндай тәсілі элементтік базаны интегралдық атқарымда сәйкестендіруге және логикалық автоматтарды жобалау уақытын қысқартуға мүмкіндік береді.

Сумматор деп екі екілік санды арифметикалық қосуға арналған құрылғыны айтады. Кіші ($i - 1$)-ші разрядтан үлкен ($i + 1$)-ші разрядқа тасымалдарды ескере отырып, екі аттас i -х разрядтарын қосу бір разрядты *жартылай сумматорлардан* құралатын бір разрядты сумматормен жүзеге асырылады. Жартылай сумматорлар кіші разрядтан тасымалды ескермейді.

17.6, а-в суреттерінде бір разрядты жартылай сумматордың интегралдық схемасының шартты белгісі, оның функционалдық схемасы және ақиқат кестесі келтірілген, аталмыш кестедегі A_i және B_i — екі екілік санның аттас разрядтары; S_i — қосынды; P_i — үлкен разрядқа тасымал.

Бір разрядты сумматордың интегралдық схемасының шартты белгісі, оның функционалдық схемасы және ақиқат кестесі 17.7, а-в суреттерінде келтірілген. Бір разрядты сумматорлардан көп разрядты сумматорлар құралады. Екі разрядты сумматордың схемасы және интегралдың схемасының шартты белгісі 17.8, а және б суреттерінде келтірілген.

Цифрлық компаратор деп екілік сандарды салыстыру құрылғысын айтады. Сумматорды қолдану арқылы іске асырудың мүмкін болатын схемаларының бірі 17.9-суретте келтірілген. Шынында, егер i — разряд нөмірін білдіретін аттас разрядтарда $A_j = B_j$ болса, онда A_j және B_j $B_i = 1$ -ге тең болады және үлкен разрядқа тасымал $P_i = 0$ болады.

Осылайша, сумматор шығысындағы екі екілік сан тепе-тең болған кезде $S_1 = S_2 = 1$ және $P = 0$, ал логикалық элемент шығысында $F = 1$ болады.

Цифрлық компаратордың келтірілген схемасы екі екілік санның теңсіздігін де бекітуі мүмкін: $A_2A_1 > B_2B_1$, бұл ретте сумматор шығысында үлкен разрядқа тасымал $P = 1$ болады.

17.3. ЖАДТЫ ЦИФРЛЫҚ ЛОГИКАЛЫҚ АВТОМАТТАР

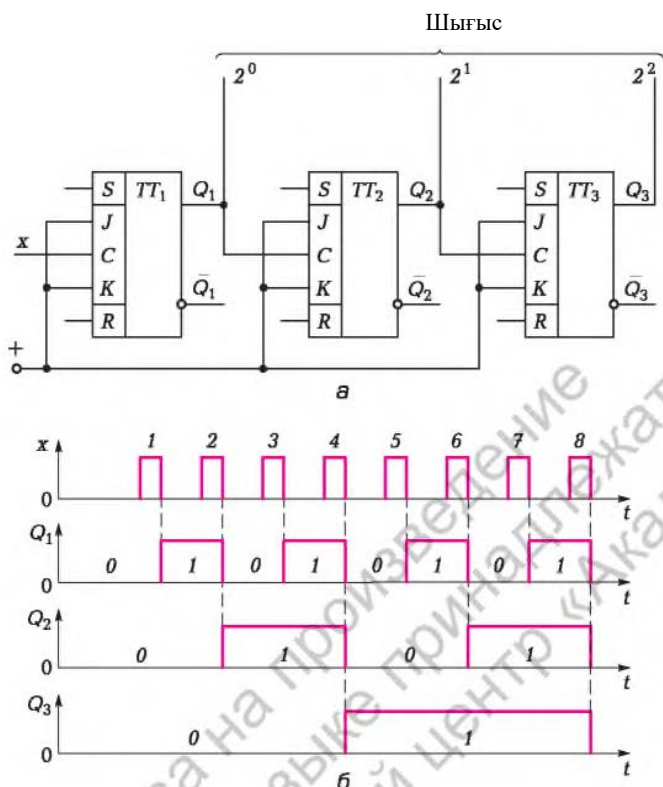
Жадты цифрлық логикалық автоматтар, немесе тізбекті логикалық құрылғылар, деп шығыстарындағы логикалық мәндері берілген уақыт моментіндегі кірістегі логикалық мәндердің жиынтығымен, сол сияқты логикалық автоматтың алдыңғы жұмысының нәтижелері бойынша оның күйімен анықталатын электрондық цифрлық құрылғыларды айтады. Алдыңғы оқиғаларды жадта сақтау әдетте триггерлердің көмегімен орындалады.

Жадты логикалық автоматтарға импульс есептегіштер мен ығысу регистрлері жатады.

Есептегіш деп кірісіне келіп түсетін кернеу импульстарының санын анықтауға арналған құрылғыны айтады. Қосуға, азайтуға және реверстеуге арналған есептегіштер болады. Соңғысының екі кірісі болады – біреуі қосуға, екіншісі азайтуға арналған.

Екілік санау жүйесіндегі санау нәтижесін ұсына отырып, қос сатылы *JK*-триггерлердің (16.21, *a* суретін қараңыз) негізіндегі үш разрядты қосуға арналған есептегіштің жұмысын қарастырайық.

Есептегіштің жұмысы басталмас бұрын, оның барлық разрядтары *R* орнатушы құрылғыларының (16.17, *a* суретін қараңыз) көмегімен $Q_1 = Q_2 = Q_3 = 0$ күйіне орнатылады. Бірінші есептік импульс аяқталған кезде кіші разрядты TT_1 триггері ауысады, ал үлкен разрядты TT_2 және TT_3 триггерлерінің күйі өзгермейді, яғни есептегіштің шығысындағы екілік санның мәні $Q_3Q_2Q_1 = 001$ тең. Екінші есептік импульс аяқталған кезде кіші разрядты TT_1 триггері қайта ауысады да, кіші разрядты шығыстың логикалық мәні 1-ден 0-ге өзгереді. Сондықтан TT_2 триггері де қатар қосылады, яғни $Q_3Q_2Q_1 = 010$. Одан әрі триггерлердің ауысуы осы сияқты жүретін болады, сондықтан есептегіш кірісіндегі импульстардың саны оның шығысындағы екілік санау жүйесіндегі санға сәйкес келеді (17.10-сурет, *б*). Жетінші есептік импульстан кейін есептегіш шығысындағы сан $Q_3Q_2Q_1 = 111$, ал сегізінші есептік импульстан кейін – 000. Мұндай есептегіш 8 модуль бойынша деп аталады.



17.10-сурет

Азайтуға арналған есептегіш схемасының жоғарыда қаралған қосуға арналған есептегіш схемасынан айырмашылығы – қосуға арналған есептегіште триггерлердің синхрондау кірістерін турадан алдыңғы разрядтағы триггерлердің инверсті кірістеріне ауыстыру қажет.

Есептегіштердің интегралдық схемаларының мынадай кіріс және шығыс шықпалары болады (барлығы міндетті емес).

1. *Кірістер*: R — барлық разрядтарды логикалық 0 күйіне орнату үшін; $+1$ және -1 сәйкесінше қосуға және азайтуға арналған импульстарды есептеу үшін; $D_1D_2D_4D_8$ — есептегішті берілген күйге орнату үшін; C — есептегішті $D_1—D_8$ кірістеріндегі берілген күйге орнатуға рұқсат ету үшін; (индекстердегі цифрлар разрядтардың салмағын көрсетеді); V — есептеуге рұқсат ету үшін.

2. *Шығыстар*: $Q_1Q_2Q_3Q_4$ — есептегіштің ішіндегі санды көрсету үшін; көмекші — есептегіштің шамадан тыс толық кеткенін не нөлденгенін көрсету үшін.

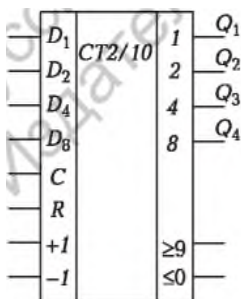
Есептегішке жазуға болатын максималды сан (максималды сыйымдылық) равно $N = 2^n - 1$, мұндағы n — есептегіш разрядтарының саны. *Есептеу коэффициенті* деп те алатын есептегіш сыйымдылығы оның атауында көрсетіледі. Мысалы, есептеу коэффициенті $N = 2^n - 1$ есептегіш *екілік*, есептеу коэффициенті (0-ден 9-ға дейін) *екілік-ондық* деп аталады.

Төрт разрядты екілік-ондық реверсті есептегіштің интегралдық схемасының шартты белгісі және оның қосу бойынша жұмыс жасау кезіндегі ақиқат кестесі 17.11, *a* және *б* суреттерінде берілген.

Ығысу регистрі деп әдетте екілік санау жүйесінде берілген ақпаратты қабылдауға, табыстауға және түрлендіруге арналған құрылғыны айтады. Оларды іске асырудың элементтік базасы синхронды және асинхронды триггерлер болып табылады (16.6-бөлімшені қараңыз). Соңғысы көп таралмағандықтан, бұл жерде қарастырылмайды.

Ығысу регистріне ақпаратты енгізудің тізбектей және параллель түрі болады.

Тізбектей енгізу кезінде ақпарат логикалық сигналдардың реттілігі түрінде регистрдің бір кірісіне беріледі де, біртіндеп оның разрядтары бойынша ілгерілейді.



a

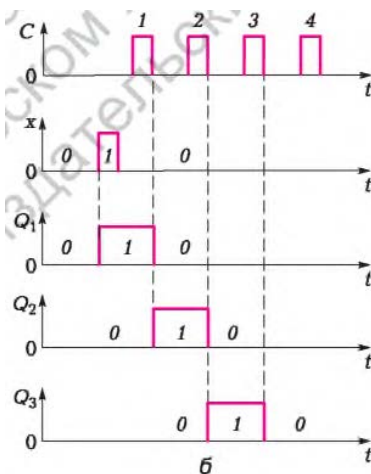
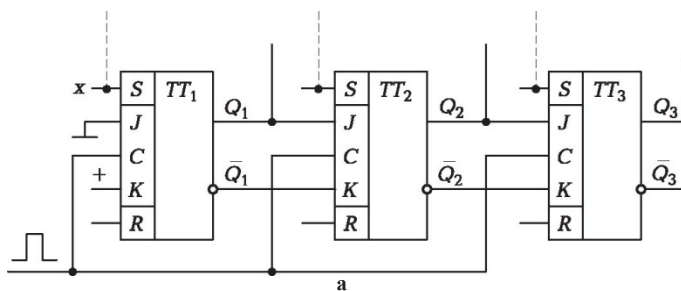
n	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	0	0	0	0
11	0	0	0	1

б

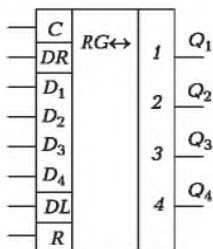
17.11-сурет

17.12, *a* суретінде қос сатылы *JK*-триггерлердегі үш разрядты синхронды ығысу регистрінің схемасы келтірілген. *R* орнатушы кірістеріне (16.17-сурет, *a*) алдын ала сигнал беріп, триггерлер $Q_1 = Q_2 = Q_3 = 0$ күйіне орнатылады. Регистр кірісіне, яғни TT_1 триггерінің *S* орнатушы кірісіне $x = 1$ логикалық сигналын беріп, оның күйін $Q_1 = 1$ күйіне келтіреміз (17.12-сурет, *б*). Бұл ретте регистр күйі $Q_1Q_2Q_3 = 100$ мәндерінің жиынтығымен анықталады. Бірінші *C* синхрондау импульсының әсерімен регистрдің күйі $Q_1Q_2Q_3 = 010$ күйіне, екінші синхрондау импульсының әсерімен $Q_1Q_2Q_3 = 001$ күйіне және т.б. өзгереді.

Ақпаратты *параллель енгізу* кезінде екілік санның барлық разрядтарының әрқайсысы регистрдің сәйкес разрядының кірісіне бір уақытта беріледі. Мысалы, 17.12, *a* суретінде штрих сызықпен көрсетілгендей.



17.12-сурет



17.13-сурет

Регистрлер екілік санның тізбектей кодын параллель кодқа, сондай-ақ керісінше, түрлендіру, регистрге енгізілетін және біраз уақыттан кейін одан шығарылатын екілік сан кодын сақтау (буферлеу), екілік сан кодын бір разрядқа жылжыту, яғни оның мәнін 2-ге көбейту үшін қолданылады.

Регистрлердің интегралдық схемалары мынадай кіріс және шығыс шықпаларынан тұрады (барлығы міндетті емес):

1. *Кірістер*: D_1, D_2 — параллель коды беру үшін; DR және DL — оңға және солға жылжыту үшін; R — барлық разрядтарды логикалық 0 күйіне орнату үшін; C — $D_1, D_2, \dots$ кірістері бойынша жазуға рұқсат ету үшін; V — жылжытуға рұқсат ету үшін.

2. *Шығыстар*: $Q_1, Q_2, \dots$ — регистр ішіндегісін көрсету үшін.

17.13-суретте төрт разрядты әмбебап ығысу регистрінің интегралдық схемасының шартты белгісі келтірілген.

17.4. АДРЕСТІК ІРІКТЕМЕЛІ ЦИФРЛЫҚ ЛОГИКАЛЫҚ АВТОМАТТАР. ЖАДТАУ ҚҰРЫЛҒЫСЫ

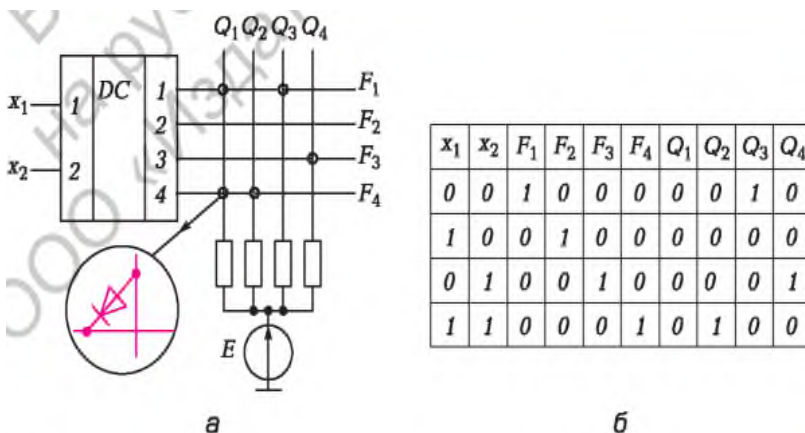
Адрестік іріктемелі цифрлық логикалық автоматтар деп кірістеріндегі әрбір логикалық мәндер жинағында құрылғының көптеген ақпараттық ұяшықтарының арасынан сол не өзге ұяшығына жүгінуге және сонымен жұмыс жасауға мүмкіндік беретін адресі болатын цифрлық құрылғыларды айтады. Адрестік іріктемелі логикалық автоматтарға жедел және тұрақты жадтау құрылғылары жатады.

Жедел жадтау құрылғылары (ЖЖҚ — RAM, random access memory) жүгіну барысында өзгертуге, яғни есептеуге, сонымен қатар өшіріп тастауға және жазуға болатын ақпараттық ұяшықтарды қамтитын құрылғылар болып есептеледі. ЖЖҚ-да ақпаратты сақтауға арналған элементтер ретінде триггерлер (16.6-бөлімшені қараңыз) немесе тұрақты разрядталу уақыты жоғары транзисторлардың p - n -өткелдерінің электрлік сыйымдылықтары пайдаланылады. Соңғы жағдайда ЖЖҚ *динамикалық* деп аталады, себебі оның электрлік күйін жүйелі қалпына келтіру талап етіледі. Динамикалық ЖЖҚ үшін *статикалық* деп аталатын триггерлер

негізіндегі ЖЖҚ-мен салыстырғанда энергияны аз тұтыну және ақпаратты қуаттауды қысқа мерзімге ажыратқан жағдайда сақтау, сонымен қатар аппарат құралдарының ұлғайтылған жинағы тән.

ЖЖҚ-ң интегралдық схемаларын типтік ұйымдастыру: 4096 x 1, яғни 4096 жадтау ұяшығының әрбірінде бір разрядтан, 16384 x 1, 1024 x 4, 1024 x 8 және т.б.

Тұрақты жадтау құрылғылары (ТЖҚ — ROM, read only memory) бір-біріне ортогонал екі параллель шиналар жинағы болып есептеледі. Қиылысқан жерлерінде шиналар өз арасында жартылай өткізгіш диодтар не өткізгіштер түріндегі қосқыштармен жалғанады. Қосқыштардың бөліктерін өткізгіштердің балқымасымен, диодтардың электрлік ойығымен немесе өндіріс процесінде тиісті маскалардың көмегімен мақсатты түрде алып тастау бағдарламалау дегенді, яғни ақпаратты ТЖҚ-қа жазу дегенді білдіреді. Осы себепке орай ТЖҚ маскалық және пайдаланушымен бағдарламалатын болып бөлінеді. Маскалық ТЖҚ жалпы қолданыстағы тұрақты ақпаратты, мысалы математикалық кестелерді, символдарды, стандартты математикалық түрленімдер бағдарламаларын және т.б. жазу үшін пайдаланылады. Пайдаланушымен бағдарламаланатын ТЖҚ-та ақпарат бір рет өз бетінше жазылуы мүмкін. Саны шектеулі болса да (он ретке дейін), ақпаратты бірнеше рет өзгертуге жол беретін ТЖҚ да бар. Олардағы ақпаратты өшіру ультракүлгін сәулелендіру арқылы жүзеге асырылады.



17.14-сурет

17.14, *a* және *б* суреттерінде төрт разрядты ТЖҚ-ң схемасы және ақиқат кестесі келтірілген, аталмыш кестеде x_1 және x_2 — адресік кірістер; Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 және F_1, F_2, F_3, F_4 — ТЖҚ мен дешифратор (17.1-суретті қараңыз) шығыстары. Разряд нөмірі $1 < i < 4$ Q_i разрядының шығысындағы кернеу, тиісті шинаға қосылған барлық диодтардың дешифратор шығыстарында оң (нөлге жақын) кернеумен ажыратылған (тым болмағанда бір диод ажыратылған) жағдайда, оң мәнде (нөлге жақын) болады.

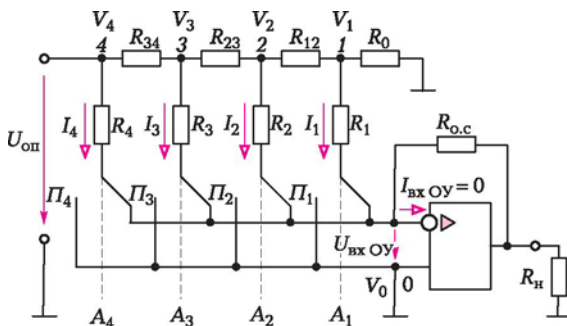
ТЖҚ-ң көмегімен әртүрлі логикалық функцияларды, яғни ақиқат кестелерін, іске асыруға болады, сол арқылы комбинациялық логикалық құрылғыларды логикалық элементтердің көп санымен алмастыруға болады. Бағдарламаланатын логикалық матрицалардың (БЛМ) жұмысы осы принципке негізделген.

Пайдаланушымен бағдарламаланатын ТЖҚ-ң интегралдық схемаларын типтік ұйымдастыру: 32×8 , яғни 32 жадтау ұяшығының әрбірінде 8 разрядтан, 256×4 , 516×4 , 1024×8 және т.б.

17.5. ЦИФРЛЫ-АНАЛОГТЫҚ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕР

Цифрлы-аналогтық түрлендіргіш (ЦАТ) деп (екілік санның) цифрлық код мәнін аналогты шаманың (кернеудің) пропорционал мәніне түрлендіруге арналған құралды айтады. $R_0 = R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 2R$, $R_{12} = R_{23} = R_{34} = R$ резисторларын қамтитын R - $2R$ типті резисторлардың көп буынды тізбегінің (17.15-сурет) негізіндегі ЦАТ кең таралған.

R_1, R_2, R_3, R_4 резисторлары екілік сан кодының A_1, A_2, A_3, A_4 сәйкес разрядтарының 1 не 0 мәндерімен басқарылатын $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$ ауыстырып-қосқыштары арқылы не операциялық күшейткіштің



17.11-сурет

терістейтін кірісіне, не $V_0 = 0$ нөлдік потенциалды 0 нүктесіне қосылады. Бұл ретте ОК идеалды (15.11) деп, яғни оның кірісіндегі кернеу $U_{\text{кпрОК}} = 0$ деп алатын болсақ, резисторлардағы токтар ауыстырып-қосқыштардың күйіне тәуелді болмайды. Бұл ЦАТ-н жоғары дәлдігін білдіреді.

ЦАТ схемасының жұмысын қарастырайық. R_1 және R_0 резисторлары параллель қосылған және олардың кедергілері тепе-тең. Олардың жалпы кедергісі Π_1 ауыстырып-қосқышының кез келген күйінде олармен тізбектей қосылған R_{12} резисторының кедергісіне тең, сондықтан 2-нүктенің потенциалы $V_2 = 2V_1$ тең.

Балама жолмен пайымдай келе, 3, 4-нүктелер мен токтардың мәндерін аламыз:

$$V_3 = 2V_2 = 4V_1, \quad V_4 = 2V_3 = 8V_1;$$

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V_2}{R_2}, \quad I_3 = \frac{V_3}{R_3}, \quad I_4 = \frac{V_4}{R_4},$$

немесе

$$I_4 = \frac{U_{\text{оп}}}{R_4} = 2I_3 = 4I_2 = 8I_1,$$

мұндағы $U_{\text{оп}} = V_4 - V_0 = V_4$ — *тірек кернеу* деп аталатын тұрақтанған тұрақты кернеу. R_1, R_2, R_3, R_4 резисторларындағы токтар мәндерінің қатынастары ауыстырып-қосқышпен басқарылатын екілік сан кодының A_1, A_2, A_3, A_4 разрядтарының «салмақтарына» сәйкес келеді, яғни $2^0 = 1, 2^3 = 2, 2^4 = 4, 2^3 = 8$.

Сәйкесінше ЦАТ шығысындағы кернеудің мәні (15.16)

$$U_{\text{н}} = -R_{0, \text{с}}(I_1 + I_2 + I_3 + I_4)$$

оның кірісіндегі екілік сан кодының мәндеріне пропорционал.

ЦАТ-н негізгі параметрлеріне кіріс және шығыс шамаларының мәндер өзгерістерінің рұқсат етілген диапазондары, тез әрекеттік (5 мкс дейін) және түрлену қателігі жатады. Түрлену қателігі тірек кернеуі көзінің тұрақсыздығымен, электрондық ауыстырып-қосқыштардың және ОК-н идеалды еместігімен анықталады.

17.6. АНАЛОГТЫ-ЦИФРЛЫҚ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕР

Аналогты-цифрлық түрлендіргіш (АЦТ) деп аналогты шама (кернеу) мәндерін цифрлық кодытың (разрядтар саны n екілік санның) пропорционал мәніне түрлендіруге арналға құрылғыны айтады. Параллель және тізбектей АЦТ болады.

Параллель АЦТ аналог шама мәндерін «салмағы» минималды мәнге (квант) өзгешеленетін эталондардың $2^n - 1$ мәндерімен қатар салыстыруға негізделген.

Параллель АЦТ ең төмен түрлендіру уақытына ие. Алайда олар интегралдық атқарым үшін күрделі, құны жоғары және қолданысы шектеулі.

Тізбектей АЦТ аналог шама мәнін эталон мәндерінің тізбектей үдемелі қосындысымен жүйелі салыстыруға негізделген. Бірінші АЦТ-қа бір аналог шаманың мәнін басқа аналог шаманың пропорционал мәніне аралық түрлендіріп (уақыт аралығы, импульстарды бақылау жиілігі және т.б.), артынан цифрлық кодқа түрлендіретін АЦТ да жатады.

АЦТ-ғ негізгі параметрлеріне: кернеудің түрлендірілетін мәндерінің рұқсат етілген диапазоны (3 В дейін); түрлендіру уақыты (тізбектей АЦТ үшін 5 мкс дейін және параллель АЦТ үшін бірлік наносекундқа дейін); разрядтар санымен анықталатын түрлендіру қателігі (әдетте 4, 8, 12).

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Екілік санау жүйесінің, биттің және байттың анықтамасын беріңіз.
2. Жадты және жадсыз логикалық автоматтардың негізгі белгілерін атаңыз.
3. Жадтау құрылғыларының типтерін атаңыз.
4. Ақпаратты аналогты-цифрлық және цифрлы-аналогтық түрлендіргіштер қандай функциялар атқарады?
5. Жадты және жадсыз логикалық автоматтардың мысалдарын келтіріңіз.

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

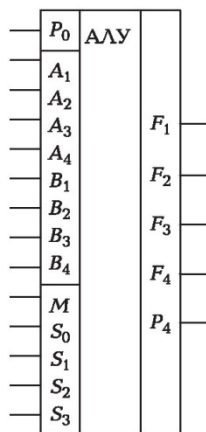
1. Ондық санау жүйесінде берілген 2,5 санын екілік санау жүйесінде беріңіз.
Жауабы: 10,1.
2. Екілік санау жүйесінде берілген 10101, 1001 санын сегіздік санау жүйесінде беріңіз.
Жауабы: 25,44.

МИКРОПРОЦЕССОРЛАР, МИКРОЭЕМ ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ӨЛШЕУШІ АСПАПТАР

18.1. БАҒДАРЛАМАЛАНАТЫН ЦИФРЛЫҚ БАСҚАРУШЫ ҚҰРЫЛҒЫЛАР. МИКРОПРОЦЕССОРЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕР

Бағдарламаланатын цифрлық басқарушы құрылғылар әртүрлі технологиялық процестерді басқару жүйелерінде қолданылатын әмбебап техникалық құралдар болып есептеледі. Мұндай құрылғылардың аппараттық құралдары жеке не жалпы интегралдық схемалар түрінде іске асырылатын, әртүрлі функционалдық мақсаттағы өзара байланысқан цифрлық құрылғылардың жиынтығын қамтиды. Оларға арифметикалық-логикалық құрылғы, жалпы мақсаттағы регистрлер, басқару құрылғысы, жадтау құрылғылары, енгізу-шығару құрылғысы, тактілік импульстар генераторы және т.б. жатады.

Арифметикалық-логикалық құрылғы (АЛҚ) — басқарушы кірістердегі цифрлық кодтың (команданың) мәніне байланысты арифметикалық және логикалық операциялардың аппараттық кірістерінде көп разрядты цифрлық кодтар (сөздер) бойынша орындауға арналған модульдер жинағы түріндегі логикалық комбинациялық автомат. АЛҚ схемасы комбинациялық логикалық құрылғыларды (17.2-бөлімшені қараңыз); логикалық функциялар генераторларын (17.5-суретті қараңыз); жартылай сумматорларды (17.6-суретті қараңыз) және сумматорларды (17.7-суретті қараңыз) қамтиды. 18.1-суретте M , S_0 , S_1 , S_2 , S_3 басқарушы кірістеріндегі сигналдарға және P_0 тасымалына байланысты A және B кіріс сөздері бойынша арифметикалық және логикалық операцияларға арналған төрт разрядты АЛҚ модулінің шартты белгісінің мысалы келтірілген. Операция нәтижесі F кірістеріндегі сигналдар мен үлкен разрядты P_4 тасымалының жиынтығымен анықталады. $M = 0$



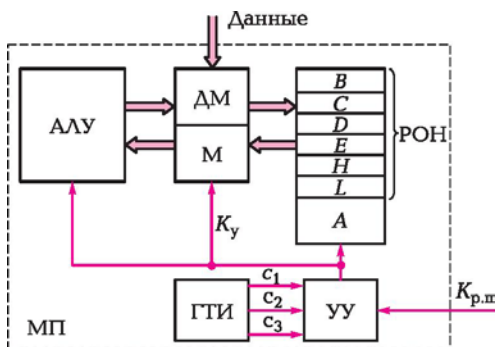
18.1-сурет

кезінде арифметикалық (А мен В-ны қосу, А мен В-ны P_0 -ді кіші разрядқа қосса отырып қосу және т.б.) операциялар, ал $M = 1$ кезінде логикалық ($F = A$, $F = B$ және т.б.) операциялар орындалады. $S_0—S_3$ сигандалдарының комбинациясы дәл қай операцияның орындалатынын анықтайды.

Жалпы мақсаттағы регистрлер (ЖМР) бағдарламалық-қолжетімді ығысу регистрлерінің (17.12-суретті қараңыз) бір түрі болып есептеледі және ол АЛҚ жұмысына жоғар әмбабаптылық үстеуге мүмкіндік береді. Әдетте, олардың саны алтыға тең, олар латын әліпбиінің B, C, L, E, H, L бас әріптерімен белгіленеді және олардың 8 разряды, яғни әрқайсысында 1 байттан бар.

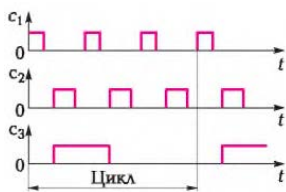
ЖМР қолданылуын келесі мысалмен көрсетеміз. $F = x_1x_2 \vee x_2x_3$ логикалық функциясын іске асыру қажет дейік Әуелі $F_1 = x_1x_2$ осы операцияны орындауға бапталған және АЛҚ-та орналасқан логикалық функциялар генераторының көмегімен есептеледі. Алынған нәтиже B ЖМР-іне беріледі. Одан кейін $F_2 = x_2x_3$ мәні есептеледі де, C ЖМР-іне сақталады. Одан әрі F_1 және F_2 мәндері B ЖМР-інен C ЖМР-іне шығып, $F = F_1 \vee F_2$ логикалық қосуын орындау үшін АЛҚ-ң ақпараттық кірістеріне беріледі. Осылайша, күделі логикалық және арифметикалық операцияларды орындау микрооперацияларға бөлінеді: сигналдарды АЛҚ кірістеріне қосу, басқарушы сигналдардың цифрлық кодын құру және оларды АЛҚ-ң басқаруш кірістеріне қосу, нәтижелерді ЖМР-ге жазу және т.б.

Бағдарламалық-қолжетімді регистрлердің арасында біреуі ерекше бөлініп шығады, ол *аккумулятор* деп аталады және A әрпімен белгіленеді (18.2-сурет). Онда арифметикалық және логикалық операциялардың орындау кезінде операндтардың бірі сақталады. Мысалы, екі санды қосқан кезде олардың бірі аккумуляторға жазы-



Данные – деректер; РОН – ЖМР; АЛУ – АЛҚ; УУ – БҚ; ГТИ - ТИГ
18.2-сурет

лады. Қосу операциясын орындағаннан кейін нәтиже қайтадан аккумуляторға жазылады, ал оның ішінде алдыңғы сақталған нәтиже өшіп қалады. Сыртқы деректер көзі, аккумулятор және ЖМР бағдарламалық-қолжетімді M мультиплексорлары мен DM демультимплексорларының көмегімен АЛҚ-ң шығыс шықпаларына қосылады. Осы барлық құрылғылардың өзара әрекеттесу реттілігін басқару құрылғысы жүзеге асырады.

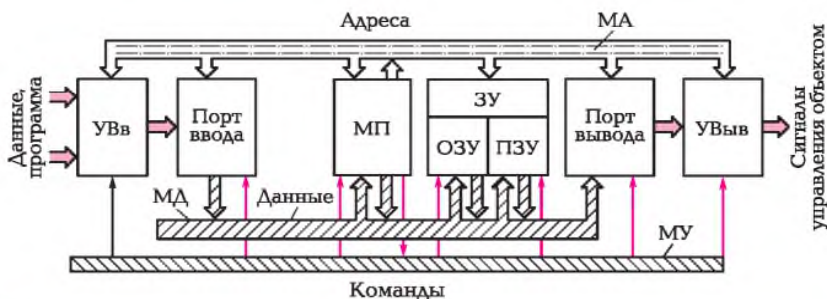


18.3-сурет

Басқару құрылғысы $K_{ж.б}$ жұмыс бағдарламасы командаларының мазмұнын дешифрлейтін және АЛҚ, ЖМР жұмысымен және олардың өз арасында әрекеттесу құрылғыларымен және сыртқы деректер көзімен K_6 басқару командасын қалыптастыратын логикалық автомат болып есептеледі. АЛҚ-тағы микрооперациялар тізбектей орындалады және олардың әрқайсысы белгілі бір уақытты талап етеді, сондықтан БҚ-та операцияларды орындау уақытын микрооперацияларды орындау аралықтарына бөлуге мүмкіндік беретін құрылғы болуы тиіс. Бұл құрылғы – *тактілік импульстар генераторы* (ТИГ), ол әдетте үш және одан да көп c_1 , c_2 , c_3 кірістерінде жиілігі 0,5-40 МГц тактілік импульстарды құрады. Басқару құрылғысы $K_{ж.б}$ жұмыс бағдарламасының командасы бойынша ТИГ жұмысының бірнеше тактісінің ішінде бір микрооперацияны орындауға арналған K_6 командасын құрады, одан кейін басқа бірнеше такт ішінде келесі микрооперацияны орындауға арналған K_6 командасын құрады және т.б. Бір микрооперацияны орындау процесі *цикл* деп аталады (18.3-сурет). Осылайша, K_6 бір командасын орындау бірнеше (бір – бес) циклдің ішінде жүзеге асады, ал ол циклдердің әрқайсысы ТИГ жұмысының бірнеше (үш – бес) тактісінен тұрады.

18.2-суретте штрих сызықтың ішінде белгіленген, интегралдық схемалар түрінде орындалған және бірнеше корпуста не бір корпуста орналасқан құрылғылардың жиынтығы *микропроцессор* (МП) деп аталады.

МП-ң үлкен функционалдық мүмкіндіктерден тұратынына қарамастан, оны тиімді қолдану үшін жұмыс бағдарламасының өзгермейтін бөліктерін сақтауға арналған тұрақты және деректер мен бағдарламаларды уақытша сақтауға арналған жедел жадтау құрылғылары (17.4-бөлімшені қараңыз) мен ақпаратты енгізу-шығару құрылғылары сияқты қосымша құрылғылар қажет. МП мен қосымша құрылғылардың жиынтығы *микропроцессорлық жүйе* деп аталады (18.4-сурет).



18.4-сурет: Данные, программа – деректер, бағдарлама; Адреса – адресстер; Команды – командалар; Сигналы управления объектом – объектіні басқару сигналдары; Порт ввода – енгізу порты; Порт вывода – шығару порты; ОЗУ – ЖЖҚ; ПЗУ – ТЖҚ; УВв – ЕнҚ; УВыв – ШығҚ

МП-жүйелердің арасында басқарушы микроЭЕМ және контроллерлер болып бөлінеді. Олардың ара-жігін ажырату қиын, бірақ әдетте контроллерлердің функционалдық және есептеуіш мүмкіндіктері аз болады.

МП-жүйелердің *енгізу (ЕнҚ) және шығару құрылғысы (ШығҚ)* күшейткіштердің, бағдарламалық-колжетімді регистрлердің және дисплейді, принтерді және т.б. қосуға арналған кілттердің жиынтығы болып есептеледі. Енгізу-шығару құрылғысының әрбір регистрі *порт* деп аталады. Порттар ақпаратты енгізу және шығару процесінде оын қысқа мерзімге сақтау үшін қызмет етеді. ЕнҚ мен ШығҚ аппараттық және бағдарламалық құралдарының жиынтығы *интерфейс* деп аталады.

Басқарушы микроЭВМ мен контроллерлерде көбінесе басқару объектісімен түйіндесу үшін датчиктер, АЦҚ пен ЦАҚ болады.

МП-жүйенің әртүрлі құрылғылары мен МП ішіндегі құрылғылар өз арасында магистральдармен жалғанады. Жадтау құрылғылары ұяшықтарының, порттардың, енгізу-шығару құрылғыларының және МП деректермен алмасатын басқа да құрылғылардың адресстерін беруге арналған *адресстер магистралы (АМ)*; деректерді МП ішінде және одан тыс беруге арналған *деректер магистралы (ДМ)*; МП іс-қимылдарының реттілігін және АМ мен ДМ бойынша адресстер мен деректерді беру бағытын анықтайтын командаларды беруге арналған *басқару магистралы (БМ)* болады.

Кіріс ақпарат операциялар орындалатын *деректерге* және *бағдарламаға*, яғни орындалатын операцияларды сипаттайтын командалардың реттілігіне бөлінеді. Деректер мен бағдарламалар разрядтар саны 8 еселі (1 байт) екілік сандар түріндегі әртүрлі ұзындықтағы сөздердің жиынтығымен беріледі.

ЕнҚ деректері енгізу портына келіп түседі. Басқару сигналдары қажетті портты тандап, деректердің жазылуын, портта уақытша

сақталуын, одан кейін олардың m -разрядты сөздің берілуін қамтамасыз ететін m өткізгіш желілердің жиынтығынан тұратын деректер магистральіне берілуін қамтамасыз етеді. Байланыстарды магистральдық ұйымдастыру кезінде МП-жүйенің элементтері үш күйдің бірінде:

- деректерді магистральға беру;
- деректерді магистральдан қабылдау;
- магистральдан ажырату күйінде болуы мүмкін буферлік

күшейткіштер арқылы бірыңғай магистральға қосылады

Басқару сигналдарымен МП-жүйенің бір элементтерін ақпараты магистральға беру режиміне, екінші элементтерін ақпаратты қабылдау режиміне қоюға, ал қалғандарын ажыратуға болады.

МП жұмысы ЕнҚ-ң тез әрекеттігіне тәуелді болмауы үшін, деректер мен бағдарламалар оны орындар алдында ЖЖҚ-қа жазылады. ЖЖҚ көлемі басқарушы микроЭЕМ үшін бірлік пен ондық килобайтты құрайды ($1 \text{ кбайт} = 2^{10} \text{ байт}$, яғни 1024 сегіз разрядты сөз). Сонымен қатар, сыртқы жад, мысалы магниттік дискілері бар құрылғылар түріндегі сыртқы жад қосылуы мүмкін.

Автономды режимде жұмыс жасайтын басқарушы МП-жүйеде бағдарлама жұмысқа қосар алдында жадтау құрылғысында орналастырылады. Бақыланатын параметрлердің мәндері туралы деректер датчиктерден ЕнҚ-қа үздіксіз, яғни нақты уақыт масштабында түсіп отырады. Олардың жұмысынан кейін ШығҚ шығыстарындағы орындаушы механизмдермен басқару сигналдарын құрады.

Бағдарламаның МП командаларының орындалу реттілігін онда орналасқан *командалар есептегіші* қамтамасыз етеді.

1. Жадтау құрылғысынан бірінші команда оқылады, жадтау құрылғысының бірінші команда сақталатын ұяшығының нөмірі командалар есептігішіне салынады; команда орындалғаннан кейін есептегіштегі сан автоматты түрде 1-ге ұлғаяды, бұл бағдарлама командаларының орындалу реттілігін қамтамасыз етеді.

2. Жадтау құрылғысынан берілген команда бойынша орындалатын операцияның коды және команда орындалатын сандар не олардың (порт не жадтау құрылғысының ұяшығы) адрестері оқылады.

3. Команда орындалады.

«Оқып алу» командасы орындалғаннан кейін жадтау құрылғысының келесі ұяшығындағы команда орындалады да, цикл қайталанады.

МП-да негізгі бағдарламаның командаларын тізбектей орындаудан басқа, оны біраз уақытқа тоқтатып, артынан қайтару қарастырылған. Бұл ретте уақытша сақтау үшін ЖМР ішіндегісі, негізгі бағдарламаның тоқтату нүктесінен кейінгі командасы және басқа да кейбір ақпарат *стек* деп аталатын ЖЖҚ аймағына қойылады. Стек, мысалы, бағдарламалардың тіркелуін ұйымдастыруға мүмкіндік береді, негізгі бағдарлама бір қосалқы бағдарламаны шақыртса, ал ол өз кезегінде, басқа қосалқы бағдарламаны және т.б. шақырта алады.

18.2. ТҰРАҚТЫ КЕРНЕУДІҢ АНАЛОГТЫҚ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ВОЛЬТМЕТРЫ

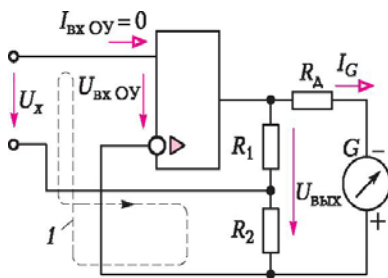
Тұрақты кернеудің аналогты электрондық вольтметрiнiң типтiк схемасы (18.5-сурет) кернеу бойынша терiс тiзбектей керi байланысты ОК негiзiндегi терiстейтiн күшейткiштен (15.6-бөлiмшенi қараңыз) және шкаласы өлшенетiн кернеу мәндерi бойынша градустанатын магниттiк-электрлiк жүйе гальванометрiнiң негiзiндегi есептеушi құрылғысынан тұрады.

(15.11) теңдеудi ескере отырып, Кирхгофтың 1-контурға арналған екiншi заңы және гальванометр тiзбегiне арналған Ом заңы бойынша теңдеулер жүйесiн құрастырайық:

$$\left. \begin{aligned} U_x + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХОУ}} = 0; \\ U_{\text{ВЫХ}} = (R_G + R_A) I_G, \end{aligned} \right\} \quad (18.11)$$

мұндағы R_G және R_A — гальванометр мен үстеме резистор тiзбегiнiң кедергiсi; I_G — гальванометр тiзбегiндегi ток.

(18.1) теңдеулер жүйесiнен гальванометр тiзбегiндегi токтың мынаған тең екенi белгiлi болады:



18.5-сурет

$$I_G = -\frac{R_1 + R_2}{(R_A + R_G)R_2} U_x. \quad (18.2)$$

(18.2) формуланы (5.4) формуласына қойып, қосу полярлылығын ескере отырып, гальванометр шықпасын анықтаймыз:

$$a = \frac{R_1 + R_2}{c_I R_2 (R_A + R_G)} U_x = \frac{1}{c_U} U_x$$

мұндағы c_U — шкала бөлігінің бағамы.

Аналогты электрондық вольтметрдің негізгі артықшылығы – кіріс кедергісі жоғары (10^3 Ом дейін) жағдайда жоғары сезімталдық, есептеуші құрылғының толық шкаласындағы көрсетімдерді оқу кезінде оператор үшін көрнекілік.

Негізгі кемшілігі – төмен дәлдік класы (1,5-тен жоғары емес).

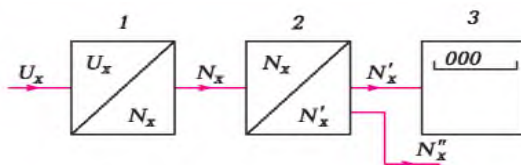
18.3. ТҰРАҚТЫ КЕРНЕУДІҢ ЦИФРЛЫҚ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ВОЛЬТМЕТРІ

Тұрақты кернеудің цифрлық вольтметрінің құрылымдық схемасы (18.6-сурет) 1 кванттаушысынан, 2 кодтар түрлендіргішінен және 3 есептеуші құрылғысынан тұрады.

Кванттаушы деңгей бойынша өлшенетін U_x кернеуін кванттауды, яғни оның мәнін N_x цифрлық кодымен беруді және уақыт бойынша дискреттеуді, яғни тең уақыт аралықтары арқылы өлшеуді жүзеге асырады.

Кодтар түрлендіргіш N_x цифрлық кодын ол арқылы цифрлық есептеуші құрылғыны басқару жүзеге асырылатын N'_x цифрлық кодына, ал кей жағдайда басқа цифрлық құрылғылармен дерек алмасу үшін N''_x цифрлық кодына түрлендіреді.

Кванттаушының болуы тұрақты кернеудің цифрлық вольтметрінің қағидалық ерекшелігі болып табылады. Кванттаушы



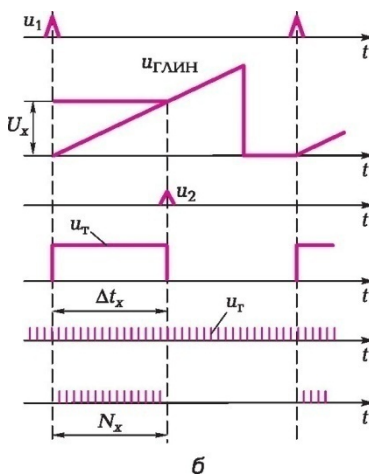
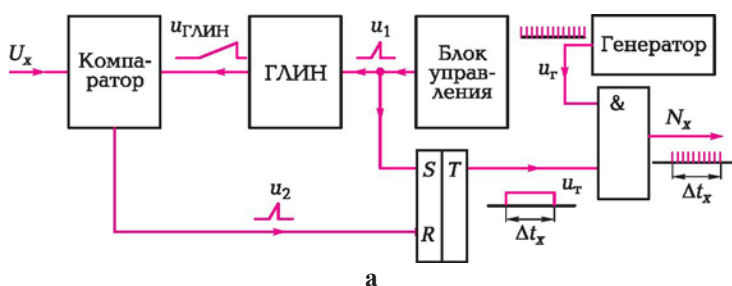
18.6-сурет

өлшенетін кернеудің белгілі бір уақыт аралығындағы лездік (уақыт-импульсті және код-импульсті) және орташа мәндерін (жиіліктік-импульсті және қос тактілі интегралданатын) кванттаушы болып бөлінеді. Орташа мән кванттаушылары *интегралдаушы* деп аталады. Олар егер өлшенетін кернеуді орташалау уақытының аралығында олардың периодтарының бүтін саны бар болса, кернеудің синусоидалық гармоникалары түріндегі бөгеуілдерге аз сезімтал болады.

Уақыт-импульсті кванттаушы негізіндегі вольтметрдің жұмысымен танысумен шектелеміз.

Уақыт-импульсті кванттаушының әрекет ету принципін құрылымдық схемасы және блоктарының жұмысының бір периодының біріккен уақытша диаграммасы көрсетеді (18.7-сурет, а және б)

Кванттаушы блоктарының бірлескен жұмысы басқару блогын,



ГЛИН – СӨКГ; Блок управления – басқару блогы;
18.7-сурет

мысалы шығысында T қайталау периодымен u_1 кернеуінің оң импульстары құрылатын мультивибраторды (16.5-бөл. қараңыз) синхрондайды – *уақыт бойынша дискреттеу*. Бұл кернеу импульстары сызықтық өзгеретін кернеу генераторын (СӨКГ) қосады да, оның шығысындағы RS-триггерді 1-күйге орнатады (кернеу: $u_T > 0$). СӨКГ шығысындағы сызықтық өсетін $u_{\text{СӨКГ}} = St$ кернеуі компаратордың кірісіне беріледі де (16.2-бөлімшені қараңыз), өлшенетін тұрақты U_x кернеуімен салыстырылады.

СӨКГ-ң іске қосылуы басталғаннан бастап Δt_x уақыт аралығынан кейін оның шығысындағы кернеу өлшенетін кернеуге тең болады, яғни $U_x = S\Delta t_x$, мұндағы S — *түрлену тіктігі*. Осы уақыт моментінде компаратор шығысында u_2 кернеуінің оң импульсі қалыптасады, ол оның шығысындағы RS-триггерді 0-күйге орнатады, сондай-ақ жоғары f жиілікті (1,5 МГц дейін) u_T кернеуі импульстарының автономды генераторының шығысы мен кванттаушы шығысының арасындағы байланыс ЖӘНЕ логикалық элементі арқылы тоқтайды. Осылайша, уақыт-импульсті кванттаушыда өлшенетін кернеудің мәні әуелі $\Delta t_x = U_x/S$ уақыт аралығының пропорционал мәніне түрленеді, ол одан кейін импульстардың пропорционал санына түрленеді – *деңгей бойынша кванттау*:

$$N_x = \Delta t_x f = f U_x / S.$$

f жиілігі жоғары, ал S түрлену тіктігі төмен болғандықтан, өлшенетін U_x кернеуінің тіпті төмен мәндеріне де N_x импульстарының көп саны сәйкес келеді, бұл жоғары сезімталдық мен өлшеу дәлдігін қамтамасыз етеді.

Цифрлық электрондық вольтметрдің негізгі артықшылықтары – жоғары сезімталдық және кіріс кедергісі жоғары (10^{10} Ом дейін) жағдайда дәлдік класы, көрсетімдерді цифрлық есептеудің объективтілігі, өлшеу нәтижелерін өңдеу үшін басқа цифрлық құрылғылармен түйіндесу мүмкіндігі.

Негізгі кемшілігі – цифрлық есептеуші құрылғыны ұзақ уақыт бақылап отырған кезде операторды шаршатып жібереді.

18.4. ЭЛЕКТРОНДЫҚ ОСЦИЛЛОГРАФ

Тез өтетін процестерді тіркеу үшін, сондай-ақ электр тізбектері элементтерінің (мысалы, ферромагниттік өзекше гистерезисінің ілмектері (3.12-суретті қараңыз)) жиілігі мен динамикалық сипаттамаларын өлшеу үшін электрондық-сәулелік осциллограф қызмет етеді. Осциллографтар міндеті мен әрекет ету принципі бо-

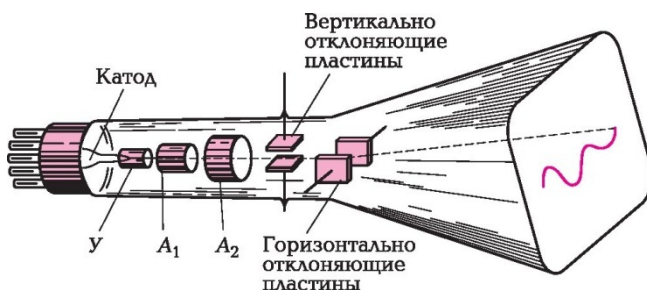
йынша үздіксіз әрекет ететін, жадтайтын және цифрлық осциллографтар болып бөлінеді.

Үздіксіз әрекет ететін осциллограф. Осциллографтың маңызды бөлігі электрондық-сәулелік түтік (18.8-сурет) болып табылады, ол электрондық прожектордан, ауытқытушы жүйеден және экраннан тұрады. Прожектор жіңішке электрондық сәуле тудырады және қыздыратын катодтан, басқарушы U электроды мен екі A_1 және A_2 анодтарынан тұрады.

Электрондарды тездету үшін қажетті электрондық өріс сәуле осынен қатты ауытқыған электрондарды кідіртетін бір немесе бірнеше диафрагмалы толық цилиндрлер болып есептелетін A_1 және A_2 анодтарының жоғары оң потенциалдарымен қамтамасыз етіледі. Бірінші A_1 аноды мен катодтың арасындағы кернеу 500-6000 В-ға тең екінші A_2 аноды мен катодтың арасындағы кернеудің оннан бірінен бастап үштен біріне дейін болады. Басқарушы U электроды катодқа қатысты теріс потенциалдан тұрады және ол сәулелін фокустау, сондай-ақ қажет болған жағдайда оны жабу үшін қызмет етеді.

Электрондық сәулелерді көлденең және тік бағыттарда ауытқыту үшін ауытқытушы тілімдердің екі жұбы қызмет етеді. Өлшенетін жүйелі кернеу тік ауытқытушы тілімге беріледі, оның салдарынан сәулелің тік бағытта (ордината осы бойынша) ауытқуы жүзеге асады. Көлденең ауытқытушы тілімдер өлшенетін кернеуді уақыт бойынша (абсцисса осы бойынша) жаймалау үшін қажет. Көп жағдайда бұл тілімдерге СӨКГ сызықтық өзгеретін кернеу генераторының (16.5-бөлімшені қараңыз) кернеуі жүйелі түрде беріледі.

Экран люминофор қабатымен жабылады, онда қозғалмалы электрондық сәулелің әсерімен өлшенетін кернеудің уақытқа тәуелділігінің жарқыраған ізі пайда болады.



18.8-сурет: Вертикальнo отклоняющие пластины – тік ауытқытушы тілімдер;
Горизонтально отклоняющие пластины – көлденең ауытқытушы тілімдер

Осциллографтың құрылымдық схемасы (18.9-сурет) блоктар мен кілттерден тұрады, олардың көмегімен осциллограф жұмысының әртүрлі режимдерін алады.

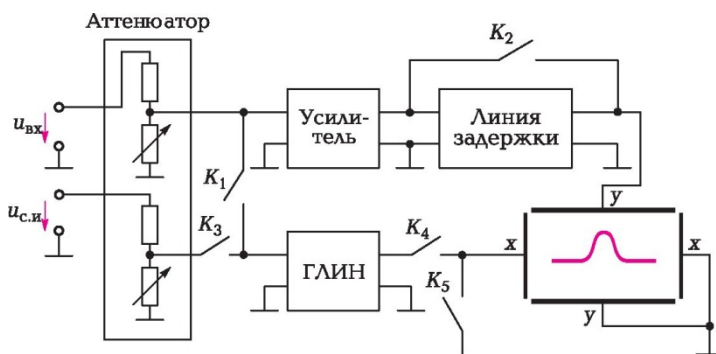
Осциллографтың мынадай жұмыс режимдері бар: ішкі синхрондалатын, сыртқы синхрондалатын, автоматты және арнайы жаймалы.

Ішкі синхрондалатын режимде K_1 , K_4 кілттері жабық болады және $u_{\text{кр}}$ кіріс сигналының кернеуі аттенюатор арқылы, яғни калибренген кернеу бөлгіші арқылы, күшейткіш пен СӨКГ шығыстарына беріледі де, соңғысын жұмысқа қосады. Кернеу СӨКГ шығысынан осциллографтың көлденең ауытқытушы x — x тілімдеріне беріледі, ал экрандағы электрондық сәуленің ізі көлденең бағытта қозғала бастайды. Тік ауытқытушы y — y тіліміне күшейткеннен кейін түсетін кіріс сигналы экранның ортасында орналасуы үшін, оны кідіру сызығының көмегімен біраз Δt уақытына кідірту қажет (18.10-сурет, а).

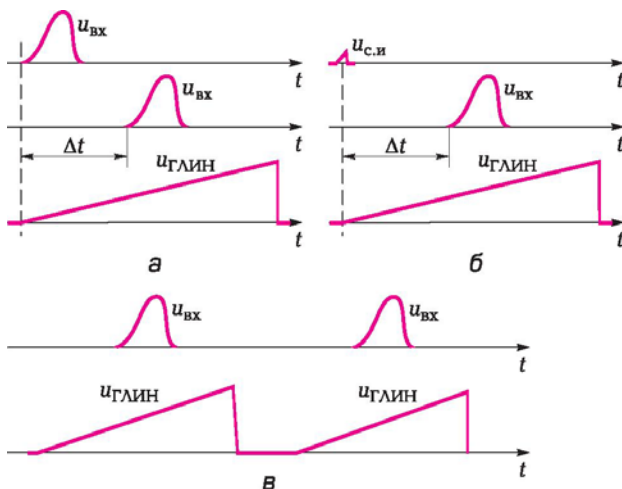
Ішкі синхрондалатын режимнің кемшілігі – кідіру сызығының кіріс сигналы бұрмалануы мүмкін.

Сыртқы синхрондалатын режимде K_2 – K_4 кілттері жабық болады және СӨКГ-ні іске қосу $u_{\text{кр}}$ кіріс сигналының алдында Δt моментінде болатын арнайы $u_{\text{с.и.}}$ синхрондау импульсымен жүзеге асырылады (18.10-сурет, б). Бұл жағдайда кідіру сызығы қажет емес және кіріс сигналы толығырақ естілуі мүмкін.

Автоматты режимде K_2 , K_4 кілттері жабық болады және СӨКГ шығысында f_t жиілікті ара тәрізді кернеу түзіледі. Егер f_t жиілігі осциллограф кірісіндегі жүйелі кернеудің f жиілігімен сәйкес келсе



18.9-сурет: Усилитель – күшейткіш; Линия задержки – кідіру сызығы; ГЛИН - СӨКГ



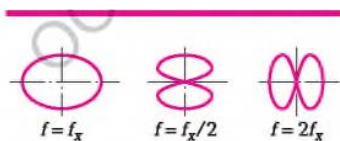
18.10-сурет

немесе оған еселі болса, онда осциллограф экранында жылжымайтын кескін байқалады (18.10-сурет, в).

Арнайы жаймалы режимде K_2 , K_5 кілттері жабық болады және осциллографтың көлденең ауытқытушы тілімдеріне қандай да бір арнайы жүйелі u_x кернеуі беріледі. Сондықтан осциллографтың көмегімен біраз арнайы өлшеулер жүргізуге болады. Мысалы, егер x — x тілімдеріндегі кернеу синусоидалық болса $u_x = U_{mx} \sin 2\pi f_x t$, онда кіріс кернеуінің f жиілігін өлшеуге болады, бұл ретте кіріс кернеуі де ол синусоидалық болып, жиілігі f_x жиілігіне еселі болуы тиіс. f/f_x жиіліктері қатынасының еселігіне байланысты осциллограф экранында әртүрлі фигуралар байқалады (18.11-сурет).

Осциллографтың сезімталдығы деп экрандағы миллиметр бойынша жарық дағының вольт бойынша кіріс кернеуінің мәніне қатынасын айтады. Түтіктің күшейткішсіз сезімталдығы салыстырмалы түрде төмен: 0,5 —1 мм/В. Алайда күшейткішті қолдану осциллографтың сезімталдығын 1 мм/мВ дейін арттырады.

Жадтаушы түтікті осциллограф. Жадтаушы түтікті осциллографта зерттелетін сигналды жазуға және естіртуге арналған екі электрондық прожектор пайдаланылады. Жазу кезінде электрондық сәулелер өз қозғалысының ізі бойынша экранда электр зарядтарын қалдырып,



18.11-сурет

зерттелетін сигналдың көзге көрінбейтін кескінін тудырады.

Естіртуші прожектор оператордың сұратуы бойынша көрінбейтін кескінді жарқырақ кескінге түрлендіреді. Жазылған сигнал жол-жолмен түрленіп, жарқырақ нүктелердің жиынтығымен берілуі мүмкін, ал оның координаталары цифрлық өңдеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Жадтаушы осциллографтардың негізгі қолданылу саласы – тез өтетін бір реттік процестерді зерттеу.

Цифрлық осциллограф. Цифрлық осциллографта уақыт бойынша үздіксіз зерттелетін сигнал цифрлық эквивалентте сигнал мен уақыттың сәйкес мәндері бар нүктелердің реттілігімен бірнеше ондаған мегагерцке дейінгі тактілік жиіліктегі аналогты-цифрлық түрлендіру негізінде (17.6-бөлімшені қараңыз) беріледі. Цифрлық эквиваленттер жедел жадтау құрылғысының ұяшықтарында орналасады және аппараттық өңдеу мен цифрлық өңдеу үшін пайдаланылады.

Кескінді визуалдау үшін әртүрлі электрондық-сәулелік түтіктер және аз габаритті басқарылатын жарық элементтерінің саны көп матрицалық индикаторлы панельдер қолданылады. Координаталары зерттелетін сигнал нүктелерінің реттілік координаталарына сәйкес келетін жарық элементтерін жүйелі қоздыру оның көзге көрінетін кескінін береді.

Цифрлық осциллографтардың негізгі артықшылықтары – күшейткіштерді және үздіксіз сигналдарды өңдейтін басқа да құрылғыларды алып тастау салдарынан жоғары өлшеу дәлдігі, ұзақ уақыт сақтау, жедел естірту және ЖК-мен ұштасу негізінде нәтижелерді математикалық өңдеу мүмкіндігі.

Негізгі кемшілігі – аналогты-цифрлық түрлендірудің шектеулі тактілік жиілігінің салдарынан жиіліктердің шектеулі жолағы.

Уақыт бойынша баяу өзгертін шамалардың (10 Гц дейінгі жиілікті) мәндерін тіркеу үшін электрмеханикалық өзіжазғыш аспаптар қолданылады. Тіркелетін шаманың ағымдағы мәнін жазу «өлшенетін шама – уақыт» координаталарында жылжымалы қағаз таспада жүргізіледі. Өлшенетін шаманың мәні өлшенетін механизмнің жылжымалы бөлігінің, мысалы магниттік-электрлік бөлігінің күйімен айқындалады.

Ақпаратты цифрлық және әріптік нысандарда тіркеу үшін алфавиттік-цифрлық баспа құрылғылары, магнитофондар және дисплейлер қолданылады.

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Бағдарламаланатын басқарушы цифрлық құрылғылардың аппараттық құралдарының құрамына қандай негізгі цифрлық құрылғылар кіреді?
2. Арифметикалық-логикалық құрылғылардың негізгі функцияларын атаңыз.
3. Микропроцессор қандай негізгі құрылғылардан тұрады?
4. Микропроцессорлық жүйе қандай негізгі бөліктерден құралады?
5. Микропроцессорлық жүйеде адресстер, деректер және басқару магистралы қандай функцияларды атқарады?
6. Электрондық цифрлық вольтметрдің құрылымдық схемасы қандай бөліктерден тұрады?

ӘРІПТІК БЕЛГІЛЕР

B — магниттік индукция; реактивті өткізгіштік
 B_r — қалдық магниттік индукция
 C — электрлік сыйымдылық
 $\cos \varphi$ — синусоидалық кернеу мен ток жағдайындағы қуат коэффициенті
 ζ — электр өрісінің кернеулігі
 e — уақытқа тәуелді электр қозғаушы күш (ЭҚК)
 E — тұрақты ЭҚК; периодтық ЭҚК-ң әсерлік мәні
 E_m — ЭҚК-ң амплитудалық мәні
 $\dot{E}$ — ЭҚК кешенді әсерлік мәні
 F — тұйық контур бойындағы магнит қозғаушы күш
 f — тербеліс жиілігі
 G — электрлік активті өткізгіштік
 H — магнит өрісінің кернеулігі
 H_c — коэрцитивті күш
 i — уақытқа тәуелді ток
 I — тұрақты ток; периодтық токтың әсерлік мәні
 I_m — токтың амплитудалық мәні
 $\dot{I}$ — кешенді әсерлік ток
 L — меншікті индуктивтілік
 M — өзара индуктивтілік
 n — трансформация коэффициенті; айналу жиілігі
 p — полюстер жұбының саны
 P — активті қуат
 Q — реактивті қуат; тербеліс контурының сапалылығы
 R — электрлік активті кедергі
 S — толық қуат
 s — жылжу
 u — уақытқа тәуелді электрлік кернеу
 U — тұрақты кернеу; периодтық кернеудің әсерлік мәні
 U_m — кернеудің амплитудалық мәні
 $\dot{U}$ — кешенді әсерлік кернеу
 v — уақытқа тәуелді электрлік потенциал
 V — тұрақты электрлік потенциал

w — орамдар саны
 X — электрлік реактивті кедергі
 Y — толық электрлік өткізгіштік
 $\underline{Y}$ — кешенді өткізгіштік
 Z — толық электрлік кедергі
 $\underline{Z}$ — кешенді кедергі
 δ — шығын бұрышы
 θ — температура
 v — температураның артуы
 τ — уақыт тұрақтысы; ормау қадамы
 Φ — магнит ағыны
 ϕ — синусоидалық кернеу мен токтың арасындағы фазалардың жылжуы
 Ψ — ағын ілінісі
 ψ — бастапқы фаза
 ω — бұрыштық тербеліс жиілігі
 Ω — бұрыштық жылдамдық

2-ҚОСЫМША

НЕГІЗГІ ҚЫСҚАРТУЛАР

АЦП — аналогты-цифрлық түрлендіргіш
 СӨКГ — сызықтық өлшенетін кернеу генераторы
 ПӘК — пайдалы әсер коэффициенті
 АМ — адрес магистралы
 ДМ — деректер магистралы
 МҚК — магнит қозғаушы күш
 МП — микропроцессор
 ЖЖҚ — жедел жадтау құрылғысы
 ОК — операциялық күшейткіш
 ТЖҚ — тұрақты жадтау құрылғысы
 ЖК — жеке компьютер
 ПЛМ — бағдарламаланатын логикалық матрица
 ЖМР — жалпы мақсаттағы регистр
 ЦАП — цифрлық-аналогтық түрлендіргіш
 ЕИМ — ендік-импульсті модуляция
 ЭҚК — электр қозғаушы күш

ХАЛЫКАРАЛЫҚ СИ БІРЛІКТЕР ЖҮЙЕСІНДЕГІ ЭЛЕКТРЛІК ЖӘНЕ МАГНИТТІК ШАМАЛАРДЫҢ НЕГІЗГІ ӨЛШЕУ БІРЛІКТЕРІ

Шама	Негізгі өлшеу бірлігі	
	Атауы	Белгісі
Ток	ампер кулон	А Кл
Электр мөлшері, заряд Потенциал, кернеу, ЭҚК	вольт	В
Электр өрісінің кернеулігі	метрдегі вольт ом	В/м Ом
Электрлік кедергі Электрлік сыйымдылық	фарад	Ф
Магнит ағыны	вебер	Вб
Магниттік индукция	тесла генри	Тл Гн
Индуктивтілік, өзара индуктивтілік Магнит қозғаушы күш	ампер	А
Магнит өрісінің кернеулігі	метрдегі ампер	А/м
Энергия Активті қуат Реактивті қуат	джоуль ватт вольт-ампер реактивті	Дж Вт вар
Толық қуат	вольт-ампер	В-А
Электр өткізгіштік	сименс ом-метр	См Ом - м
Меншікті электрлік кедергі Меншікті электрлік өткізгіштік	метрдегі сименс	См/м

4-ҚОСЫМША

БӨЛШЕКТІК ЖӘНЕ ЕСЕЛІК ӨЛШЕУ БІРЛІКТЕРІНЕ АРНАЛҒАН ПРИСТАВКАЛАР

Бөлшектік және еселік атауы	Белгісі	Негізгі өлшеу бірлігіне қатынасы
Пико	п	10^{-12}
Нано	н	10^{-9}
Микро	мк	10^{-6}
Милли	м	10^{-3}
Сант	с	10^{-2}
Гекто	г	10^2
Кило	к	10^3
Мега	М	10^6

5-ҚОСЫМША

КЕШЕНДІ САҢДЫ МАТЕМАТИКАЛЫҚ ТҮРЛЕНІМДЕР

Кешенді санды беру нысаны	Түрленімі
Алгебралық	$j = \sqrt{-1}; j^2 = -1; 1/(\pm j) = \mp j; (a + jb)(a - jb) =$ $= a^2 + b^2; \frac{1}{a + jb} = \frac{a - jb}{a^2 + b^2}; \frac{1}{a - jb} = \frac{a + jb}{a^2 + b^2}$
Көрсеткіштік	$c_1 e^{j\alpha_1} c_2 e^{j\alpha_2} = c_1 c_2 e^{j(\alpha_1 + \alpha_2)};$ $\frac{c_1 e^{j\alpha_1}}{c_2 e^{j\alpha_2}} = \frac{c_1}{c_2} e^{j(\alpha_1 - \alpha_2)}$

$$ce^{\pm j\alpha} = c \cos \alpha \pm j c \sin \alpha = a \pm jb; a = c \cos \alpha; b = c \sin \alpha; \alpha = \arctg \frac{b}{a};$$

$$ce^{\pm j\frac{\pi}{2}} = \pm jc.$$

- Волынский Б.А.* Электротехника / Б.А.Волынский, Е.Н.Зейн, В.Е.Шатерников. — М. : Энергоатомиздат, 1987.
- Данилов И.А.* Дидактический материал по общей электротехнике с основами электроники / И.А. Данилов, П. М. Иванов. — М. : Мастерство, 2000.
- Данилов И. А.* Общая электротехника с основами электроники / И.А. Данилов, П. М. Иванов. — М. : Мастерство, 2001.
- Евдокимов Ф.Е.* Общая электротехника. — М. : Энергия, 1992.
- Зайчик М. Ю.* Сборник задач и упражнений по теоретической электротехнике. — М. : Энергия, 1978.
- Масленников В. В.* Руководство по проведению лабораторных работ по основам электроники. — М., 1985.
- Федотов В. И.* Основы электроники. — М. : Высшая школа, 1990.
- Чекалин Н.А.* Руководство по проведению лабораторных работ по общей электротехнике. — М., 1983.
- Электротехника и электроника / под ред. В. Г.Герасимова. — М. : Энер- гоиздат, 1996.
- Якубовский С. В.* Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы : справочник / [С. В.Якубовский и др.]. — М. : Радио и связь, 1990.

А

Автоматты ажыратқыш
(автомат) 302
— — кернеу 305
— — кері қуат 307
— — ток 305
Ампер 26
Амплитуда 88
— кешенді 92
Анод 345

Б

Транзистор базасы 350
Байт 432
Қуаттар теңгерімі 55, 121
Шоттки тосқауылы 345
Тиін дөңгелегі 204
— — қосарлы 221
Бит 432

В

Ватт 54
Ваттметр 143
— үш фазалық 169
Варикап 370
Варистор 369
Вебер 61
Вектор айналмалы 90
— бастапқы 92
— кешенді мәндегі 92
Векторлық диаграмма 92
Вентиль 376
Схема тармағы 24
Қоздырғыш 229
Вольт 8
Вольт-ампер 119
Вольт-ампер реактивті 119
Айналмалы магнит өрісі 212
— — — жұмыс 207, 212

— — — ротор 212
— — — статор 206
Ауалық ажыратқыш 309
— майлы 309
— жолдық 300

Г

Гальванометр 140
Генри 77
Герц 85
Гидроагрегат 230
Гидрогенератор 230
Терең енгізу 331

Д

Децибел 122
Джоуль 54
Диаграмма жүктемелік 315
— энергетикалық 183, 213, 285
Дизъюнктор 417
Диод түзеткіш 345
— тірек 348
— жарық шығарушы 370
Контур сапалылығы 111

Е

Электрлік сыйымдылық 10

Ж

Механикалық сипаттамалардың
қатандығы 318

З

Гаус заңы 9
— Кулон 5
— Ом 27
— — кешенді түрде 94
— — жалпылама 39

* Ескерту. Терминдер аударылып, орыс тіліндегі реті бойынша қалдырылды.

- толық ток 62, 63
- электрмагниттік индукция 73, 74
- Кирхгоф заңдары 36, 37
- — кешенді түрде 99
- коммутация 16
- Тұрақтылық запасы 237
- Негізгі емес тасушылар заряды 342
- негізгі тасушылар 342
- бос 10
- байланысқан 11
- Синусоидалық шама мәні әсерлік 89
- — — кешенді 91
- — — максималды 88
- — — лездік 10
- — — орташа 88
- орташа шаршылық 88

И

- Өлшеуіш механизм 137
- — астатикалық 141
- — магниттік-электрлік 138
- — электрлік-динамикалық 142
- — электрмагниттік 140
- Инвертор 336, 374, 375, 417
- Индуктивтілік өзара 80
- сөйілу 174
- меншікті 77
- Электр энергиясының көзі 32, 85
- тәуелді 36
- ток 36
- ЭҚК (кернеу) 35

К

- Катод 345
- Катушка тобы 202
- Дәлдік кластары 133
- күшейткіштер 394
- Машина коллекторы 248
- транзистор 350
- Коммутация баяу 262
- тез 263
- Конвертор 375
- Конденсатор 10
- электролиттік 12
- Контактор 296
- Контроллер 300, 452
- Схема контуры 24
- тербелістік 109, 113
- тәуелсіз 38
- Конъюнктор 417

- Корректор 136
- Коэрцитивті күш 66, 67
- Қуат коэффициенті 214
- кернеу берілісі 121
- пайдалы әсер 183
- тікбұрыштылық 67
- тұрақтандыру 385
- температуралық 348
- трансформация 176
- кернеудің күшеюі 393, 408, 409
- Іске қосу шамаларының еселігі 219
- Бастапқы магниттеу ауытқымасы 66
- — негізгі 68
- Кулон 6

Л

- Маңдай бөліктері 250
- Логометр 146

М

- Магниттік индукция 60
- — қалдық 67
- тұрақты 60
- Магниттік-жұмсақ материалдар 67
- магниттік-қатты 67
- Магнит ағыны 61
- іске қосқыш 299
- Магнит қозғаушы күш (МҚК) 63
- Магнит өткізгіш 61
- Магнит тұрақты 67
- Екі аспап әдісі 167
- кешенді 103
- контурлық токтар 49
- жүктемелік сипаттама 58
- қондыру 52
- тікелей бағалау 131
- бір аспап 167
- салыстыру 131
- орташа шығындар 321
- үш аспап 169
- түйіндік потенциалдар 46
- эквивалентті шамалар 322
- Момент айналмалы 214
- — максималды 215
- — бастапқы іске қосу 219
- динамикалық 313
- инерция 313
- сермеліс 314
- статикалық 313
- тежеуіш 206, 224
- электрмагниттік 257

Вин көпірі 123
 — Т-тәрізді 126
 — Активті қуат 115, 117
 — коммутацияланатын 294
 — кешенді 118
 — механикалық 217
 — лездік 116
 — номиналды 119
 — айнымалы шығындар 219
 — толық 118
 — тұрақты шығындар 219
 — құйынды токтар шығындары 82
 — — гистерезис 82
 — реактивті 118
 — — сыйымдылықты 117
 — — индуктивті 116

Н

Кернеу 8
 — трансформатордың қысқа түйықталуы 179
 — сызықтық 160
 — магниттік 64
 — түйінаралық 48
 — кері 345
 — тірек 385, 447
 — қиылу 352
 — тура 345
 — фазалық 160
 Магнит өрісінің кернеулігі 59
 — — электрлік 6
 Техникалық қанығу 66
 Геометриялық бейтараптама 258
 — физикалық 258
 Бейтарап нүкте 159
 — — жасанды 167

О

Қозу орамасы 248, 286, 287
 — толқынды (тізбектей) 250
 — қайталама 171, 172
 — жоғары кернеу 172
 — төмен кернеу 172
 — бастапқы 170, 171
 — ілмекті (параллель) 250
 Кері байланыс 406
 Шиналар бояуы 291
 Ом 27

П

Кернеудің азаюы 34
 Ойық 202, 203, 248, 249

Коммутация периоды 261
 Шектік статикалық гистерезис ілмегі 66
 — симметриялық жеке 68
 Абсолюттік қателік 131
 — қосымша 134
 — кернеу 195, 196
 — негізгі 133
 — салыстырмалы 131
 — келтірілген 132, 133
 — ток 198
 — бұрыштық 195, 196, 198
 Жартылай өткізгіш 340
 — *n*-типті 341
 — *p*-типті 341
 Полус бас 248
 — қосымша 248
 Полюсті бөлініс 250
 Полюсті ұштық 248
 Уақыт тұрақтысы 18
 — магниттік 60
 — аспап 139
 — есептегіш 148, 149
 — электрлік 5
 — Потенциалдық тосқауыл 344
 Потенциометр 153
 Ағын ілінісі 75
 — толық 80
 — меншікті 76
 — сейілу 174
 Бұрғы қағидасы 60
 — Ленц 78
 Тығынды сақтандырғыш 301
 — түтікшелі 302
 Қабаттасу принципі 52
 Көшкіндік тесіп өту 343
 — жылулық 343
 Өткізгіштік 27
 — сыйымдылықты 97
 — индуктивтік 96
 — кешенді 105
 — меншікті көлемдік 27
 Диэлектрлік абсолюттік өтімділік 9
 — — салыстырмалы 9
 — магниттік абсолюттік 60
 — — салыстырмалы 60
 ҚарсыЭҚК 254

Р

Потенциалдар айырымы 8
 Айырғыш 308

Зәкір реакциясы 232, 257
 Активті транзистор режимі 350
 — генератор 206
 — қозғалтқыш 206
 — транзистордың инверсті 350
 — транзистордың кілттік 355
 — қысқа мерзімді жұмыс 320
 — қысқа тұйықталу 175
 — төмен сигнал 352
 — транзистордың қанығу 351
 — номиналды 175
 — транзистордың қиылу 351
 — қайталама-қысқа мерзімді жұмыс 320
 — тыныштық 351, 392
 — ұзақ мерзімді жұмыс 320
 — жұмыс 175
 — сыртқы синхрондау 459
 ішкі 459
 — бос жүріс 175
 — электрмагниттік тежеуіш 206
 Резистор 28
 — үстеме 143
 Рекомбинация 342
 Реле 292
 Реостат 29
 — іске қосу 220
 Ротор қысқа тұйық-н орамалы 204
 — айқын емес полюсті 229
 — фазалық 204
 — айқын полюсті 229

С

Өздігінен қозу 265
 Өзін-өзі реттеу 272
 Өздігінен синхрондану 241
 Орама секциясы 202, 250
 Коэрцитивті күш 66, 67
 — магнит қозғаушы (МҚК) 63
 — қарсы электр қозғаушы 254
 — бөгде 33
 — электр қозғаушы (ЭҚК) 33
 — электрмагниттік 71
 Сименс 27
 Жылжу 205
 — сыни 215
 Электрлік кедергі 27
 — ішкі 33
 — кіріс 393, 397, 402
 — шығыс 393, 402
 — дифференциалды 54
 — сыйымдылықты 97

— индуктивті 96
 — кешенді 105
 — трансформатордың қысқа тұйықталу 178, 179
 — магниттік 64
 — толық 106
 — синхронды реактивті 233
 — статикалық 56
 — меншікті көлемдік 27
 — сипаттамалы 111
 Стабилитрон 348
 Стабистор 349, 350
 Тұғыр 248
 Статор 201, 202
 Стробтау 419
 Схема 23
 — орналастыру 24
 — жұлдызша 43, 159
 — қағидалық 24
 — үшбұрыш 43, 162

Т

Тесла 61
 Термогенерация 342
 Ток тұрақты 25, 26
 — активті 112, 177
 — құйын 81, 82
 — диффузия 344
 — кешенді 93
 — контурлық 49
 — сызықтық 160
 — кері 345
 — келтірілген 180
 — өткізгіштік 342
 — тура 345
 — іске қосу 219
 — реактивті 112, 177, 238
 — — сыйымдылықты 238
 — — индуктивті 238
 — фазалық 160
 — бос жүріс 177
 Тежеу динамикалық 283
 — қарсы қосу арқылы 284
 Транзистор құрама 354
 Трансформатор 171
 — құрышты 191
 — идеалдандырылған 174
 — көп орамалы 190
 — кернеу 194
 — бір фазалық 173
 — жоғарылатушы 176
 — төмендетуші 176

- күштік 172
- нөлдік шықпалы 377
- өзектік 191
- құрғақ 193
- ток 196
- үш фазалық 173, 184

Трансформатор кернеуінің ішкі азаю
үшбұрышы 179

- қуаттар 118
- кернеулер 109
- кедергілер 109

Турбоагрегат 230

Турбогенератор 230

У

Схема түйіні 24

Ауалық тыныштандырғыш 137

- магнитті-индукциялық 137

Ф

Фаза бастапқы 86

- көз 159

Фазалық көбейткіш 158

Фарад 10

Электрлік сүзгі 122

- активті 411

Х

Амплитудалық-жиіліктік сипаттама
121

- —логарифмалық 122
- вебер-амперлік 78
- сыртқы 34
- вольт-амперлік 34
- қозғалтқыштың табиғи
механикалық 273
- қозғалтқыштың жасанды
механикалық 273
- кулон-вольтты 13
- транзистордың коллекторлық 351
- қозғалт-ң механикалық 217, 273
- жүктемелік 57, 71
- табыстама 404
- синхронды ген-н бұрыштық 236
- машинаның әмбебап 225
- фаза-жиіліктік 121
- трансформатордың бос жүріс 177

Ц

Шкала бөлігінің бағамы 139

Тізбек өлшеуіш 137

- магниттік 61
- тарамдалмаған 104
- электрлік 23 үш
- — фазалық 157

Ч

Жиілік 85

- айналу 211, 212
- шекаралық 403
- бірлік күшею 404
- бұрыштық 88
- — шекаралық 123
- — тоқтың бірлік берілісі 354
- — резонанстық 110,113
- Аспаптың сезімталдығы 134
- қорғау 332

Ш

Орау қадамы 249

Шұнт 143

Щ

Қылшақтар 249

Таратқыш қалқан 304

Э

Электр қозғаушы күш (ЭҚК) 33

- — өзара индукция 81
- — өздігінінен индукциялану 77
- Электрлік магнит 61
- Электрмагниттік индукция 73
- Элемент активті 87
- гальваникалық 33
- сыйымдылықты 97
- индуктивті 95
- логикалық 416 — 418
- қалыпты 152
- пассивті 87
- резистивті 29, 94
- Эмиттер 350
- Магнит өрісінің энергиясы 79
- — электрлік 14

Я

Зәкір 232, 248

Бұғау 185

Алғысөз.....	4
1-тарау. Электр өрісі	5
1.1. Электр өрісінің негізгі қасиеттері мен сипаттамалары	5
1.2. Электр өрісінің өткізгіштер мен диэлектриктерге әсері.....	8
1.3. Электр сыйымдылығы, конденсаторлар мен сыйымдылық элементтері.....	10
1.4. Конденсаторларды жалғау тәсілдері.....	15
1.5. Конденсатордың зарядталу және разрядталуы	16
2-тарау. Тұрақты тоқтың электр тізбектері	22
2.1. Жалпы мағлұматтар.....	22
2.2. Тұрақты токтағы электр тізбегінің элементтері.....	23
2.3. Токтар мен кернеулердің оң бағыттары.....	25
2.4. Ом заңы. Резисторлар мен резистивті элементтер.....	27
2.5. Резисторларды жалғау тәсілдері	30
2.6. Тұрақты токтағы электр энергиясының көзі. Электр қозғаушы күш.....	32
2.7. ЭҚК көзі мен ток көзі.....	34
2.8. Кирхгофтың бірінші және екінші заңдары. Жалпыланған Ом заңы.....	36
2.9. Ом заңын және Кирхгоф заңдарын электр тізбектерін есептеу үшін қолдану.....	39
2.10. Схемаларды баламалы түрлендіру әдісі	42
2.11. Түйіндік потенциалдар әдісі	46
2.12. Контурлық токтар әдісі	49
2.13. Қабаттастыру (суперпозиция) принципі мен әдісі	52
2.14. Тұрақты ток тізбегіндегі жұмыс пен қуат. Энергетикалық теңгерім	54
2.15. Тұрақты тоқтың сызықтық емес электр тізбектері.....	56
3-тарау. Электрмагнетизм	59
3.1. Магнит өрісінің негізгі қасиеттері мен сипаттамалары	59

3.2.	Магниттік тізбек элементтері.....	61
3.3.	Толық ток заңы. Магниттік тізбек күйінің теңдеулері.....	62
3.4.	Ферромагниттік материалдардың магниттік қасиеттері	65
3.5.	Тарадалмаған магниттік тізбекті есептеу	69
3.6.	Электрмагниттік күштер	71
3.7.	Электрмагниттік индукция.....	73
3.8.	Өзіндік индукция, индуктивтілік және индуктивті элемент	76
3.9.	Өзара индукция және өзара индуктивтілік	79
3.10.	Құйынды токтар	81
4-тарау.	Синусоидалық токтағы электр тізбектері	84
4.1.	Жалпы мағлұматтар	84
4.2.	Синусоидалық токтағы электр тізбегінің элементтері	85
4.3.	Синусоидалық токтағы электр энергиясының көздері	85
4.4.	Синусоидалық шамалардың максималды, орташа және әсерлік мәндері.....	88
4.5.	Синусоидалық шамаларды беру тәсілдері.....	89
4.6.	Резистивті, индуктивті және сыйымдылық элементтері үшін кешенді түрдегі Ом заңы.....	94
4.7.	Кирхгофтың кешенді түрдегі бірінші және екінші заңдары	99
4.8.	Синусоидалық ток тізбектерін есептеудің кешенді әдісі	103
4.9.	Элементтерді тізбектей жалғайтын электр тізбегі.....	104
4.10.	Кернеулер резонансы.....	109
4.11.	Тармақтарды параллель жалғайтын электр тізбегі.....	111
4.12.	Токтар резонансы	113
4.13.	Резистивті, индуктивті және сыйымдылық элементтеріндегі энергетикалық процестер.....	114
4.14.	Синусоидалық ток тізбегіндегі активті, реактивті, кешенді және толық қуаттар.....	117
4.15.	Синусоидалық ток тізбегіндегі энергетикалық теңгерім	120
4.16.	Пассивті төрт және үш полюстілер	121
4.17.	Электрлік сүзгілер.....	122
5-тарау.	Электрлік өлшеулер	129
5.1.	Электрлік өлшеу құралдарын, түрлерін және әдістерін жіктеу.....	129
5.2.	Өлшеу қателіктері мен дәлдік кластары	131
5.3.	Электр өлшеуіш аспаптардың энергия тұтынуы.....	134

5.4. Электрмеханикалық көрсетуші аспаптардың механикалық түйіндері.....	135
5.5. Электрмеханикалық аналогтық көрсетуші аспаптар.....	137
5.6. Логометрлер.....	146
5.7. Синусоидалық токтағы электр тізбектеріндегі энергияны өлшеу.....	147
5.8. Көпірлік өлшеу әдістері.....	150
5.9. Өтемдеуші өлшеу әдісі	152
5.10. Электрлік емес шамаларды электрлік өлшеу.....	154
6-тарау. Үш фазалық электр тізбектері.....	157
6.1. Жалпы мағлұматтар	157
6.2. Энергия көзі мен қабылдағыш фазаларын жұлдыз түрінде жалғау.....	159
6.3. Энергия көзі мен қабылдағыш фазаларын үшбұрыштап жалғау.....	162
6.4. Үш фазалық симметриялық қабылдағыштың активті, реактивті және толық қуаттары.....	164
6.5. Үш фазалық симметриялық қабылдағыштың фазаларын үшбұрыш және жұлдыз түрінде жалғау кезіндегі жұмыс шарттарын салыстыру.....	165
6.6. Үш фазалық электр тізбектеріндегі активті қуат пен энергияны өлшеу әдістері.....	166
7-тарау. Трансформаторлар.....	171
7.1. Жалпы мағлұматтар	171
7.2. Бір фазалық трансформатордың жұмыс істеу принципі.....	173
7.3. Трансформатордың бос жүріс режимі.....	175
7.4. Трансформатордың қысқа тұйықталу режимі	178
7.5. Трансформатордың жұмыс режимі	180
7.6. Трансформатордың сыртқы сипаттамасы және ПӘК-і.....	182
7.7. Үш фазалық трансформаторлар	184
7.8. Трансформаторлардың орамаларын жалғау топтары	186
7.9. Трансформаторлардың параллель жұмысы	187
7.10. Бір фазалық және үш фазалық автотрансформаторлар.....	189
7.11. Көп орамалы трансформаторлар.....	190
7.12. Күштік трансформаторлардың магнит өткізгіштері мен орамаларының конструкциялары.....	191
7.13. Өлшеуіш трансформаторлар	194
8-тарау. Синусоидалық токтың электр машиналары.....	201
8.1. Жалпы мағлұматтар.....	201
8.2. Үш фазалық асинхронды машинаның құрылымы.....	201
8.3. Үш фазалық асинхронды машинаның жұмыс режимдері.....	205

8.4. Асинхронды қозғалтқыш статорының айналмалы магнит өрісі.....	206
8.5. Асинхронды қозғалтқыш роторының айналмалы магнит өрісі және жұмыс айналмалы магнит өрісі.....	211
8.6. Асинхронды қозғалтқыштың энергетикалық теңгерімі және ПЭК-і.....	213
8.7. Асинхронды қозғалтқыштың айналу моменті және механикалық сипаттамасы.....	214
8.8. Асинхронды қозғалтқыштың жұмыс сипаттамалары	217
8.9. Асинхронды қозғалтқышты іске қосу	219
8.10. Асинхронды қозғалтқыштардың айналу жиілігін реттеу әдістері.....	223
8.11. Үш фазалық асинхронды машинаның генератор және электрмагниттік тежеуіш режимдеріндегі жұмысы.....	225
8.12. Екі фазалық және бір фазалық асинхронды қозғалтқыштар ...	226
8.13. Үш фазалық синхронды машинаның құрылымы	229
8.14. Үш фазалық синхронды машинаның жұмыс режимдері.....	230
8.15. Синхронды генератор фазаларының электрлік күйінің теңдеуі.....	232
8.16. Жоғары қуатты электр жүйесіндегі синхронды генератордың жұмысы.....	234
8.17. Синхронды генератордың электрмагниттік моменті және бұрыштық сипаттамасы	236
8.18. Синхронды генератордың U-тәрізді сипаттамасы	238
8.19. Синхронды генератордың активті және реактивті қуаттарын реттеу.....	240
8.20. Синхронды генераторды электр жүйесіне параллель қосу.....	241
8.21. Синхронды қозғалтқыш фазасының электрлік күйінің теңдеуі, алмастыру схемасы және векторлық диаграммасы.....	242
8.22. Синхронды қозғалтқыштың электрмагниттік моменті, бұрыштық және U-тәрізді сипаттамалары.....	243
8.23. Синхронды қозғалтқыштың активті және реактивті қуаттарын реттеу.....	244
8.24. Синхронды қозғалтқышты іске қосу	245
9-тарау. Тұрақты тоқтағы электр машиналар	247
9.1. Жалпы мағлұматтар.....	247
9.2. Тұрақты тоқтағы электр машинаның құрылысы	248
9.3. Атанақты зекір орамалары	250
9.4. Тұрақты ток машинасының жұмыс режимдері.....	251

9.5. Тұрақты ток машиналарының электр қозғаушы күші және электрмагниттік моменті.....	256
9.6. Тұрақты ток машиналарындағы зәкір реакциясы	257
9.7. Тұрақты ток машиналарындағы коммутация	261
9.8. Тәуелсіз қозатын генератор	263
9.9. Параллель қозатын генератор	265
9.10. Тізбектей және аралас қозатын генераторлар.....	268
9.11. Параллель қозатын генераторлардың параллель жұмысы.....	270
9.12. Тұрақты ток қозғалтқыштарының жалпы қасиеттері мен сипаттамалары.....	272
9.13. Параллель қозатын қозғалтқыш	274
9.14. Тізбектей қозатын қозғалтқыш	278
9.15. Аралас қозатын қозғалтқыш	281
9.16. Тұрақты ток қозғалтқыштарын реверстеу және тежеу.....	282
9.17. Тұрақты ток машиналарының энергетикалық теңгерімі және ПЭК-і.....	285
9.18. Синусоидалық токтың коллекторлық қозғалтқыштары	286
9.19. Тұрақты токтың контактісіз (вентильді) қозғалтқыштары.....	288
10-тарау. Электрлік автоматика және басқару аппараттары	290
10.1. Жалпы мағлұматтар	290
10.2. Электрлік контакт механизмі	291
10.3. Электрмеханикалық реле	292
10.4. Электр энергиясын қабылдағыштарды басқаратын электрлік аппараттар.....	296
10.5. Электр энергиясын тарататын электрлік аппараттар.....	301
10.6. Автоматтардың ағытқыштары	304
10.7. Жоғары кернеуді ажыратқыштар	308
10.8. Қадамдық қозғалтқыштар	309
11-тарау. Электр жетек негіздері	311
11.1. Жалпы мағлұматтар.....	311
11.2. Электр жетек қозғалысының теңдеуі	312
11.3. Электр жетектердің өндірістік механизмдерінің механи- калық сипаттамалары және жүктемелік диаграммалары	314
11.4. Электр қозғалтқышты қыздыру және салқындату.....	316
11.5. Электр қозғалтқыштың түрі мен типін таңдау.....	318

11.6. Электр қозғалтқыштар жұмысының номиналды режимдері	320
11.7. Электр қозғалтқыштың қуатын есептеу және оны таңдау	321
11.8. Электр жетекті басқару	325
12-тарау. Электр энергиясын беру және тарату	330
12.1. Электрмен жабдықтау жүйелері туралы ұғымдар	330
12.2. Электр желісінің сымдарын таңдау	333
12.3. Техникалық электр қорғаныс құралдары	335
13-тарау. Жартылай өткізгіш аспаптар	340
13.1. Жартылай өткізгіштер туралы мағлұматтар	340
13.2. Жартылай өткізгіштердегі контактілік құбылыстар	343
13.3. Жартылай өткізгіш диодтар	345
13.4. Биполярлық транзисторлар	350
13.5. Далалық транзисторлар	357
13.6. Жоғары қуатты толық басқарылатын транзисторлық кілттер	365
13.7. Тиристорлар	367
13.8. Жартылай өткізгіш резисторлар, конденсаторлар, оптоэлектрондық аспаптар	370
13.9. Жартылай өткізгіш аспаптарды таңбалау	372
14-тарау. Электрондық түзеткіштер және стабилизаторлар	375
14.1. Электрондық түрлендіргіш құрылғыларды жіктеу	375
14.2. Басқарылмайтын бір фазалық түзеткіштер	376
14.3. Басқарылмайтын көп фазалық түзеткіштер	380
14.4. Кернеу мен ток стабилизаторлары	384
15-тарау. Электрондық күшейткіштер	389
15.1. Электрондық күшейткіштерді жіктеу	389
15.2. Биполярлық транзисторлардағы күшейткіш каскадтар	391
15.3. Далалық транзисторлардағы күшейткіш каскадтар	397
15.4. Тұрақты токтағы дифференциалды күшейткіш каскад	399
15.5. Операциялық күшейткіштер	401
15.6. Күшейткіштердегі кері байланыс	406
15.7. Теріс кері байланысты күшейткіштер	407
15.8. Қуат күшейткіштер	411
16-тарау. Электрондық генераторлар және импульсті құрылғылар	413
16.1. Синусоидалық тербеліс генераторлары	413
16.2. Операциялық күшейткіш жұмысының сызықтық емес режимі. Компаратор	414

16.3. Транзистор жұмысының кілттік режимі	415
16.4. Логикалық элементтер	416
16.5. Уақытша тұрақты күйлі электрондық импульсті құрылғылар.....	420
16.6. Тұрақты күйлі электрондық импульсті құрылғылар. Триггерлер.....	427
17-тарау. Электрондық цифрлық құрылғылар	432
17.1. Цифрлық логикалық автоматтардың арифметикалық негіздері.....	432
17.2. Жадсыз цифрлық логикалық автоматтар	434
17.3. Жадты цифрлық логикалық автоматтар.....	440
17.4. Адрестік іріктемелі цифрлық логикалық автоматтар. Жадтау құрылғылары	444
17.5. Цифрлы-аналогтық түрлендіргіштер	446
17.6. Аналогты-цифрлық түрлендіргіштер	447
18-тарау. Микропроцессорлар, микроЭЕМ және электрондық өлшеуіш аспаптар	449
18.1. Бағдарламаланатын басқарушы цифрлық құрылғылар. Микропроцессорлық жүйелер	449
18.2. Тұрақты кернеудің аналогтық электрондық вольтметрі.....	454
18.3. Тұрақты кернеудің цифрлық электрондық вольтметрі	455
18.4. Электрондық осциллограф	457
Қосымшалар.....	463
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	467
Пәндік көрсеткіш.....	468

Оқу басылымы

**Немцов Михаил Васильевич,
Немцова Марина Леонидовна**

Электротехника және электроника

Оқулық

Редакторлар *Л. В. Честная, М.С. Советова*
Техникалық редактор *Н. И. Горбачева*
Компьютерлік беттеу: *Г. Ю. Никитина*
Корректорлар *В. А. Жилкина, Г.Н.Петрова*

Бас. № 108112107. Қол қойылған күні 28.05.2015. Формат 60 x 90/16.
«Таймс» гарнитурасы. Офсеттік қағаз № 1. Офсеттік баспа. Шарт. бас. п. 30,0.
Тираж 3 000 дана. Тапсырыс №

«Академия» баспа оралығы» ЖШҚ. www.academia-moscow.ru
129085, Мәскеу, Мир даңғылы, 101В, 1-б.
Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.

Санитариялық-эпидемиологиялық қорытынды № РОСС RU. АЕ51. Н 16679 25.05.2015.

«Саратовский полиграфкомбинат» ААҚ-та баспа ұсынған электрондық
жеткізгіштерден басылған. www.sarpk.ru
410004, Саратов қ., Чернышевский к-сі, 59