

R.Z.Kazımrzadə, C.S.Əsgərov

ELEKTROTEKNIKA, RADIO TEKNIKA VƏ ELEKTRONIKA

ali texniki məktəblər üçün dərslik

BAKİ – 2013

R.Z.Kazmzadə, C.S.Əsgərov

ELEKTROTEHNİKA, RADIOTEHNİKA VƏ ELEKTRONİKA

ali texniki məktəblər üçün dərslik

**Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyi tərəfindən
təsdiq edilmişdir**

BAKİ – 2013

- Rəyçilər: 1. AMEA-nın müxbir üzvü, əməkdar elm xadimi,
Sumqayıt Dövlət Universitetinin “Elektromexanika”
kafedrasının müdiri t.e.d.,
professor **Firudin Məmmədov**
2. Azərbaycan Dövlət Neft Akademiyasının
“Geofiziki kəşfiyyat üsulları” kafedrasının prafessoru,
g.-m.e.d., **Tofiq Əhmədov**
3. Sumqayıt Dövlət Universitetinin “Elektrotexnika”
kafedrasının müdiri, t.e.n., dosent **Tamilla Əhmədova**

Elmi redaktor: akademik **Arif HƏŞİMOV**

**RƏNA KAZIMZADƏ, CAVİD ƏSGƏROV.
ELEKTROTEHNİKA, RADIOTEHNİKA VƏ
ELEKTRONİKA.** Dərslik, Bakı. ADNA 2013-ci.il. 393 səh.

Dərslikdə geofizika mühəndisliyi ixtisaslaşması üzrə təhsil alan ali məktəb tələbələrinə elektrotexnika, radiotexnika və elektronikaya dair müfəssəl nəzəri və praktiki məlumat verilir.

Dərslikdə bir-biri ilə əlaqədar fənlər müvafiq ardıcılıqla şərh edilmişdi. Elektrotexnika, radiotexnika və elektronika fənni tədris proqramına uyğun: sabit və dəyişən cərəyan elektrik dövrələrindən, elektromaqnit dövdələrlərindən, xətti elektrik dövrələrində keçid proseslərindən, transformatorlardan, asinxron maşınlardan, radiotexnika və elektronikadan bəhs edilmişdir.

Dərslikdən qeyri-elektrotexnika ixtisasları üzrə təhsil alan ali məktəb tələbələri, elmi işçilər, eləcə də istehsalatda çalışan mühəndis-texniki işçilər istifadə edə bilərlər.

@ RənaKazımzadə

I fəsil

SABİT CƏRƏYAN ELEKTRİK DÖVRƏLƏRİ

1.1. Sadə və mürəkkəb sabit cərəyan elektrik dövrələri

Ümumi məlumat. İlk elektrik enerji mənbələri qalvanik elementlər olduğuna görə elektrotexnika elmi sabit cərəyan əsasında inkişaf etmişdir. Elektrik dövrəsinin əsas qanunları Om və Kirxhof, habelə elektrik cərəyanının istilik, elektromaqnit və elektrokimyəvi təsirlərinin qanunauyğunluqları məhz sabit cərəyan əsasında kəşf olunmuşdur. Sənayedə bir çox elektrik işlədicilərini sabit cərəyansız işlətmək olmur. Həmin işlədicilər ya texnoloji şərtlərə (elektrokimya), ya da texniki-iqtisadi üstünlüklərə görə (elektrik nəqliyyatı, bəzi sənaye elektrik mühərrikləri) sabit cərəyanla işləməlidir. Odur ki, sabit cərəyan işlədicilərini elektrik enerjisi ilə qidalandırmaq üçün çox vaxt dəyişəni sabitə çevirən müxtəlif çeviricilərdən (elektromaşın, elektron-ion, yarımkeçirici), az-az hallarda isə akumulyatorlardan, sabit cərəyan generatorlarından və termoelektrik batareyalarından istifadə edilir.

Ən sadə sabit cərəyan dövrəsi. Ən sadə sabit cərəyan dövrəsi generatordan (sabit elektrik enerji mənbəindən), işlədicidən və əlaqələndirici naqillərdən ibarətdir.

Generatorun elektrik hərəkət qüvvəsinin (e.h.q.) təsiri altında qapalı dövrədə elektrik yüklərinin nizamlı hərəkəti təmin olunur və buna elektrik cərəyanı deyilir. Cərəyanın qiyməti vahid zamanda naqilin en kəsiyindən keçən elektrik yüklərinin miqdarı ilə təyin edilir.

Əgər cərəyanın qiyməti zamanla əlaqədar dəyişmirsə, onda

$$I = \frac{q}{t} \text{ A} \qquad 1\text{A} = \frac{1\text{K}}{1\text{san}} \qquad (1.1)$$

olur.

Elektrik potensialının azalması və ya ona bərabər qiymətdə potensiallar fərqi dövrə hissəsinin elektrik gərginliyi, yaxud sadəcə olaraq gərginlik adlanır:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1.2}}{q} \text{ V} \qquad 1\text{V} = \frac{1\text{C}}{1\text{K}} \qquad (1.2)$$

Elektrik enerjisinin dönmədən istilik enerjisinə çevrilməsi prosesi gedən dövrə elementinə elektrik müqaviməti deyilir və sxemlərdə ikisıxanlı uzunsov düzbucaqlı şəklində işarə edilir:

$$r = \rho \frac{l}{S} \qquad (1.3)$$

yaxud

$$r = \frac{1}{g} \qquad (1.4)$$

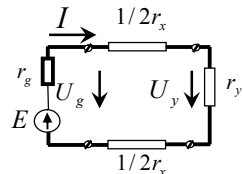
Beynəlxalq vahidlər sistemində (BS) elektrik müqaviməti Om ilə, keçiricilik isə Simens ilə ölçülür:

$$1 \text{ Om} = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}}; \qquad 1 \text{ Sim} = 1 \frac{\text{A}}{\text{V}} = \frac{1}{\text{Om}}$$

Om qanununa görə dövrə hissəsində axan cərəyan I bu hissədəki gərginliklə düz mütənəsbdir:

$$I = Ug = \frac{U}{r} \qquad (1.5)$$

Qapalı elektrik dövrəsində hər bir element (generator, işlədici, xətt) elektrik müqavimətinə malikdir (şək. 1.1) və ardıcıl birləşmiş bu element-



Şəkil 1.1. Budaqlanmayan sabit cərəyan dövrəsi

lərdən eyni bir cərəyan axacaq. Bu cərəyanın qiyməti mənbənin e.h.q. ilə düz, dövrənin ümumi müqaviməti ilə tərs mütənasibdir:

$$I = \frac{E}{r_g + r_x + r_y} = \frac{E}{r_g + r_{xar}} \quad (1.6)$$

burada r_g – generatorun müqaviməti; r_x – xətt məfəllərinin müqaviməti; r_y – yükün (elektrik işlədicisinin) müqaviməti; $r_{xar} = r_x + r_y$ – xarici dövrənin ümumi müqaviməti.

Bu düstur qapalı dövrə üçün Om qanununun ifadəsidir, onu belə də ifadə etmək olar:

$$E = Ir_g + Ir_{xar} \quad (1.7)$$

Cərəyanla müqavimətin hasilinə (Ir) dövrə hissəsində gərginlik düşgüsü deyilir.

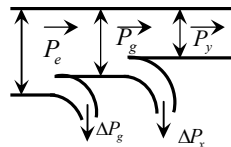
Elektrik enerji mənbəinin əsas xarakteristikalarından biri olan e.h.q.-si onun daxilindəki (Ir_g) və onun xarici hissəsindəki (Ir_{xar}) gərginlik düşgülərinin cəminə bərabərdir.

Güclər balansı. Energetik diaqram (1.7) tənliyinin hər tərəfini I cərəyanına vursaq, alarıq:

$$EI = I^2 r_g + I^2 r_{xar} = I^2 r_g + I^2 r_x + I^2 r_y \quad (1.8)$$

$P_e = EI$ hasilı mənbənin yaratdığı tam elektrik gücünü ifadə edir. Bu gücün bir hissəsi $\Delta P_g = I^2 r_g$ istilik şəklində mənbənin özündə itir. $P_g = P_e - \Delta P_g$ fərqi mənbənin xarici dövrəyə verdiyi gücü ifadə edir.

Xəttin məfəllərində də gücün bir hissəsi $\Delta P_x = I^2 r_x$ istilik şəklində itir. Yerdə qalan güc $P_y = I^2 r_y = U_y I$ yük tərəfindən tələb olunur. Əyani olmaq üçün güclər balansı energetik diaqram şəklində verilir (şək. 1.2).



Şəkil 1.2. Ən sadə sabit cərəyan dövrəsinin energetik diaqramı

Müasir generatorların daxilində güc itkisi nisbətən kiçikdir.

Güclü elektrik generatorları 0,95 və daha yüksək faydalı iş əmsalına (f.i.ə.) malikdir.

Eyni bir gücü $P_y = U_y I$ işlədicilərə ötürdükdə, gərginlik nə qədər kiçikdirsə, xətdən axan cərəyan bir o qədər böyük olacaq. Xətdəki güc itkisi cərəyanın kvadratı ilə düz mütənasib olduğuna görə gərginliyi 10 dəfə artırısaq, güc itkisi 100 dəfə azalar. Odur ki, elektroenergetika qurğularında getdikcə daha yüksək gərginliklər tətbiq edilir.

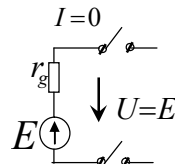
Elektrik dövrəsinin iş rejimləri. Elektrik dövrəsinin və onun elementlərinin mümkün olan iş rejimlərindən ən xarakterik olanları dördəddir: nominal rejim, yüksüz işləmə (y.i.) rejimi, qısaqapanma (q.q.) rejimi və əlaqələndirilmiş rejim.

Nominal (normal) rejim. Elektrik dövrəsində mənbələrin və işlədicilərin normal və ya nominal rejimi onunla xarakterizə edilir ki, onların cərəyan, gərginlik və güclərinin qiymətləri hazırlayıcı zavod tərəfindən hesablanmış qiymətlərə uyğun olsun. Belə halda ən yaxşı iş şərtləri təmin edilir (qənaətlilik, uzun müddət işləmək və s.).

Nominal rejimi təyin edən xarakterik kəmiyyətlər, adətən, quruluşun pasportunda və yaxud bilavasitə ona bərkidilmiş lövhəcikdə göstərilir. Bu kəmiyyətlər tərkibinə uyğun elementlər daxil olan elektrik sxemlərini hesabladıqda bir əsas kimi götürülür. Məsələn, közərmə lampasının müqaviməti onun kolbasında və yaxud sokolunda göstərilmiş nominal gücünə və nominal gərginliyinə görə təyin edilə bilər

$$r = \frac{U_n^2}{P_n} \quad (1.9)$$

Yüksüz işləmə rejimi. Elektrik dövrəsinin və yaxud onun ayrı-ayrı mənbə və işlədicilərinin cərəyanı sıfırırsa, onun rejiminə *yüksüz işləmə rejimi* deyilir.



Şəkil 1.3 Mənbənin yüksüz işləmə rejimi

Mənbənin yüksüz işləmə rejimindən onun e.h.q.-ni ölçmək üçün istifadə etmək olar.

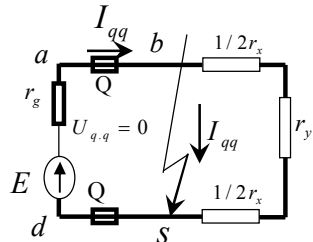
Dögrudan da, mənbənin sıxaclarındakı gərginlik istənilən halda $U = E - I r_g$. Yüksüz işləmədə $I = 0$ və $U = E$, yəni mənbənin sıxaclarında yüksüz işləmə gərginliyi onun e.h.q.-nə bərabərdir (şək. 1.3).

Qısaqapanma rejimi. Əgər dövrənin hər hansı hissəsinə qoşulmuş iki nöqtə arasındakı müqavimət normal qiymətdən dəfələrlə kiçikdirsə və praktik olaraq sıfıra yaxınlaşırsa, onda dövrənin bu hissəsində qısaqapanma baş verib, deyirlər. Qısaqapanma, adətən, cərəyan keçirən hissələrin izolyasiyasının zədələnməsi nəticəsində baş verir.

Qısaqapanma rejimi qısaqapanmış hissədə gərginliyin sıfır olması ilə xarakterizə edilir:

$$U_{q.q.} = 0$$

Generatorun sıxaclarında qısaqapanma baş verərsə, xarici müqavimət sıfıra yaxınlaşar və generatorun cərəyanı ən böyük qiyməti alar.



Şəkil 1.4/ Mənbənin qısaqapanma iş rejimi

$$I_{q.q.} = \frac{E}{r_g} \quad (1.10)$$

Bu qiymət nominal yük cərəyanından dəfələrlə böyük ola bilər. Qısaqapanmalar elektrik qurğuları üçün böyük təhlükə təşkil edir, çünki elektrik avadanlığının işdən çıxmasına və normal iş rejiminin uzun müddət pozulmasına səbəb ola bilər (şək. 1.4-dəki sxemdə mühafizə quruluşları əriyən qoruyucular Q göstərilmişdir).

Əlaqələndirilmiş rejim. Mənbənin və xarici dövrənin əlaqələndirilmiş iş rejimi o rejimə deyilir ki, bu zaman xarici dövrənin müqaviməti mənbənin daxili müqavimətinə bərabər olsun. Əlaqələndirilmiş iş rejimi zamanı mənbə xarici dövrəyə ən böyük güc verir. Mənbənin verdiyi güc:

$$\mathbf{P} = \mathbf{I}^2 \mathbf{r}_{\text{xar}} = \left(\frac{\mathbf{E}}{\mathbf{r}_{\text{g}} + \mathbf{r}_{\text{xar}}} \right)^2 \mathbf{r}_{\text{xar}} \quad (1.11)$$

$\frac{d\mathbf{p}}{d\mathbf{r}_{\text{xar}}}$ törəməsini sıfıra bərabər edək:

$$\frac{d\mathbf{p}}{d\mathbf{r}_{\text{xar}}} = \mathbf{E}^2 \frac{(\mathbf{r}_{\text{g}} + \mathbf{r}_{\text{xar}})^2 - 2\mathbf{r}_{\text{xar}}(\mathbf{r}_{\text{g}} + \mathbf{r}_{\text{xar}})}{(\mathbf{r}_{\text{g}} + \mathbf{r}_{\text{xar}})^4} = 0$$

buradan $\mathbf{r}_{\text{g}} = \mathbf{r}_{\text{xar}}$ - alırıq.

Bu münasibət maksimal gücün alınma şərtidir (ikinci törəmə $\left(\frac{d^2\mathbf{p}}{d\mathbf{r}_{\text{xar}}^2} \right) < 0$).

$\mathbf{r}_{\text{xar}}$ -nin istənilən qiymətində faydalı iş əmsalı

$$\mathbf{z} = \frac{\mathbf{I}^2 \mathbf{r}_{\text{xar}}}{\mathbf{I}^2 (\mathbf{r}_{\text{g}} + \mathbf{r}_{\text{xar}})} = \frac{1}{\frac{\mathbf{r}_{\text{g}}}{\mathbf{r}_{\text{xar}}} + 1} \quad (1.12)$$

Əlaqələndirilmiş iş rejimi zamanı

$$\mathbf{z} = \frac{1}{1+1} = 0,5$$

Ən böyük verilən güc

$$\mathbf{P}_{\text{max}} = \mathbf{I}^2 \mathbf{r}_{\text{xar}} = \left(\frac{\mathbf{E}}{2\mathbf{r}_{\text{g}}} \right)^2 \mathbf{r}_{\text{g}} = \frac{\mathbf{E}^2}{4\mathbf{r}_{\text{g}}} \quad (1.13)$$

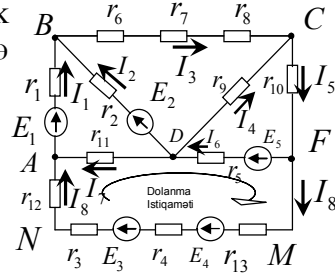
Əlaqələndirilmiş iş rejimindən radioelektronika sxemlərində geniş istifadə edilir.

Kirxhof qanunları. Mənbə və işlədicilərin paralel və ardıcıl birləşdirilməsi nəticəsində alınmış mürəkkəb elektrik dövrələrini analiz etdikdə və hesabladıqda elektrik sxemini tərtib edib bütün birləşmələri göstərmək lazımdır.

Eyni bir cərəyan axan bir neçə ardıcıl bağlanmış elementlər budaq təşkil edir. Xüsusi halda budaqda bir element də ola bilər. Üç və daha çox budaqların birləşdiyi yerlərə düyün nöqtələri və yaxud düyünlər deyilir. Düyünlər sxemdə nöqtələrlə göstərilir. Hərflər yaxud rəqəmlərlə işarə edilir. Şəkil 1.5-də göstərilmiş sxemdə beş düyün (**A**, **B**, **C**, **D**, **F**) və səkkiz budaq vardır. Qapalı elektrik dövrəsi təşkil edən budaqların birliyinə kontur deyilir (məsələn **ABDA**, **ADFMNA**). E.h.q. olan kontur və budaqlar aktiv, əks halda passiv adlanır.

Fizika kursundan məlumdur ki, mürəkkəb elektrik dövrələri üçün Kirxhofun 1-ci və 2-ci qanunlarının tənliklərini yazmaq olar. Bu qanunlardan cərəyanın və e.h.q.-lərin sabit və ani qiymətləri üçün elektrik dövrələri nəzəriyyəsində istifadə edilir. Qanunları yadıma salaq.

Kirxhofun 1-ci qanunu belə ifadə edilə bilər: elektrik dövrəsinin budaqlanma nöqtəsində (düyündə) cərəyanların cəbri cəmi sıfıra bərabərdir:



Şəkil 1.5. Mürəkkəb sabit cərəyan dövrəsinin sxemi

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (1.14)$$

Bu zaman düyün nöqtəsinə gələn cərəyanları bir işarə ilə (ixtiyari seçilmiş), düyün nöqtəsindən çıxanları isə əks işarə ilə göstərmək lazımdır.

Şəkil 1.5-dəki sxemin B düyünü üçün Kirxhofun 1-ci qanununun tənliyini yazaq:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

Kirxhofun 2-ci qanunu belə ifadə edilir: hər hansı qapalı konturda e.h.q.-lərin cəbri cəmi gərginlik düşgünlərinin cəbri cəminə bərabərdir:

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^n I_k r_k \quad (1.15)$$

Qapalı konturu saat əqrəbi istiqamətində (və ya əksinə) dolandırıqda, istiqamətləri konturu dolanma istiqaməti ilə eyni olan e.h.q. və cərəyanlar müsbət, əks halda mənfi qəbul edilməlidir.

Misal üçün şəkil 1.4-dəki sxemin **ADFMNA** qapalı konturuna baxaq. Konturu saat əqrəbi istiqamətində dolansaq, Kirxhofun 2-ci qanununun tənliyi belə ifadə olunur:

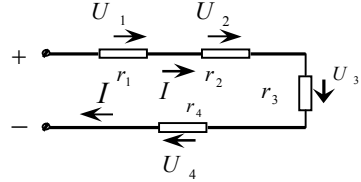
$$\begin{aligned} -E_5 + E_4 + E_3 = & -I_7 r_{11} - I_6 r_5 + \\ & + I_8 (r_{13} + r_4 + r_3 + r_{12}) \end{aligned} \quad (1.16)$$

Elektrik enerji mənbələrinin və işlədicilərinin birləşmələri. Ən sadə sabit cərəyan dövrəsində (şək. 1.1) generator, işlədici və elektrik enerjisinin generatordan işlədiciyə ötürən birləşdirici məftillər öz aralarında ardıcıl bağlanmışdır. Birləşmənin bu üsulundan energetik nöqtəyi-nəzərdən müxtəlif xarakterli elementləri – generatorları, işlədiciləri və elektrik enerjisi veriliş xətlərini ümumi elektrik sistemində birləşdirmək üçün istifadə edirlər. Sistemin energetik nöqtəyi-nəzərdən eyni xarakterli elementləri, məsələn, generatorlar və yaxud işlədicilər bir qayda olaraq, paralel birləşdirilir. Generatorları paralel birləşdirdikdə, onların idarə olunması müstəqil olur. Generatorların və ya işlədicilərin ardıcıl birləşməsi zamanı hər bir generator və ya işlədicini ayrılıqda açmaq, qoşmaq və eləcə də onlar üçün lazım olan iş rejimi yaratmaq təcrübədə mümkün olur. Bundan başqa, ardıcıl birləşmə zamanı işlədicilərdən və ya mənbələrdən birinin işdən çıxması bütün elementlərin cərəyansız qalmasına səbəb olur.

Mənbələrdən biri (məsələn, elektrokimyəvi akkumulyator $E = 1,25 - 2,4$ V) tələb olunan gərginliyi (110 və ya 220 V), təmin etmədikdə eyni tipli mənbələrin ardıcıl birləşməsindən istifadə olunur.

Eyni tipli işlədicilərin ardıcıl birləşməsindən müstəsna hallarda, mənbənin gərginliyi işlədicinin nominal gərginliyindən çox böyük olduqda, istifadə edilir.

Ardıcıl birləşmiş dövrələr. Əgər elektrik dövrəsi ardıcıl birləşmiş r_1, r_2, r_3, r_4 müqavimətli hissələrdən ibarətdirsə (şək. 1.6), onda bütün hissələrdən eyni cərəyan keçəcək. Belə dövrəni hesablamaq üçün ekvivalent müqavimətlər metodundan istifadə etmək olar.



Şəkil 1.6 Ardıcıl birləşmiş dövrə

Ekvivalent müqavimət elə müqavimətə deyilir ki, onun sxemə əvəzedici kimi qoşulması dövrənin qalan hissəsində cərəyan və gərginliklərin paylanmasına təsir göstərməsin. Verilmiş ardıcıl birləşmə üçün ekvivalentlik şərti belə yazılır:

$$U = I r_e = I r_1 + I r_2 + I r_3 + I r_4$$

buradan

$$r_e = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$$

və ya

$$r_e = \sum_{k=1}^n r_k \quad (1.18)$$

Ardıcıl birləşmə zamanı ekvivalent müqavimət ayrı-ayrı müqavimətlərin cəminə bərabərdir.

(1.17) tənliyini I -yə vursaq

$$U I = I r_e^2 = I^2 r_1 + I^2 r_2 + I^2 r_3 + I^2 r_4$$

və ya

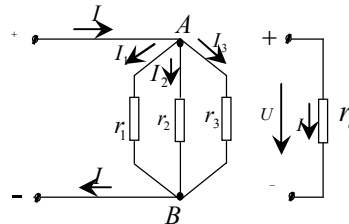
$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

alarıq, yəni dövrənin tələb etdiyi ümumi güc P ayrı-ayrı elementlərin tələb etdiyi güclərin cəminə bərabərdir.

Paralel birləşmiş dövrələr. Elektrik işlədiciyə paralel birləşdirildikdə onların hamısı eyni gərginlik altında olur. Belə dövrələri də ekvivalent müqavimətlər metodu ilə hesablamaq mümkündür.

Elektrik işlədiciyənin müqavimətlərini r_1 , r_2 , r_3 və keçiriciliklərini g_1 , g_2 , g_3 işarə edək (şək. 1.7).

Budaqlanmayan hissədən axan ümumi cərəyan



Şəkil 1.7 Budaqlanan sabit cərəyan dövrəsi

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2} + \frac{U}{r_3} = \frac{U}{r_e} \quad (1.19)$$

və ya

$$I = U g_1 + U g_2 + U g_3 = U g_e \quad (1.20)$$

buradan

$$\frac{1}{r_e} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$$

və ya

$$\frac{1}{r_e} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{r_k} \quad (1.21)$$

$$g_e = \sum_{k=1}^n g_k \quad (1.22)$$

Əgər iki müqavimət r_1 və r_2 paralel qoşulubsa, onların ekvivalenti:

$$r_e = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \quad (1.23)$$

olar. Müqavimətlər eynidirsə, yəni $r_1 = r_2 = r_3 = \dots = r_n = r$, onda ekvivalent müqavimət aşağıdakı kimi olar:

$$r_e = \frac{r}{n} \quad (1.24)$$

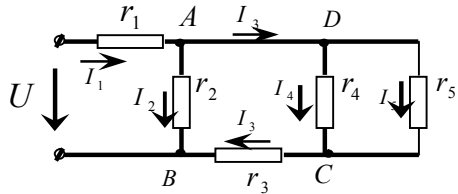
Bir qidalandırıcı mənbəli, müqavimətləri qarışıq birləşmiş dövrələrin hesabı

Şəkil 1.8-də belə dövrəyə misal göstərilmişdir. Bu dövrədə mənbə gərginliyi və dövrə elementləri parametrlərinin verildiyi şəraitdə cərəyanların paylanmasını ekvivalent müqavimətlər metodu ilə təyin etmək olar. Beləki, r_4 və r_5 müqavimətləri paralel birləşib və onları bir ekvivalent müqavimətlə əvəz etmək olar:

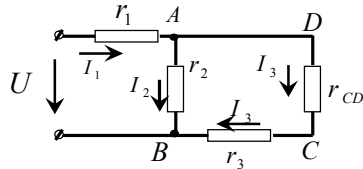
$$r_{CD} = \frac{r_4 \cdot r_5}{r_4 + r_5}$$

Bundan sonra sxem bir qədər sadələşib, şəkil 1.9-dakı kimi olur. Öz növbəsində r_3 və r_{CD} müqavimətləri ardıcıl və onların ekvivalenti r_2 müqaviməti ilə paralel bağlanmışdır. Hər iki budağın ekvivalent müqaviməti

$$r_{AB} = \frac{r_2(r_3 + r_{CD})}{r_2 + r_3 + r_{CD}}$$



Şəkil 1.8 Müqavimətlərin qarışıq birləşməsi



Şəkil 1.9 Ekvivalent əvəz sxemi

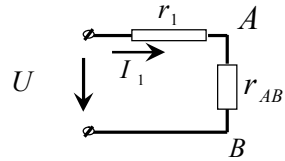
r_{AB} müqaviməti r_1 ilə şəkil 1.10-dan göründüyü kimi, ardıcıl bağlanmışdır. Bu sxemin tam müqaviməti $r = r_1 + r_{AB}$ başlanğıc sxemin ümumi cərəyanını təyin etməyə imkan verir:

$$I_1 = \frac{U}{r}$$

Bundan sonra şəkil 1.10-dakı sxemə qayıdıb AB hissədəki gərginliyi $U_{AB} = I_1 r_{AB}$ və şəkil 1.9-dakı sxemin r_2 , r_3 müqavimətlərində cərəyanları təyin edirik:

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{r_2} \quad \text{və} \quad I_3 = \frac{U_{AB}}{r_{CD} + r_3}$$

Başlanğıc sxemin CD hissəsin-
dəki gərginlik düşgüsü



$$U_{CD} = I_3 \cdot r_{CD}$$

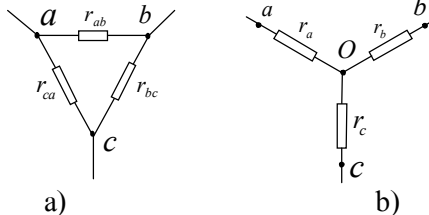
Şəkil 1.10 Sadələşdirilmiş ekvivalent sxemi

r_4 və r_5 budaqlarındakı cərəyanlar:

$$I_4 = \frac{U_{CD}}{r_4}; \quad I_5 = \frac{U_{CD}}{r_5}$$

Bununla da dövrə hesablanmış oldu.

Müqavimətlərin üçbucaq birləşməsinin ekvivalent ulduz birləşməsinə çevrilməsi. Elektrik dövrələrini hesabladıqda müqavimətlərin qapalı kontur təşkil edən üçbucaq birləşməsinə rast gəlirik. Belə halda dövrəni sadələşdirməkdən ötrü müqavimətlərin üçbucaq birləşməsindən ulduz birləşməsinə keçirlər (şək. 1.11).



Şəkil 1.11 Müqavimətlərin üçbucağının (a) ekvivalent ulduza (b) çevrilməsi

Belə çevirmə ekvivalent olmalıdır, yəni dövrənin a və b , b və c , c və a nöqtələri arasındakı müqavimətləri hər iki birləşmədə eyni olmalıdır:

$$\begin{aligned}\frac{\mathbf{r}_{ab}(\mathbf{r}_{bc} + \mathbf{r}_{ca})}{\mathbf{r}_{ab} + \mathbf{r}_{bc} + \mathbf{r}_{ca}} &= \mathbf{r}_a + \mathbf{r}_b \\ \frac{\mathbf{r}_{bc}(\mathbf{r}_{ca} + \mathbf{r}_{ab})}{\mathbf{r}_{ab} + \mathbf{r}_{bc} + \mathbf{r}_{ca}} &= \mathbf{r}_b + \mathbf{r}_c \\ \frac{\mathbf{r}_{ca}(\mathbf{r}_{ab} + \mathbf{r}_{bc})}{\mathbf{r}_{ab} + \mathbf{r}_{bc} + \mathbf{r}_{ca}} &= \mathbf{r}_c + \mathbf{r}_a\end{aligned}$$

Bu tənlikləri $\mathbf{r}_a$, $\mathbf{r}_b$ və $\mathbf{r}_c$ üçün həll etsək, alırıq:

$$\left. \begin{aligned}\mathbf{r}_a &= \frac{\mathbf{r}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ca}}{\mathbf{r}_{ab} + \mathbf{r}_{bc} + \mathbf{r}_{ca}} \\ \mathbf{r}_b &= \frac{\mathbf{r}_{bc} \cdot \mathbf{r}_{ab}}{\mathbf{r}_{ab} + \mathbf{r}_{bc} + \mathbf{r}_{ca}} \\ \mathbf{r}_c &= \frac{\mathbf{r}_{ca} \cdot \mathbf{r}_{bc}}{\mathbf{r}_{ab} + \mathbf{r}_{bc} + \mathbf{r}_{ca}}\end{aligned}\right\} \quad (1.25)$$

Üçşüalı ulduzdan ekvivalent üçbucağa keçdikdə $\mathbf{r}_{ab}$, $\mathbf{r}_{bc}$ və $\mathbf{r}_{ca}$ belə ifadə olunur:

$$\left. \begin{aligned}\mathbf{r}_{ab} &= \mathbf{r}_a + \mathbf{r}_b + \frac{\mathbf{r}_a \cdot \mathbf{r}_b}{\mathbf{r}_c} \\ \mathbf{r}_{bc} &= \mathbf{r}_b + \mathbf{r}_c + \frac{\mathbf{r}_b \cdot \mathbf{r}_c}{\mathbf{r}_a} \\ \mathbf{r}_{ca} &= \mathbf{r}_c + \mathbf{r}_a + \frac{\mathbf{r}_c \cdot \mathbf{r}_a}{\mathbf{r}_b}\end{aligned}\right\} \quad (1.26)$$

Qeyd etmək lazımdır ki, bu çevrilmələr yalnız passiv üçbucaq və ulduz hallarında aparıla bilər.

Budaqlanmış sabit cərəyan dövrələrinin hesabı. Budaqlanmış sabit cərəyan dövrələrinə mürəkkəb elektrik dövrələri deyilir. Bu dövrələrin analizi və hesabı üçün

universal metod Kirxhof qanunlarının bilavasitə tətbiqi metodudur. Düyün nöqtələrinin və qapalı konturların sayı çox olduqda bu metodun tətbiqi çox sayda tənliklərin birgə həll edilməsi lüzumu ilə mürəkkəbləşir. Belə hallarda Kirxhof qanunlarına əsaslanmış başqa metodlardan istifadə etmək məqsədəuyğun olur.

Kirxhof qanunlarının bilavasitə tətbiqi metodu.

Sxemin bütün e.h.q.-ləri və parametrləri verildiyi halda, məchul cərəyanların sayı sxem budaqlarının sayına (m) bərabərdir. Ona görə də məsələni həll etməkdən ötrü tərtib edilmiş müstəqil tənliklərin sayı m olmalıdır.

Kirxhofun 1-ci qanununa görə yazıla biləcək müstəqil tənliklərin sayını təyin edək. Fərz edək ki, sxem k düyünə malikdir. Şəkil 1.5-dəki sxem üçün $k = 5$. Budaqlardan axan cərəyanlara ixtiyari istiqamət veririk. Düyünlərə gələn cərəyanları müsbət, düyünlərdən çıxan cərəyanları isə mənfi qəbul etsək,

$$\left. \begin{array}{l} \text{A düyünü üçün: } I_7 + I_8 - I_1 = 0 \\ \text{B düyünü üçün: } I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ \text{C düyünü üçün: } I_3 + I_4 - I_5 = 0 \\ \text{D düyünü üçün: } I_6 - I_2 - I_4 - I_7 = 0 \\ \text{F düyünü üçün: } I_5 - I_6 - I_8 = 0 \end{array} \right\} \quad (1.27)$$

Hər bir budağın cərəyanı tərtib edilmiş tənliklərə müxtəlif işarə ilə iki dəfə daxil olur. Ona görə birinci dörd düyün üçün tənliklərin sol tərəfini toplusaq,

$$I_5 - I_6 - I_8 + (I_1 - I_1) + (I_2 - I_2) + (I_3 - I_3) + (I_4 - I_4) + (I_7 - I_7) = 0$$

və yaxud $I_5 - I_6 - I_8 = 0$, yəni axırıncı düyün üçün yazılmış tənliyə oxşar olan tənlik alınır.

Belə nəticəyə gəlirik ki, Kirxhofun 1-ci qanununa əsasən yazılmış müstəqil tənliklərin sayı bütün nöqtələrinin sayından bir əksikdir ($k - 1$).

Tənliklərin çatışmayan sayını $m - (k - 1)$ (bizim halda dördünü) Kirxhofun 2-ci qanununa görə qapalı konturlar üçün yazırıq.

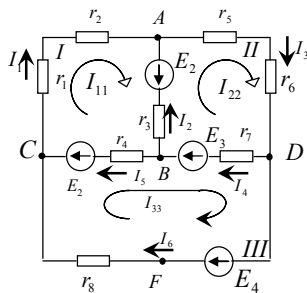
Sxemi konturlara bölmək üçün ən sadə konturdan başlamaq və izləmək lazımdır ki, hər sonrakı kontur müstəqil olsun. Bundan ötrü yeni kontura, baxılmış konturlara daxil olmayan heç olmazsa bir yeni budaq daxil olmalıdır.

Şəkil 1.5-dəki sxem üçün dörd ədəd müstəqil kontur seçirik və konturları dolanmaq istiqamətini saat əqrəbi istiqamətində qəbul edirik. Onda Kirxhofun 2-ci qanununa görə yazmaq olar:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{ABDA konturu için:} & E_1 - E_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2 + I_7 r_{11} \\ \text{ADFMNA konturu} & E_3 + E_4 - E_5 = I_8 (r_3 + r_4 + \\ \text{üçün:} & \quad + r_{12} + r_{13}) - I_6 r_5 - I_7 r_{11} \\ \text{BCDB konturu için:} & E_2 = I_2 r_2 + I_3 (r_6 + R_7 + r_8) \\ & \quad - I_4 r_9 \\ \text{CDFC konturu için:} & E_5 = I_4 r_9 + I_5 r_{10} + I_6 r_5 \end{array} \right\} \quad (1.28)$$

Səkkiz tənlikdən (1.27) və (1.28)-dən ibarət sistemi bir yerdə həll edib, bütün cərəyanları təyin edə bilərik. Tənlikləri həll etdikdə cərəyanların işarələri mənfi çıxa bilər. Bu o deməkdir ki, həmin cərəyanların həqiqi istiqamətləri qəbul edildiyinin düz əksinədir.

Kontur cərəyanları metodu. Böyük sayda düyün nöqtəsinə malik mürəkkəb elektrik dövrələrini hesabladıda kontur cərəyanları metodundan istifadə etmək məqsəduyğundur. Çünki bu metoda görə yazılmış tənliklərin sayı xeyli azalır və Kirxhofun 2-ci qanunundakı tənliklərin sayı qədər olur. Tənliklərin sayının azalması hesabı asanlaşdırır.



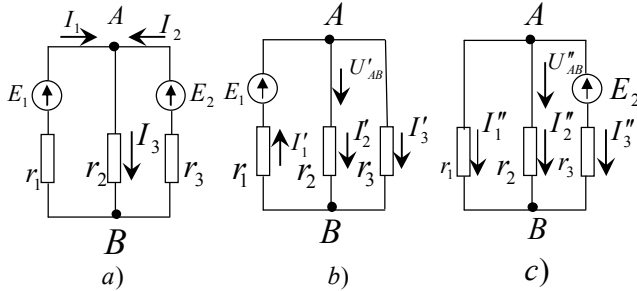
Şəkil 1.12 Kontur cərəyanları
metodunun tətbiqi

Bu metodun mahiyyətini şəkil 1.12-dəki sxem üçün izah edək.

Bu sxem dörd düyünə (A, B, C, D) malikdir. Verilmiş sxemin üç qonşu kontura (I, II, III) ayırırıq. Əgər hər bir konturda özünün kontur cərəyanının (I_{11} , I_{22} , I_{33}) axdığı

dövrələri bir birinin üzərinə qondarmaqla budaqlardan axan həqiqi cərəyanları təyin edirlər.

Bu metodu şəkil 1.13-dəki sxem üçün izah edək. Şək. 1.13b və c sxemlərində e.h.q.-lərin müstəqil təsirləri göstərilmişdir. E_1 e.h.q.-nin yaratdığı cərəyanlar



Şəkil 1.13 Qondarma metodunun tətbiqi

$$\begin{aligned}
 I'_1 &= \frac{E_1}{r_1 + \frac{r_2 \cdot r_3}{r_2 + r_3}} \\
 I'_2 &= \frac{E_1 - I'_1 r_1}{r_2} \\
 I'_3 &= \frac{E_1 - I'_1 r_1}{r_3}
 \end{aligned} \tag{1.30}$$

E_2 e.h.q.-nin yaratdığı cərəyanları isə

$$\begin{aligned}
 I''_2 &= \frac{E_2}{r_2 + \frac{r_1 \cdot r_3}{r_1 + r_3}} \\
 I''_1 &= \frac{E_2 - I''_2 r_2}{r_1} \\
 I''_3 &= \frac{E_2 - I''_2 r_2}{r_3}
 \end{aligned} \tag{1.31}$$

(1.30) və (1.31) qismi cərəyanları üst-üstə salmaqla həqiqi cərəyanları təyin edirik:

$$I_1 = I'_1 - I''_1; \quad I_2 = I''_2 - I'_2; \quad I_3 = I'_3 + I''_3$$

Düyun gərginliyi metodu. Bu metodu iki düyünə malik mürəkkəb elektrik dövrələrinə tətbiq etmək məqsəduyğundur.

Şəkil 1.14-dəki sxemə baxaq. Cərəyanların istiqamətini bütün budaqlarda eyni, B düyünündən A-ya doğru qəbul edək. A və B nöqtələri arasındakı gərginliyə U_{AB} düyun gərginliyi deyilir.

Kirxhofun 2-ci qanununa

əsasən

$$E_1 = U_{AB} + I_1 r_1$$

buradan

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{AB}}{r_1} = (E_1 - U_{AB})g_1 \quad (a)$$

Həmin qayda ilə almaq olar:

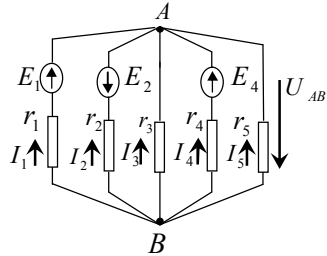
$$I_2 = \frac{-E_2 - U_{AB}}{r_2} = (-E_2 - U_{AB})g_2 \quad (b)$$

$$I_3 = \frac{0 - U_{AB}}{r_3} = (-U_{AB})g_3 \quad (c)$$

$$I_4 = \frac{E_4 - U_{AB}}{r_4} = (E_4 - U_{AB})g_4 \quad (d)$$

$$I_5 = \frac{0 - U_{AB}}{r_5} = (-U_{AB})g_5 \quad (e)$$

Kirxhofun 1-ci qanununa görə



Şəkil 1.14 Düyun gərginliyi metodunun tətbiqi

$$\mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_3 + \mathbf{I}_4 + \mathbf{I}_5 = \mathbf{0}$$

və ya

$$(\mathbf{E}_1 - \mathbf{U}_{AB})\mathbf{g}_1 + (-\mathbf{E}_2 - \mathbf{U}_{AB})\mathbf{g}_2 - \mathbf{U}_{AB}\mathbf{g}_3 + \\ + (\mathbf{E}_4 - \mathbf{U}_{AB})\mathbf{g}_4 - \mathbf{U}_{AB}\mathbf{g}_5 = \mathbf{0}$$

Burada Düyün gərginliyinin düsturunu alırıq:

$$\mathbf{U}_{AB} = \frac{\mathbf{E}_1\mathbf{g}_1 - \mathbf{E}_2\mathbf{g}_2 + \mathbf{E}_3\mathbf{g}_3}{\mathbf{g}_1 + \mathbf{g}_2 + \mathbf{g}_3 + \mathbf{g}_4 + \mathbf{g}_5} = \frac{\sum_1^n \mathbf{E}_k\mathbf{g}_k}{\sum_1^n \mathbf{g}_k} \quad (1.32)$$

k budağı üçün $\mathbf{E}_k$ -nın istiqaməti cərəyanın qəbul edilmiş istiqamətinin əksinədirsə, $\mathbf{E}_k\mathbf{g}_k$ hasilinin işarəsini mənfi götürmək lazımdır.

Düyün gərginliyini (1.32) düsturu ilə təyin edib, ayrı-ayrı budaqlardakı cərəyanları (a) – (d) düsturları ilə hesablamaq olar.

Ekvivalent generator metodu. Bəzən təcrübədə müqaviməti dəyişən mürəkkəb dövrənin yalnız bir budağının iş rejimini tədqiq etmək lazım gəlir. Belə hallarda ekvivalent generator metodu daha təsirli olur.

Tutaq ki, r_x müqavimətli ab budağında I cərəyanın təyin edilməsi tələb olunur (şək. 1.15,a). Bu cərəyan sxemin sol tərəfində olan və qırıq-qırıq xətlə çərçivəyə alınmış hissəsindəki e.h.q.-lərin birgə təsirindən yaranır. Sxemin bu hissəsinə aktiv qütblü deyilir və şəkildə iki qütbə malik A düzbucaqlısı ilə (şək. 1.5b) işarə edilir.

Hesablama üçün sxemin sol tərəfini sıxaclarına yük müqaviməti qoşulmuş bir ekvivalent qidalandırıcı mənbə ilə (e.h.q. E_c və daili müqaviməti r_c olan) əvəz etmək əlverişlidir. Əgər E_c və r_c kəmiyyətləri məlumdursa, axtarılan cərəyan

$$I = \frac{E_e}{r_e + r_x} \quad (1.33)$$

düsturu ilə təyin edilir. Həqiqi dövrənin ekvivalent generatorla əvəz edilməsinin mümkünlüyünü isbat etmək və onun E_e , r_e parametrlərini tapaq.

Baxılan dövrəni a nöqtəsində qırısaq (şək.1.5b), r_x müqavimətində cərəyan sıfır olar və dövrənin qırılmış hissəsində, a və b' nöqtələri arasında yüksüz işləmə gərginliyi U_0 yaranar.

Əgər a və b' nöqtələri arasına qiymətcə U_0 gərginliyinə bərabər və istiqamətcə ona əks olan E' e.h.q. qoşsaq (şək. 1.15q), r_x müqavimətində cərəyan yenə sıfır olaraq qalacaq.

Dövrəyə əlavə olaraq E' e.h.q.-nə bərabər və əks olan E'' e.h.q.-ni daxil edək (şək. 1.15q).

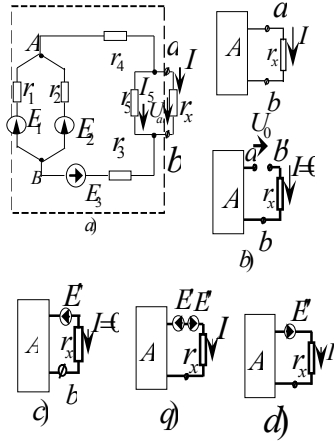
Bu sxem, aydındır ki, ilk sxemə ekvivalent olar və ona görə də r_x müqavimətindən həmin I cərəyanı keçər.

Qondarma prinsipinə əsaslanaraq I cərəyanına:

1) birgə təsirindən r_x müqavimətində sıfıra bərabər cərəyan yaranan E_e və E' e.h.q.-lərinin (şək. 1.15c) və

2) axtarılan cərəyana I -yə bərabər cərəyan yaranan $E'' = U_0$ e.h.q.-nin (çünki başqa təsirlər birlikdə sıfırdır, (şək. 1.15d), müstəqil təsirlərinin nəticəsi kimi baxmaq olar.

Şəkil 1.15d-dəki sxemdə yalnız E'' e.h.q. təsir göstərir və I cərəyanı belə təyin edilə bilər:



Şəkil 1.5 Ekvivalent generator metodunun əsaslandırılması

$$I = \frac{E''}{r_e + r_x} = \frac{U_0}{r_e + r_x} \quad (1.34)$$

burada r_c – ikiqütblünün bütün dövrəsinin nəticəvi müqaviməti olub, giriş müqaviməti r_g adlanır və ikiqütblüyə daxil olan e.h.q.-lərin hamısının sıfıra bərabər olduğu şəraitdə təyin edilir. Belə ikiqütblüyə passiv ikiqütblü (şək. 1.5d) deyilir.

Ekvivalent generator metodu ilə hesabat apardıqda, U_0 və r_c -i tapmaq üçün əlavə üsullardan istifadə edilir.

Şəkil 1.15a-dakı sxemi üçün U_0 və r_c -nin təyin edilməsi qaydasını göstərək. Əvvəlcə düyün gərginliyi metodu ilə U_{AB} gərginliyini tapırıq:

$$U_{AB} = \frac{\frac{E_1}{r_1} + \frac{E_2}{r_2} + \frac{E_3}{r_3 + r_4 + r_5}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3 + r_4 + r_5}}$$

r_5 müqavimətindəki cərəyanı təyin edirik:

$$I_5 = \frac{U_{AB} - E_3}{r_3 + r_4 + r_5}$$

Yüksüz işləmə gərginliyi

$$U_0 = I_5 r_5$$

olar. Passiv ikiqütblünün (P) giriş müqavimətini təyin edək:

$$r_g = r_{ab} = \frac{\left(\frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} + r_3 + r_4 \right) \cdot r_5}{\frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} + r_3 + r_4 + r_5}$$

r_x müqavimətindən axan cərəyan:

$$I = \frac{U_0}{r_k + r_x}$$

Elektrik cərəyanının istilik təsiri və məftillərin qızması. Elektrik cərəyanının istilik təsiri naqillərdən

keçiricilik cərəyanı və dielektrlərdən yerdəyişmə cərəyanı keçdikdə onların qızması ilə izah olunur.

Elektrik cərəyanının istilik təsirindən texnikada geniş istifadə edilir. Bir çox hallarda cərəyanın istilik təsiri ziyanlıdır. Məsələn, elektrik maşınlarında və elektrik veriliş xətlərində elektrik cərəyanının ayırdığı istilik faydasız enerji itkisindən ibarətdir. İstiliyin ayrılması nəticəsində məftilin temperaturu onun izolyasiyası üçün qorxulu olan həddə qədər arta bilər.

Üzvi elektrik izolyasiya materialları 110°C, rezin isə 550°C temperatura qədər qızmaya davamlıdır. Daha yüksək temperaturda izolyasiya tez dağılıb işdən çıxır.

Göstərilən temperaturda istilik ətraf mühitə (havaya) konveksiya yolu ilə ötürülür. Çılpaq məftilin bir saniyədə verdiyi istilik Q soyuma səthi F və τ temperatur artımı (yəni, məftillə havanın temperatur fərqi) ilə mütənasibdir:

$$Q = \alpha F \Delta t = 10606 p d \quad (1.35)$$

burada α - istilikvermə əmsalı, $Wt/sm^2 \cdot ^\circ C$ -də; d – məftillərin diametri, mm; l – məftilin uzunluğu, m.

Elektrik cərəyanının bir saniyədə ayırdığı istilik:

$$Q = I^2 R = \partial^2 S^2 c \frac{l}{S} = \partial^2 c l \frac{p d^2}{4} \quad (1.36)$$

burada $\partial = \frac{I}{S}$ - cərəyanın sıxlığı, A/mm^2 ; S – məftilin en

kəsiyi sahəsi, mm^2 ; ρ - məftilin xüsusi elektrik müqaviməti, $Om \cdot mm^2/m$.

Qərarlaşmış temperaturda (istilik müvazinəti halında) hər iki istilik bir-birinə bərabər olmalıdır:

$$10606 p l = \partial^2 c l \frac{p d^2}{4} \quad (1.37)$$

buradan

$$\partial = \sqrt{\frac{40606}{c d}} \quad (1.38)$$

Alınmış düsturdan göründüyü kimi, buraxılan sərhəd temperaturunun verilmiş qiymətində qalın məftillərdə naziklərə nisbətən kiçik cərəyan sıxlığına yol verilməlidir. Xüsusi müqavimətləri ρ böyük olan alüminium və dəmir məftillərdə misə nisbətən kiçik cərəyan sıxlığına yol verilir.

İzolyasiyalı məftillər üçün oxşar istilik balansı tənliyini tərtib etdikdə izolyasiya təbəqəsinin istilik müqavimətini də nəzərə almaq lazımdır.

Təcrübədə hesabat üçün hazır cədvəllərdən istifadə olunur. Bu cədvəllər nəzəri və təcrübi tədqiqatlar nəticəsində tərtib və təsdiq edilmiş norma kimi «Elektrik qurğularının quruluşu qaydaları»nda verilir. Cədvəllər izolyasiyalı və çılpaq məftillər üçün buraxılan uzunmüddətli yüklərin qiymətlərini göstərir.

Texnikada elektrik cərəyanının istilik təsirindən istifadə edilməsi. Közərmə lampasının, elektrik peçlərinin və başqa qızdırıcı qurğuların iş prinsipi elektrik cərəyanının istilik təsirinə əsaslanmışdır.

Elektrik cərəyanının istilik təsirindən təcrübədə istifadə edilməsi imkanını birinci dəfə akademik V.V.Petrov 1802-ci ildə elektrik qövsünü kəşf etdikdən sonra irəli sürmüşdür.

Elektriklə qızdırılmanın geniş yayılmasına səbəb onun aşağıdakı üstünlükləridir:

1. Elektriklə qızdırılma ilə 3000°C -yə qədər istənilən temperaturu almaq olar; başqa üsullarla bunu əldə etmək mümkün deyil.

2. Elektriklə qızdırılan qurğunun temperatur rejimini geniş həddə asan tənzim etmək olar.

3. Elektriklə qızdırılan quruluşlarda bütün işçi həcmdə (səthdə) müntəzəm temperatur, həmçinin onun bəzi hissələrində artırılmış temperatur yaratmaq olar.

4. Elektriklə qızdırılan qurğular həmişə işləməyə hazırdır, yığcamdır, təmizdir və ona xidmət etmək asandır.

İndiki zamanda elektriklə qızdırılmanın aşağıdakı növləri tətbiq edilir: müqavimətlə, elektrik qövsü ilə,

induksion, elektrolitik və dielektriki. Bunlardan ən geniş yayılanı müqavimətlə və elektrik qövsü ilə qızdırılmalıdır.

Elektriklə qızdırılmadan metalların elektrik qaynağında geniş istifadə edilir. Elektrik qaynağı kontaktlı və qövsü olur.

Elektrik qurğularının istilik mühafizəsi. Elektrik dövrəsinin ayrı-ayrı elementlərini qısaqapanma cərəyanlarının təsirindən mühafizə etməkdən ötrü qısaqapanmış dövrə hissəsini mənbədən tez açmaq lazımdır. Bu məqsədlə xüsusi mühafizə quruluşlarından istifadə olunur. Bunlardan ən sadəsi əriyən qoruyuculardır.

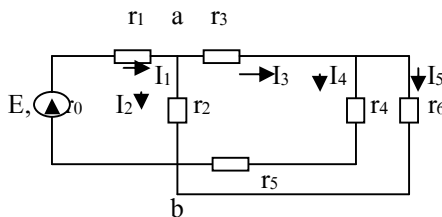
Qoruyucunun əsas elementi əriyən metal teldir (çox vaxt mis məftil) və o, mühafizə edilən dövrəyə ardıcıl bağlanır (şək. 1.4). Həmin tel qısaqapanma cərəyanının istilik təsirindən əriyir və elektrik dövrəsini qırır. Qısaqapanmanın səbəbi ləğv edildikdən sonra ərimiş tel dəyişdirilir və qurğunun normal iş rejimi bərpa olunur.

1.2. Sadə və mürəkkəb sabit cərəyan dövrələrinə aid sərbəst işlər üçün məsələlərin həlli metodikası

Məsələ 1.1 H.

Şəkil 1.1H-də göstərilmiş və məlum qiymətlərə əsasən dövrənin ekvivalent (giriş) müqavimətini sabit cərəyan mənbəyinin sıxaclarına nəzərən təyin etməli. Dövrənin güclər balansını tərtib etməklə cərəyanları və gərginlik düşgülərini hesablamalı.

Verilir: $E=100\text{ V}$, $r_0=0,2\text{ Om}$, $r_1=3\text{ Om}$, $r_2=4\text{ Om}$, $r_3=5\text{ Om}$, $r_4=8\text{ Om}$, $r_5=6\text{ Om}$, $r_6=10\text{ Om}$



Şəkil 1.1H. Qarışıq birləşmiş sxemdə ekvivalent müqavimətin tapılması

Həlli:

1) Dövrənin ekvivalent müqavimsətini təyin edək. Bunun üçün müqavimətlərin ardıcıl və paralel birləşmələrinə uyğun düsturlardan istifadə edirik

$$r_{4,5} = r_4 + r_5 = 8 + 6 = 14 \text{ Om}$$

$$r_{4,5,6} = \frac{r_{4,5} \cdot r_6}{r_{4,5} + r_6} = \frac{14 \cdot 10}{14 + 10} = \frac{140}{24} = 5,84 \text{ Om}$$

$$r_{3,4,5,6} = r_3 + r_{4,5,6} = 5 + 5,84 = 10,84 \text{ Om}$$

$$r_{ab} = \frac{r_{3,4,5,6} \cdot r_2}{r_{3,4,5,6} + r_2} = \frac{10,84 \cdot 4}{10,84 + 4} = \frac{43,36}{14,84} = 2,922 \text{ Om}$$

$$r_{ekv} = r_{gir}$$

$$r_{ekv} = r_0 + r_1 + r_{ab} = 0,2 + 3 + 2,912 = 6,122 \text{ Om}$$

2) Ayrı-ayrı budaqlardan keçən cərəyanları təyin edək. Bunun üçün əvvəlcə gərginlikləri təyin edək

$$I_1 = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{100}{0,2 + r_1 + r_{ab}} = \frac{100}{0,2 + 3 + 2,922} = \frac{100}{6,122} = 16,334 \text{ A}$$

$$U_1 = r_1 I_1 = 3 \cdot 16,334 = 49,002 \text{ V}$$

$$U_0 = E - r_0 I_1 = 100 - (r_1 + r_{ab}) I_1 = 100 - 5,922 \cdot 16,334 = \\ = 100 - 96,73 = 3,27 \text{ V}$$

və ya

$$U_0 = r_0 I_1 = 0,2 \cdot 16,334 = 3,2668 \text{ V} \approx 3,27 \text{ V}$$

$$U_{ab} = r_{ab} \cdot I_1 = 2,922 \cdot 16,334 = 47,73 \text{ V}$$

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{r_2} = \frac{47,73}{4} = 11,933 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{r_{3,4,5,6}} = \frac{47,73}{10,84} = 4,403 \text{ A}$$

Kirxhofun 1-ci qanununa əsasən

$$I_1 = I_2 + I_3 = 11,933 + 4,403 = 16,336 \text{ A} \\ 16,334 \text{ A} \approx 16,336 \text{ A}$$

$$U_3 = r_3 I_3 = 5 \cdot 4,403 = 22,015 \text{ V}$$

$$U_{sb} = r_{sb} \cdot I_3 = r_{4,5,6} \cdot I_3 = 5,84 \cdot 4,403 = 25,714 \text{ V}$$

Kirxhofun 2-ci qanununa əsasən

$$U_{ab} = U_3 + U_{sb} = 22,015 + 25,714 = 47,729 \text{ V} \\ 47,73 \text{ V} = 47,729 \text{ V}$$

burada $U_{sb}=U_6$ olduğundan

$$I_5 = \frac{U_{sb}}{r_6} = \frac{U_6}{r_6} = \frac{25,714}{10} = 2,5714 \text{ A}$$

$$I_4 = \frac{U_{sb}}{r_{4,5}} = \frac{25,714}{14} = 1,837 \text{ A}$$

$$I_3 = I_4 + I_5 = 1,837 + 2,5714 = 4,4084 \text{ A}$$

$$4,403 \text{ A} \approx 4,4084 \text{ A}$$

$$U_4 = r_4 \cdot I_4 = 8 \cdot 1,837 = 14,696 \text{ V}$$

$$U_5 = r_5 \cdot I_4 = 6 \cdot 1,837 = 11,022 \text{ V}$$

Kirxhofun 2-ci qanununa əsasən

$$U_{sb} = U_4 + U_5 = 14,696 + 11,022 = 25,718 \text{ V}$$

$$25,714 \text{ V} \approx 25,718 \text{ V}$$

3) Dövrənin güclər balansını tərtib edək:

$$EI_1 = r_0 I_1^2 + r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 + r_3 I_3^2 + r_4 I_4^2 + r_5 I_5^2 + r_6 I_6^2$$

burada

$$I_5 = I_4 = 1,837 \text{ A}; \quad I_6 = I_5 = 2,5714 \text{ A}$$

Onda

$$100 \cdot 16,336 = 0,2(16,336)^2 + 3(16,336)^2 + 4(11,933)^2 +$$

$$+ 5(4,403)^2 + 8(1,837)^2 + 6(1,837)^2 + 10(2,5714)^2$$

$$1633,6 \text{ Vt} = 53,373 + 800,595 + 569,586 + 96,932 +$$

$$+ 26,997 + 20,247 + 66,121$$

$$1633,6 \text{ Vt} \approx 1633,851 \text{ Vt}$$

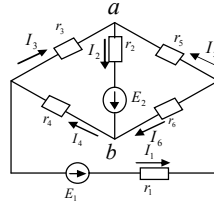
Məsələ 1.2H.

Şəkil 1.2H-də göstərilmiş və məlum qiymətlərə əsasən mürəkkəb sabit cərəyan dövrəsinin ayrı-ayrı budaqlarından keçən cərəyanları Kirxhof qanunları, kontur cərəyanları və qondarma metodu ilə təyin etməli. Verilmiş sxem üçün güclər balansını tərtib etməli.

Verilir: $r_1=2 \text{ Om}$, $r_2=8 \text{ Om}$,
 $r_3=4 \text{ Om}$, $r_4=4 \text{ Om}$, $r_5=6 \text{ Om}$,
 $r_6=6 \text{ Om}$, $E_1=20 \text{ V}$, $E_2=10 \text{ V}$.

Həlli:

I. Verilmiş məsələni Kirxhof qanunlarının bilavasitə tətbiqi ilə həll edək



Şəkil 1.2H Mürəkkəb sabit cərəyan dövrəsi cərəyan dövrəsi

$$\left. \begin{array}{l} E_1 = r_1 I_1 + r_6 I_6 + r_4 I_4 \\ E_2 = r_2 I_2 + r_4 I_4 + r_3 I_3 \\ E_2 = r_2 I_2 - r_6 I_6 + r_5 I_5 \\ I_1 - I_6 - I_5 = 0 \\ I_3 + I_5 - I_2 = 0 \\ I_4 - I_1 - I_3 = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} I_6 = I_1 - I_5 = I_1 - I_2 + I_3 \\ I_5 = I_2 - I_3 \\ I_4 = I_1 + I_3 \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} 20 = 2I_1 + 6(I_1 - I_2 + I_3) + 4(I_1 + I_3) \\ 10 = 8I_2 + 4(I_1 + I_3) + 4I_3 \\ 10 = 8I_2 - 6(I_1 - I_2 + I_3) + 6(I_2 - I_3) \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} 20 = 2I_1 + 6I_1 - 6I_2 + 6I_3 + 4I_1 + 4I_3 \\ 10 = 8I_2 + 4I_1 + 4I_3 + 4I_3 \\ 10 = 8I_2 - 6I_1 + 6I_2 - 6I_3 + 6I_2 - 6I_3 \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} 20 = 12I_1 - 6I_2 + 10I_3 \\ 10 = 4I_1 + 8I_2 + 8I_3 \\ 10 = -6I_1 + 20I_2 - 12I_3 \end{array} \right\}$$

$$D = \begin{vmatrix} 12 & -6 & 10 \\ 4 & 8 & 8 \\ -6 & 20 & -12 \end{vmatrix} = 12 \cdot 8(-12) +$$

$$+ (-6)(+8)(-6) + 4 \cdot 20 \cdot 10 - (-6)8 \cdot 10 - 20 \cdot 8 \cdot 12 - 4(-6)(-12) =$$

$$= -1152 + 288 + 800 + 480 - 1920 - 288 = -1792$$

Determinantı riyaziyyatdan məlum olan üçüncü tərtibli determinant kimi üçbucaq üsulu ilə açıırıq

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11} \cdot a_{22} \cdot a_{33} + a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{31} +$$

$$+ a_{21} \cdot a_{32} \cdot a_{13} - a_{31} \cdot a_{23} \cdot a_{13} - a_{32} \cdot a_{23} \cdot a_{11} - a_{21} \cdot a_{12} \cdot a_{33}$$

$$D_1 = \begin{vmatrix} 20 & -6 & 10 \\ 10 & 8 & 8 \\ 10 & 20 & -12 \end{vmatrix} = 20 \cdot 8 \cdot (-12) + (-6) \cdot 8 \cdot 10 + 10 \cdot 20 \cdot 10 - 10 \cdot 8 \cdot 10 - 20 \cdot 8 \cdot 20 -$$

$$- 10 \cdot (-6)(-12) = -1920 - 480 + 2000 - 800 - 3200 - 720 = -7120 + 2000 = -5120$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} 12 & 20 & 10 \\ 4 & 10 & 8 \\ -6 & 10 & -12 \end{vmatrix} = 12 \cdot 10 \cdot (-12) + 20 \cdot 8 \cdot (-6) + \\ + 4 \cdot 10 \cdot 10 - (-6) \cdot 10 \cdot 10 - \\ - 10 \cdot 8 \cdot 12 - 4 \cdot 20 \cdot (-12) = -1440 - 960 + 400 + \\ + 600 - 960 + 960 = -1400$$

$$D_2 = -1400$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} 12 & -6 & 20 \\ 4 & 8 & 10 \\ -6 & 20 & 10 \end{vmatrix} = 12 \cdot 8 \cdot 10 + (-6) \cdot 10 \cdot (-6) + 4 \cdot 20 \cdot 20 - \\ - (-6) \cdot 8 \cdot 20 - 20 \cdot 10 \cdot 12 - \\ - 4 \cdot (-6) \cdot 10 = 960 + 360 + 1600 + 960 - \\ - 2400 + 240 = 1720$$

I_1, I_2, I_3 cərəyanlarını hesablayaq.

$$I_1 = \frac{D_1}{D} = \frac{-5120}{-1792} = 2,857 \approx 2,86 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{D_2}{D} = \frac{-1400}{-1792} = 0,78 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{D_3}{D} = \frac{1720}{-1792} = -0,9598 = -0,96 \text{ A}$$

I_4, I_5, I_6 cərəyanlarını hesablayaq

$$I_4 = I_1 + I_3 = 2,86 + (-0,96) = 1,9 \text{ A}$$

$$I_5 = I_2 - I_3 = 0,78 - (-0,96) = 0,78 + 0,96 = 1,74 \text{ A}$$

$$I_6 = I_1 - I_2 + I_3 = 2,86 - 0,78 + (-0,96) = 1,12 \text{ A}$$

2) Dövrənin güclər balansını tərtib edək

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 + r_3 I_3^2 + r_4 I_4^2 + r_5 I_5^2 + r_6 I_6^2$$

$$20 \cdot 2,86 + 10 \cdot 0,78 = 2(2,86)^2 + 8(0,78)^2 + 4(-0,96)^2 + 4(1,9)^2 + 6(1,74)^2 + 6(1,12)^2$$

$$57,2 + 7,8 = 16,36 + 4,87 + 3,69 + 14,44 + 18,16 + 7,53$$

$$65 \text{ Vt} = 65,05 \text{ Vt}$$

II. Məsələni kontur cərəyanları
metodu ilə həll edək
(şəkil 1.3H).

burada

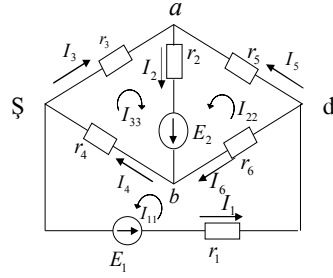
$$E_{11}=E_1, E_{22}=E_2, E_{33}=E_2$$

$$r_{11}=(r_1+r_4+r_6); r_{22}=(r_2+r_5+r_6);$$

$$r_{33}=(r_2+r_3+r_4); r_{12}=r_{21}=r_6;$$

$$r_{13}=r_{31}=r_4; r_{23}=r_{32}=r_2$$

olduğundan



Şəkil 1.3H. Kontur cərəyanlar
metodunun tətbiqi

$$I_{11}=I_1; \quad I_{22}=I_2; \quad I_{33}=I_3;$$

$$I_2=I_{22}+I_{33}; \quad I_4=I_{11}+I_{33}; \quad I_6=I_{11}-I_{22}$$

Onda

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= r_1 I_{11} + (I_{11} - I_{22}) r_6 + (I_{11} + I_{33}) r_4 \\ E_2 &= r_5 I_{22} + (I_{22} + I_{33}) r_2 + (I_{22} - I_{11}) r_6 \\ E_2 &= r_3 I_{33} + (I_{33} + I_{22}) r_2 + (I_{33} + I_{11}) r_4 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= I_{11}(r_1 + r_6 + r_4) - r_6 I_{22} + r_4 I_{33} \\ E_2 &= -I_{11} r_6 + I_{22}(r_5 + r_2 + r_6) + r_2 I_{33} \\ E_2 &= I_{11} r_4 + I_{22} r_2 + I_{33}(r_3 + r_2 + r_4) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} 20 &= 12I_{11} - 6I_{22} + 4I_{33} \\ 10 &= -6I_{11} + 20I_{22} + 8I_{33} \\ 10 &= 4I_{11} + 8I_{22} + 16I_{33} \end{aligned} \right\}$$

$$D = \begin{vmatrix} 12 & -6 & 4 \\ -6 & 20 & 8 \\ 4 & 8 & 16 \end{vmatrix} = 12 \cdot 20 \cdot 16 + (-6) \cdot 8 \cdot 4 + (-6) \cdot 8 \cdot 4 -$$

$$- 4 \cdot 20 \cdot 4 - 8 \cdot 8 \cdot 12 - (-6)(-6) \cdot 16 = 3840 - 192 -$$

$$- 192 - 320 - 768 - 576 = 1792$$

$$D_{11} = \begin{vmatrix} 20 & -6 & 4 \\ 10 & 20 & 8 \\ 10 & 8 & 16 \end{vmatrix} = 20 \cdot 20 \cdot 16 + (-6) \cdot 8 \cdot 10 + 10 \cdot 8 \cdot 4 -$$

$$- 10 \cdot 20 \cdot 4 - 8 \cdot 8 \cdot 20 - 10(-6) \cdot 16 = 6400 - 480 +$$

$$+ 320 - 800 - 1280 + 960 = 5120$$

$$D_{11} = 5120$$

$$D_{22} = \begin{vmatrix} 12 & 20 & 4 \\ -6 & 10 & 8 \\ 4 & 10 & 16 \end{vmatrix} = 12 \cdot 10 \cdot 16 + 20 \cdot 8 \cdot 4 +$$

$$+ (-6) \cdot 10 \cdot 4 - 4 \cdot 10 \cdot 4 - 10 \cdot 8 \cdot 12 - (-6) \cdot 20 \cdot 16 =$$

$$= 1920 + 640 - 240 - 160 - 960 + 1920 = 3120$$

$$D_{22} = 3120$$

$$D_{33} = \begin{vmatrix} 12 & -6 & 20 \\ -6 & 20 & 10 \\ 4 & 8 & 10 \end{vmatrix} = 12 \cdot 20 \cdot 10 + (-6) \cdot 10 \cdot 4 +$$

$$+ (-6) \cdot 8 \cdot 20 - 4 \cdot 20 \cdot 20 - 8 \cdot 10 \cdot 12 - (-6)(-6) \cdot 10 =$$

$$= 2400 - 240 - 960 - 1600 - 960 - 360 = -1720$$

$$I_{11} = \frac{D_{11}}{D} = \frac{5120}{1792} = 2,857 \approx 2,86 \text{ A}$$

$$I_{22} = \frac{D_{22}}{D} = \frac{3120}{1792} = 1,74 \text{ A}$$

$$I_{33} = \frac{D_{33}}{D} = \frac{-1720}{1792} = -0,9598 \approx -0,96 \text{ A}$$

Qollardan (budaqlardan) keçən cərəyanları kontur cərəyanları vasitəsilə təyin edək:

$$\begin{aligned}
I_{11} &= I_1 = 2,86 \text{ A}; \\
I_{22} &= I_5 = 1,74 \text{ A}; \\
I_{33} &= I_3 = -0,96 \text{ A}; \\
I_2 &= I_{22} + I_{33} = 1,79 + (-0,96) = 0,83 \text{ A}; \\
I_4 &= I_{11} + I_{33} = 2,86 + (-0,96) = 2,86 - 0,96 = 1,9 \text{ A}; \\
I_6 &= I_{11} - I_{22} = 2,86 - 1,74 = 1,12 \text{ A}
\end{aligned}$$

III. Qondarma (super-pozisiya) metodu ilə verilmiş məsələni həll edək. Bunun üçün əvvəlcə E_1 e.h.q. mənbəyini, sonra isə E_2 -ni sıfır qəbul edirik. Əgər $E_1=0$; $E_2 \neq 0$ olarsa, sxemdə sbd müqavimətlər üçbucağından ekvivalent ulduz birləşməsinə keçirik (şəkil 1.4H).

Onda

$$r_5 = \frac{r_4 r_1}{r_1 + r_4 + r_6} = \frac{8}{12} = 0,67 \text{ Om}$$

$$r_b = \frac{r_4 r_6}{r_1 + r_4 + r_6} = \frac{24}{12} = 2 \text{ Om}$$

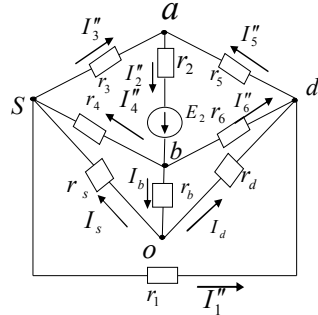
$$r_d = \frac{r_1 r_6}{r_1 + r_4 + r_6} = \frac{12}{12} = 1 \text{ Om}$$

$I_2^{//}$ cərəyanını Om qanununa əsasən hesablamaq üçün əvvəlcə ekvivalent müqaviməti təyin edək:

$$\begin{aligned}
r_{\text{ekv}} &= (r_2 + r_b) + \frac{(r_3 + r_s)(r_5 + r_d)}{r_3 + r_s + r_5 + r_d} = \\
&= (8 + 2) + \frac{(4 + 0,67)(6 + 1)}{4 + 0,67 + 6 + 1} = \\
&= 10 + \frac{32,69}{11,67} = 12,8 \text{ Om}
\end{aligned}$$

$$I_2^{//} = \frac{E_2}{r_{\text{ekv}}} = \frac{10}{12,8} = 0,781 \text{ A}$$

$$U_2 = r_2 I_2^{//} = 8 \cdot 0,781 = 6,248 \text{ V}$$



Şəkil 1.4H. Qondarma metodunun tətbiqi sbd müqavimətlər üçbucağından ekvivalent ulduz birləşməsinə keçid

$$U_b = r_b I_2^{//} = 2 \cdot 0,781 = 1,562 \text{ V}$$

$$U_{ao}' = U_2 + U_b = 6,248 + 1,562 = 7,81 \text{ V}$$

$$U_{ao} = E_2 - U_{ao}' = 10 - 7,81 = 2,19 \text{ V}$$

və ya

$$U_{ao} = r_{0a} I_2^{//} = \frac{(4 + 0,67)(6 + 1)}{4 + 0,67 + 6 + 1} \cdot 0,781 =$$

$$= \frac{32,69}{11,67} \cdot 0,781 = 2,8 \cdot 0,781 = 2,1868 \approx 2,19 \text{ V}$$

Kirxhofun 2-ci qanununa əsasən

$$E_2 = U_2 + U_b + U_{oa} = 6,248 + 1,562 + 2,19 = 10 \text{ V}$$

$$10 \text{ V} = 10 \text{ V}$$

$$I_3^{//} = \frac{U_{oa}}{r_s + r_3} = \frac{2,19}{4,67} = 0,469 \text{ A};$$

$$I_5^{//} = \frac{U_{oa}}{r_5 + r_d} = \frac{2,19}{7} = 0,313 \text{ A};$$

$$U_3 = r_3 I_3^{//} = 4 \cdot 0,469 = 1,876 \text{ V};$$

$$U_s = r_s I_3^{//} = 0,67 \cdot 0,469 = 0,314 \text{ V};$$

$$U_{oa} = U_3 + U_s = 1,876 + 0,314 = 2,19 \text{ V};$$

$$2,19 \text{ V} = 2,19 \text{ V}$$

$$\left. \begin{aligned} U_s &= r_s I_5^{//} = 6 \cdot 0,313 = 1,878 \text{ V}; \\ U_d &= r_d I_5^{//} = 1 \cdot 0,313 = 0,313 \text{ V}; \end{aligned} \right\} \begin{aligned} U_{oa} &= U_s + U_d = \\ &= 1,878 + 0,313 = 2,191 \text{ V} \end{aligned}$$

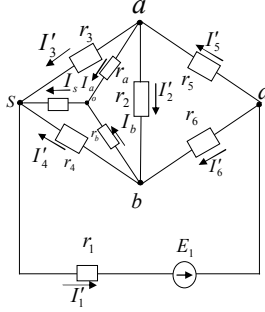
$I_1^{//}$, $I_4^{//}$, $I_6^{//}$ cərəyanlarını təyin etmək. Bunun üçün əvvəlcə

U_4 , U_6 , U_1 gərginliklərini hesablayaq. $\varphi_0 = 0$ qəbul etmək.

$$\varphi_0 = 0; \quad \varphi_b - \varphi_0 = r_b I_b = 1,562 \text{ V}$$

$$\varphi_b = 1,562 \text{ V}$$

$$\varphi_0 - \varphi_s = r_s I_s = r_s I_3^{//} = 0,314 \text{ V}; \quad \varphi_s = -0,314 \text{ V}$$



Şəkil 1.5H. Qondarma metodunun tətbiqi asb müqavimətlər üçbucağından ekvivalent ulduz sxeminə keçid

$$\varphi_0 - \varphi_d = r_d I_d = r_d I_S^{\prime\prime} = 0,313V; \varphi_d = -0,313V$$

$$\varphi_b - \varphi_S = U_4;$$

$$U_4 = 1,562 + 0,314 = 1,876 V;$$

$$I_4^{\prime\prime} = U_4 / r_4 = 1,876 / 4 = 0,469 A;$$

$$\varphi_b - \varphi_d = U_6;$$

$$U_6 = 1,562 + 0,313 = 1,875 V;$$

$$I_6^{\prime\prime} = U_6 / r_6 = 1,875 / 6 = 0,313 A;$$

$$\varphi_S - \varphi_d = U_1;$$

$$U_1 = -0,314 - (-0,313) \approx 0$$

Onda $I_1^{\prime\prime} = 0$ olur.

$E_2=0$; $E_1 \neq 0$ qəbul edək.

Sxemdə asb müqavimətlər üçbucağından ekvivalent ulduz sxeminə keçək (şəkil 1.5H).

$$r_a = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3 + r_4} = \frac{8 \cdot 4}{8 + 4 + 4} = \frac{32}{16} = 2 \text{ Om}$$

$$r_s = \frac{r_3 r_4}{r_2 + r_3 + r_4} = \frac{4 \cdot 4}{8 + 4 + 4} = \frac{16}{16} = 1 \text{ Om}$$

$$r_b = \frac{r_2 r_4}{r_2 + r_3 + r_4} = \frac{8 \cdot 4}{8 + 4 + 4} = \frac{32}{16} = 2 \text{ Om}$$

Onda

$$r_{ekv} = (r_1 + r_s) + r_a = \frac{(r_a + r_5)(r_b + r_6)}{r_a + r_5 + r_b + r_6} = (2 + 1) + \frac{(2 + 6) \cdot (2 + 6)}{2 + 6 + 2 + 6} = 3 + \frac{64}{16} = 3 + 4 = 7 \text{ Om}$$

I_1' cərəyanını hesablayaq.

$$I_1' = E_1 / r_{ekv} = 20 / 7 = 2,86 \text{ A}; \quad I_s = I_1' = 2,86 \text{ A}$$

Dövrənin ayrı-ayrı budaqlarından keçən cərəyanları və gərginlik düşgünlərini hesablayaq.

$$U_1 = r_1 I_1' = 2 \cdot 2,86 = 5,72 \text{ V};$$

$$U_s = r_s I_1' = 1 \cdot 2,86 = 2,86 \text{ V};$$

$$U_{od} = E_1 - r_{od} I_1' = 20 - 4 \cdot 2,86 = 20 - 11,44 = 8,56 \text{ V}$$

və ya

$$U_{ob} = U_1 + U_s;$$

$$8,56 \text{ V} = 5,72 + 2,86 = 8,58 \text{ V};$$

$$8,56 \text{ V} \approx 8,58 \text{ V};$$

$$U_{od} = E_1 - U_{ob} = 20 - 8,56 = 11,44 \text{ V}$$

yaxud

$$U_{od} = r_{od} I_1' = \frac{(r_a + r_5)(r_b + r_6)}{r_a + r_5 + r_b + r_6} I_1' = \frac{(2 + 6)(2 + 6)}{2 + 6 + 2 + 6} 2,86 = 4 \cdot 2,86 = 11,44 \text{ V}$$

$$I_5' = \frac{U_{od}}{r_a + r_5} = \frac{11,44}{8} = 1,43 \text{ A}$$

$$I_6' = \frac{U_{od}}{r_b + r_6} = \frac{11,44}{8} = 1,43 \text{ A}$$

burada $I_5' = I_a = 1,43 \text{ A}$, $I_6' = I_b = 1,43 \text{ A}$.

«O» nöqtəsinin potensialını sıfır qəbul edib, I_2' , I_3' , I_4' cərəyanlarını hesablamaq üçün s, a, b nöqtələrinin potensiallarını təyin edək.

$$\varphi_0 = 0;$$

$$\varphi_a - \varphi_0 = I_a r_a = 1,43 \cdot 2 = 2,86 \text{ V}; \quad \varphi_a = 2,86 \text{ V};$$

$$\varphi_b - \varphi_0 = I_b r_b = 1,43 \cdot 2 = 2,86 \text{ V}; \quad \varphi_b = 2,86 \text{ V};$$

$$\varphi_0 - \varphi_s = -I_s r_s = -2,86 \cdot 1 = -2,86 \text{ V}; \quad \varphi_s = -2,86 \text{ V};$$

Onda

$$\varphi_a - \varphi_s = U_3;$$

$$2,86 - (-2,86) = U_3; \quad U_3 = 5,72 \text{ V}$$

$$I_3' = \frac{U_3}{r_3} = \frac{5,72}{4} = 1,43 \text{ A}$$

$$\varphi_b - \varphi_s = U_4; \quad 2,86 - (-2,86) = U_4; \quad U_4 = 5,72 \text{ V}$$

$$I_4' = \frac{U_4}{r_4} = \frac{5,72}{4} = 1,43 \text{ A}$$

$$\varphi_a - \varphi_b = U_2; \quad U_2 = 0; \quad I_2' = 0$$

$$I_1 = I_1' + I_1'' = 0 + 2,86 = 2,86 \text{ A}$$

$$I_2 = I_2' + I_2'' = 0 + 0,781 = 0,781 \text{ A}$$

$$I_3 = I_3'' - I_3' = 0,469 - 1,43 = -0,961 \text{ A}$$

$$I_4 = I_4' + I_4'' = 1,43 + 0,469 = 1,899 \approx 1,9 \text{ A}$$

$$I_5 = I_5' + I_5'' = 1,43 + 0,313 = 1,743 \text{ A}$$

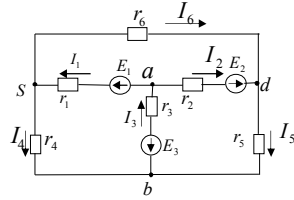
$$I_6 = I_6' - I_5'' = 1,43 - 0,313 = 1,117 \approx 1,12 \text{ A}$$

Hesablanmış qiymətlərə uyğun belə nəticəyə gəlmək olar ki, müxtəlif metodlarla təyin edilmiş cərəyanlar eynidir. Deməli məsələ düzgün həll edilmişdir.

Məsələ 1.3H.

Şəkil 1.6H-də verilmiş sxemin ayrı-ayrı qollarından keçən cərəyanları Kirxhof qanunlarının bilavasitə tətbiqi, kontur cərəyanları metodu ilə təyin etməli. Dövrənin güclər balansını tənzimləyini tərtib etməli.

Verilir: $r_1 = 1 \text{ Om}$, $r_2 = 1 \text{ Om}$, $r_3 = 1 \text{ Om}$, $r_4 = 6 \text{ Om}$, $r_5 = 6 \text{ Om}$, $r_6 = 4 \text{ Om}$, $E_1 = 15 \text{ V}$, $E_2 = 10 \text{ V}$, $E_3 = 5 \text{ V}$.



Şəkil 1.6H. Kirxov qanunlarının bilavasitə tətbiqi metodu

Həlli.

1) Cərəyanları təyin etmək üçün Kirxhofun 1-ci və 2-ci qanunları əsasında tənliklər tərtib edib, həmin tənlikləri həll etməli.

$$\left. \begin{aligned} I_1 - I_4 - I_6 &= 0 \\ I_3 - I_1 - I_2 &= 0 \\ I_2 + I_6 - I_5 &= 0 \\ E_1 - E_2 &= r_1 I_1 + r_6 I_6 - r_2 I_2 \\ E_1 - E_3 &= r_1 I_1 + r_4 I_4 + r_3 I_3 \\ E_2 - E_3 &= r_2 I_2 + r_5 I_5 + r_3 I_3 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{s duyunu ucun} \\ &\text{a duyunu ucun} \\ &\text{d duyunu ucun} \\ &\text{asda konturu ucun} \\ &\text{asba konturu ucun} \\ &\text{adba konturu ucun} \end{aligned}$$

burada

$$\begin{aligned} I_1 &= I_4 + I_6 \\ I_2 &= I_5 - I_6 \\ I_3 &= I_1 + I_2 = I_4 + I_6 + I_5 - I_6 = I_4 + I_5 \end{aligned}$$

nəzərə alsaq

$$\left. \begin{aligned} E_1 - E_2 &= r_1(I_4 + I_6) + r_6 I_6 - r_2(I_5 - I_6) \\ E_1 - E_3 &= r_1(I_4 + I_6) + r_4 I_4 + r_3(I_4 + I_5) \\ E_2 - E_3 &= r_2(I_5 - I_6) + r_5 I_5 + r_3(I_4 + I_5) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} 15 - 10 &= 1(I_4 - I_6) + 4I_6 - 1(I_5 - I_6) \\ 15 - 5 &= 1(I_4 - I_6) + 6I_4 + 1(I_4 + I_5) \\ 10 - 5 &= 1(I_5 - I_6) + 6I_5 + 1(I_4 + I_5) \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{cases}
5 = I_4 + I_6 + 4I - I_5 - I_6 \\
10 = I_4 + I_6 + 6I_4 + I_4 + I_5 \\
5 = I_5 + I_6 + 6I_5 + I_4 + I_5
\end{cases}$$

$$\begin{cases}
5 = I_4 - I_5 + 6I_6 \\
10 = 8I_4 + I_5 + I_6 \\
5 = I_4 + 8I_5 - I_6
\end{cases}$$

$$\begin{cases}
10 = 8I_4 + I_5 + I_6 \\
5 = I_4 + 8I_5 - I_6
\end{cases} \Rightarrow 15 = 9I_4 + 9I_5 \quad (I)$$

$$\begin{cases}
5 = I_4 - I_5 + 6I_6 \\
5 = I_4 + 8I_5 - I_6
\end{cases} \Rightarrow \begin{cases}
5 = I_4 - I_5 + 6I_6 \\
30 = 6I_4 + 48I_5 - 6I_6
\end{cases} \Rightarrow$$

$$35 = 7I_4 + 47I_5 \quad (II)$$

I və II bərabərliklərini birlikdə həll etsək I_4 və I_5 cərəyanlarını təyin etmək olar

$$\begin{cases}
15 = 9I_4 + 9I_5 \\
35 = 7I_4 + 47I_5
\end{cases} \Rightarrow \begin{cases}
-105 = -63I_4 - 63I_5 \\
315 = 63I_4 + 423I_5
\end{cases} \Rightarrow$$

$$210 = 360I_5$$

$$I_5 = 210/360 = 0,583 \text{ A}$$

$$15 = 9I_4 + 9I_5 = 9I_4 + 9(0,583) = 9I_4 + 5,247$$

$$15 - 5,247 = 9I_4$$

$$I_4 = 9,753/9 = 1,084 \text{ A}$$

$$5 = I_4 - I_5 + 6I_6 = 1,084 - 0,583 + 6I_6 = 0,501 + 6I_6$$

$$5 - 0,501 = 6I_6$$

$$I_6 = 4,499/6 = 0,75 \text{ A}$$

I_1, I_2, I_3 cərəyanlarını hesablayaq

$$I_1 = I_4 + I_6 = 1,084 + 0,75 = 1,834 \text{ A}$$

$$I_2 = I_5 - I_6 = 0,583 - 0,75 = -0,167 \text{ A}$$

$$I_3 = I_4 + I_5 = 1,084 + 0,583 = 1,667 \text{ A}$$

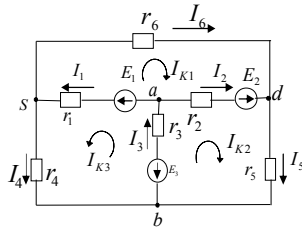
2) Məsələnin düzgün həll edildiyini yoxlamaq üçün dövrənin güclər balansı tənliyini tərtib edək.

$$\begin{aligned} 27,51 - 1,67 - 8,335 &= 3,36 + 0,03 + \\ &+ 2,78 + 7,05 + 2,04 + 2,25 \\ 17,505 \text{ Vt} &\approx 17,51 \text{ Vt} \end{aligned}$$

II. Məsələni kontur cərəyanları metodu

Sxemdə qollardan keçən cərəyanları kontur cərəyanları ilə əvəz edib Kixhofun 2-ci qanunu əsasında tənliklər tərtib edək.

$$\begin{aligned} I_{k1} &= I_6, \quad I_{k2} = I_5, \\ I_{k3} &= I_4, \quad I_{k1} + I_{k3} = I_1, \\ I_{k2} - I_{k1} &= I_2, \\ I_{k2} + I_{k3} &= I_3 \end{aligned}$$



Şəkil 1.7H. kontur cərəyanları metodunun tətbiqi

olduğundan

$$\left. \begin{aligned} E_1 - E_2 &= r_1 I_1 + r_6 I_6 - r_2 I_2 \\ E_1 - E_3 &= r_1 I_1 + r_4 I_4 + r_3 I_3 \\ E_2 - E_3 &= r_2 I_2 + r_5 I_5 + r_3 I_3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} E_1 - E_2 &= r_1 (I_{k1} + I_{k3}) + r_6 I_{k1} - \\ &\quad - r_2 (I_{k2} - I_{k3}) \\ E_1 - E_3 &= r_1 (I_{k1} + I_{k3}) + r_4 I_{k3} + \\ &\quad + r_3 (I_{k2} + I_{k3}) \\ E_2 - E_3 &= r_2 (I_{k2} - I_{k1}) + r_5 I_{k2} + \\ &\quad + r_3 (I_{k2} - I_{k3}) \end{aligned} \right\}$$

$$\Rightarrow \left. \begin{array}{l} r_1 I_{k1} + r_1 I_{k3} + r_6 I_{k1} - r_2 I_{k2} + r_2 I_{k1} \\ r_1 I_{k1} + r_1 I_{k3} + r_4 I_{k3} + r_3 I_{k2} + r_3 I_{k3} \\ r_2 I_{k2} - r_2 I_{k1} + r_5 I_{k2} + r_3 I_{k2} + r_3 I_{k3} \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} (r_1 + r_2 + r_6) I_{k1} - r_2 I_{k2} + r_1 I_{k3} \\ (r_1 + r_3 + r_4) I_{k3} + r_1 I_{k1} + r_3 I_{k2} \\ (r_2 + r_3 + r_5) I_{k2} - r_2 I_{k1} + r_3 I_{k3} \end{array} \right\}$$

buradan

$$\left. \begin{array}{l} E_1 - E_2 = (r_1 + r_2 + r_6) I_{k1} - r_2 I_{k2} + r_1 I_{k3} \\ E_1 - E_3 = -r_2 I_{k1} + (r_2 + r_3 + r_5) I_{k2} + r_3 I_{k3} \\ E_2 - E_3 = r_1 I_{k1} + r_3 I_{k2} + (r_1 + r_3 + r_4) I_{k3} \end{array} \right\}$$

sistem tənliyi alınır.

$$\left. \begin{array}{l} 15 - 10 = (1 + 1 + 4) I_{k1} - 1 \cdot I_{k2} + 1 \cdot I_{k3} \\ 10 - 5 = -1 \cdot I_{k1} + (1 + 1 + 6) I_{k2} + 1 \cdot I_{k3} \\ 15 - 5 = 1 \cdot I_{k1} + 1 \cdot I_{k2} + (1 + 1 + 6) I_{k3} \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} 5 = 6 I_{k1} - 1 \cdot I_{k2} + 1 \cdot I_{k3} \\ 5 = -1 \cdot I_{k1} + 8 I_{k2} + 1 \cdot I_{k3} \\ 10 = 1 \cdot I_{k1} + 1 \cdot I_{k2} + 8 I_{k3} \end{array} \right\}$$

$$D = \begin{vmatrix} 6 & -1 & 1 \\ -1 & 8 & 1 \\ 1 & 1 & 8 \end{vmatrix} = 6 \cdot 8 \cdot 8 + (-1) \cdot 1 \cdot 1 + (-1) \cdot 1 \cdot 1 - 1 \cdot 8 \cdot 1 - 1 \cdot 1 \cdot 6 - (-1)(-1) \cdot 8 = 384 - 1 - 1 - 8 - 6 - 8 = 360$$

$$D_1 = \begin{vmatrix} 5 & -1 & 1 \\ 5 & 8 & 1 \\ 10 & 1 & 8 \end{vmatrix} = 5 \cdot 8 \cdot 8 + (-1) \cdot 1 \cdot 10 + 5 \cdot 1 \cdot 1 - 1 \cdot 1 \cdot 5 - 5(-1)8 = 320 - 10 + 5 - 80 + 40 = 275$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} 6 & 5 & 1 \\ -1 & 5 & 1 \\ 1 & 10 & 8 \end{vmatrix} = 6 \cdot 5 \cdot 8 + 5 \cdot 1 \cdot 1 + (-1) \cdot 10 \cdot 1 - 1 \cdot 5 \cdot 1 - 10 \cdot 1 \cdot 6 - (-1)5 \cdot 8 = 240 + 5 - 10 - 5 - 60 + 40 = 210$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} 6 & -1 & 5 \\ -1 & 8 & 5 \\ 1 & 1 & 10 \end{vmatrix} = 6 \cdot 8 \cdot 10 + (-1) \cdot 5 \cdot 1 + (-1) \cdot 1 \cdot 5 - 1 \cdot 8 \cdot 5 - 1 \cdot 5 \cdot 6 - (-1)(-1)10 = 480 - 5 - 5 - 40 - 30 - 10 = 390$$

I_{k1} , I_{k2} , I_{k3} kontur cərəyanlarını, daha sonra ayrı-ayrı budaqlardan keçən cərəyanları hesablayaq:

$$I_{k1} = \frac{D_1}{D} = \frac{275}{360} = 0,764 \text{ A}; \quad I_{k2} = \frac{D_2}{D} = \frac{210}{360} = 0,583 \text{ A};$$

$$I_{k3} = \frac{D_3}{D} = \frac{390}{360} = 1,083 \text{ A};$$

$$I_{k1} = I_6 = 0,764 \text{ A}; \quad I_{k2} = I_5 = 0,583 \text{ A}; \quad I_{k3} = I_4 = 1,083 \text{ A};$$

$$I_1 = I_{k1} + I_{k3} = 0,764 + 1,083 = 1,847 \text{ A};$$

$$I_2 = I_{k2} - I_{k1} = 0,583 - 0,764 = -0,181 \text{ A}$$

$$I_3 = I_{k2} + I_{k3} = 0,583 + 1,083 = 1,666 \text{ A}$$

Alınmış qiymətlər əsasında cədvəl 1.1H tərtib edib Kirxhof və kontur cərəyanlarına uyğun alınmış qiymətləri müqayisə edək.

Cədvəl 1.1H

Metodlar / Hesablanmış cərəyanlar, A	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
Kirxhof qanunlarının bilavasitə tətbiqi	1,834	-0,167	1,667	1,084	0,583	0,75
Kontur cərəyanları	1,847	-0,181	1,666	1,083	0,588	0,764

Hesablanmış, yəni təyin edilmiş cərəyanlar hər iki metoda uyğun təqribən bir-birinə bərabər alındığı üçün demək olar ki, məsələ düzgün həll edilmişdir.

1.3. Sabit cərəyan elektrik dövrələrinə aid sərbəst işlər

1. Elektrik veriliş xətti gərginliyinin qiyməti xəttəki itgilərə necə təsir edir.

2. Dövrə elementlərinin nominal və əlaqələndirilmiş iş rejimləri nə ilə fərqlənilirlər.

3. Qısaqapanma rejiminin nə kimi təhlükəsi vardır və bu rejimdən dövrəni necə mühafizə edirlər?

4. 1.8-ci şəkildə sxemi verilmiş dövrənin parametrləri belədir: $r_1=12\Omega$, $r_2=6\Omega$, $r_3=3\Omega$, $r_4=4\Omega$, $r_5=12\Omega$. r_3 mü-qavimətinə axan cərəyan $I_3=2 \text{ A}$. Tapmaq lazımdır: 1) dövrənin bütün budaqlarından axan

cərəyanları; 2) dövrənin girişindəki U gərginliyi; 3) A və C nöqtələri arasındakı U_{AC} potensiallar fərqi.

5. Əvvəlki məsələni I_3 əvəzinə $U_{AB}=12$ V verilməsi halı üçün həll etməli.

6. Paralel müqavimətlərdən axan cərəyanların müqavimətlərin qiymətləri ilə tərs mütənəsb paylandığını isbat edin.

7. 110 V gərginliyi hesablanmış 75 və 15 Vatt güclü iki közərmə lampası ardıcıl birləşdirilib. 220 V gərginlikli şəbəkəyə qoşmaq olarmı? Cavabı hesablamlar ilə əsaslandırmaq (lanpanın müqavimətlərinin sabit olduğunu qəbul etməli)

8. 220 V-luq 75 və 15 Vatt güclü isə közərmə lampalarını bir açarla 220 V şəbəkəyə hansı sxem üzrə qoşmaq olarki açar açıq olduqda lampalardan biri bağlı olduqda isə digəri közərib işıq versin? Cavabı hesablamlar ilə əsaslandırmaq (lampaların müqavimətləri sabit qəbul edilir)

9. Nominal gərginliyi 220 V və nominal gücü 800 Vatt olan elektrik pilyəsi 110 V gərginlikli şəbəkəyə qoşulmuşdur. Pilyənin tələb etdiyi gücü tapmaq (pilyənin müqaviməti sabit qəbul edilməli)

10. E.h.q $E=11$ V, daxili müqaviməti $r_g=2$ Om olan generatorun sıxaclarına $r_{yük}$ yük müqaviməti qoşulmuşdur. Yük müqavimətinin 11 Om-dan 0 qədər dəyişməsi üçün dövrənin I cərəyanı, mənbənin sıxaclarında U gərginliyinin, yükün tələb etdiyi $P_{yük}$ gücünün, mənbənin f.i.ə-nı tapmaq

bu kəmiyyətləri $\frac{r_{yük}}{r_g}$ nisbətindən asılılıq qrafiklərini qurmalı. $\frac{r_{yük}}{r_g} = 1$

olduqda dövrənin hansı rejimi yaranır?

11. Şəkil 1.13, a-da parametrlər belədir: $E_1=50$ V, $E_2=40$ V, $r_1=r_2=10$ Om, $r_3=20$ Om. Budaqlardan axan cərəyanları : a) Kirxhof qanunlarının bilavasitə tətbiqi b) düyün gərginliyi, c) qondarma və d) kontur cərəyanları metodu ilə tapmaq. Nəticələrin eyni olduğunu yoxlamaq.

12. Əvvəlki məsələdə r_3 müqavimətinin elə qiymətini tapmaq ki, ondan axan i_3 cərəyanı 0 olsun

13. Şəkil 1.14-də verilmiş dövrənin r_5 müqavimətindən axan cərəyan ekvivalent generator metodu ilə təyin etməli. Dövrənin parametrləri: $E_1=20$ V, $E_2=15$ V, $E_4=25$ V, $r_1=10$ Om, $r_2=2$ Om, $r_3=10$ Om, $r_4=2$ Om, $r_5=20$ Om

14. İkiməftili xətdə elektrik enerjisinin $l=250$ m məsafəyə ötürmək lazımdır. Əgər xəttin sonunda qoşulan yük $P=16$ kVt, onun gərginliyi isə $U_2=220$ V olmalıdırsa, mis məftillərin en kəsiyi sahəsini tapmaq. Xətdə gərginlik itkisi 6%-dən artıq olmalıdır.

2-ci fəsil

KONDENSATORLU ELEKTRİK DÖVRƏLƏRİ

2.1 Dielektriklər

Elektrik sahəsi. Məlum olduğu kimi, elektrik yüklərinin əhatə olunduğu mühitdə elektrik sahəsi yaranır. Sahənin varlığı oradakı yüklü hissəciklərə mexaniki təsirin yaranması ilə aşkar edilir.

Elektrik sahəsini xarakterizə edən əsas kəmiyyət elektrik sahəsinin intensivliyi $\vec{E}$ vektorudur. Intensivlik vektoru qiymət və istiqamətcə sahənin verilmiş nöqtəsində müsbət vahid yükə təsir göstərən qüvvə ilə təyin edilir. Əgər sahə q yükünə $\vec{F}$ qüvvəsi ilə təsir edirsə, intensivlik

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (2.1)$$

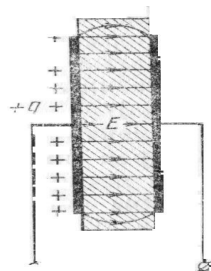
Elektrik sahələri müntəzəm və qeyri-müntəzəm olur.

Müntəzəm sahədə intensivlik $\vec{E}$ bütün nöqtələrində eynidir. Sabit gərginliyə qoşulmuş müstəvi kondensatorun lövhələri arasında yaranan elektrik sahəsini müntəzəm sahəyə misal göstərmək olar (şəkil 2.1)

Kondensatorun bir lövhəsindən digər lövhəsinə qədər müsbət vahid yükü aparmaq üçün görülən iş, məlum olduğu kimi, lövhələr arasına tətbiq edilmiş gərginliyə bərabərdir:

$$U = \frac{F}{q} d = Ed \quad (2.2)$$

burada d - lövhələr arasındakı məsafədir.



Şəkil 2.1. Yastı kondensatorun elektrik sahəsi

(2.2) düsturundan tapırıq:

$$\mathbf{E} = \frac{U}{d} \quad [\text{V/m}] \quad (2.3)$$

yeni sahənin intensivliyi dielektrikin vahid qalınlığına düşən gərginliklə təyin edilir.

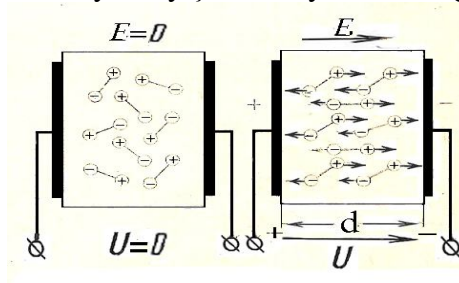
Elektrik sahəsi həm metal naqillərdə, həm də dielektriklərdə aşkar edilir.

Naqili elektrik dövrəsinə qoşduqda onda yaranan elektrik sahəsinin təsiri nəticəsində sərbəst elektronlar hərəkət edib cərəyan yaradır.

Dielektriklər, məlum olduğu kimi, naqillərdə sərbəst elektrik yüklərindən məhrum olmaları ilə fərqlənir. Dielektrikin maddəsində bərabər miqdarda olan müsbət və mənfi yüklər bir-biri ilə möhkəm əlaqədədir.

Dielektriki elektrik sahəsinə gətirdikdə rabitədə olan elektrik yüklərinin yerdəyişməsi baş verəcəkdir: müsbət yüklər sahə istiqamətində, mənfi yüklər isə əks istiqamətdə yerlərini dəyişəcəkdir (şəkil 2.2).

Elektrik yüklərinin belə yerdəyişməsinə dielektrikin polyarizasiyası deyilir və bu proses zamanı yaranan elektrik yüklərinin hərəkəti yerdəyişmə cərəyanının doğurur.



Şəkil 2.2. Dielektrikin polyarizasiyası

Elektrik möhkəmliyi. Əgər sahənin intensivliyi E verilmiş dielektrik üçün müəyyən qiymətdən artıq olarsa, dielektrik izolyasiya xassəsini itirir vədeşirlər.

Dielektrikdə dəşilmənin baş verdiyi sahə intensivliyinin minimal qiymətinə dielektrikin elektrik möhkəmliyi deyilir və $E_{möh}$ ilə işarə edilir. Bir necə dielektrik üçün $E_{möh}$ -in qiymətini göstəririk:

Hava (atmosfer təzyiqində)	30	kV/sm
Mərmər	30-50	kV/sm
Kağız, yağda hopdurulmuş	100-250	kV/sm
Rezin	150-300	kV/sm
Slyuda	100-900	kV/sm

Elektrik izoyasiya materiallar. Texniki qurğularda cərəyan keçirən hissələri bir-birindən və əhatə edən mühitdən ayırmaq üçün istifadə edilən dielektriklərə elektrik izolyasiya materialları deyilir. Elektrotexniki quruluşda izolyasiyanın dəşilməsi bütün quruluşun və ya onun bir hissəsinin işdən çıxmasına səbəb olur. Ona görə də elektrik möhkəmliyi elektrik izolyasiya materialları üçün əsas şərtidir.

Bundan əlavə, elektrik izolyasiya materiallarına onların iş şəraiti ilə müəyyən edilən başqa tələblər də verilir: istiliyə davamlılıq, rütubətə davamlılıq, mexaniki möhkəmlik, elastiklik və s.

Izolyasiya materialının istiliyə davamlılığı xüsusi böyük əhəmiyyətə malikdir, çünki bir qayda olaraq elektrik maşınlarının buraxıla bilən qızması və deməli, maksimal yükü izolyasiyanın istiliyə davamlılığı ilə məhdudlaşdırılır. Elektrik maşınlarında çox vaxt buraxıla bilən qızması 100°C -yə qədər olan üzvü izolyasiya materiallarından istifadə edilir. Daha yüksək temperaturda izolyasiya tez dağılır və elektrik maşınının xidmət müddəti qısalar.

Təcrübədə bərk, maye və qaz şəkilli dielektriklərdən istifadə olunur. Bərk izolyasiya kimi həm üzvi (pambıq-kətan parça, rezin, kağız, ağac), həm də qeyri-üzvi (slyuda, şüşə parça və s.) izolyasiya materiallarından istifadə olunur. Maye dielektriklərə mineral yağlar, qatranlar, laklar, emallar aiddir.

İstiliyə davamlılığı yüksək olan (180-250°C) silisium üzvi birləşmələrindən elektrik izolyasiya materialları kimi istifadə olunması çox perspektivlidir. İstiliyə davamlılığı yüksək olan materiallardan istifadə edilməsi maşınların əvvəlki qabaritindən daha çox güc almağa imkan verir.

2.2. Kondensatorlar

Kondensatorun elektrik xarakteristikaları. Kondensatorları xarakterizə edən nominal kəmiyyətlər onların tutumları və işçi gərginlikləridir.

Kondensatorun elektrik tutumu onun ölçülərindən, şəklindən və dielektrikin xassələrindən asılıdır. Məsələn, müstəvi kondensatorun elektrik tutumu (şəkil 2.1):

$$C = \epsilon_m \frac{S}{d} \quad (2.4)$$

burada ϵ_m – kondensatorun lövhələri arasındakı mühitin dielektrik nüfuz əmsalı, F/m; S - bir lövhənin sahəsi, m²; d – lövhələr arasındakı məsafə, m.

Kondensatorun nominal işçi gərginliyi U_n dielektrikin elektrik möhkəmliyi, qalınlığı və bəzi başqa amillərlə təyin edilir. Müstəvi kondensator üçün

$$U_n = \frac{E_{moh}}{k} \cdot d \quad (2.5)$$

burada E_{moh} – dielektrikin elektrik möhkəmliyi, V/m; k – ehtiyat əmsalı ($k > 1$).

Kondensatorun tutumu və lövhələr arasındakı gərginliyi onun yükünün qiymətini müəyyən edir:

$$q = CU \quad [K] \quad (2.6)$$

BS sistemində elektrik tutumunun vahidi Faraddır:

$$1\text{Farad} = \frac{1\text{Klon}}{1\text{Volt}} \quad \left(1\text{F} = 1 \frac{\text{K}}{\text{V}} \right)$$

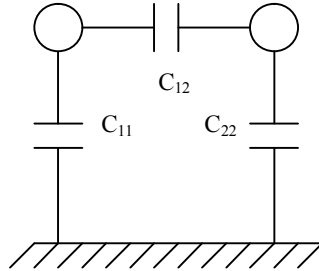
Təcrübədə daha kiçik vahidlərdən: mikrofaraddan, pikofaraddan istifadə edilir:

$$1\text{mkF} = 10^{-6}\text{F}$$

$$1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$$

Qeyd etmək lazımdır ki, təkcə kondensatorlar deyil, həm də elektrik qurğularının bütün cərəyan daşıyan elementləri elektrik tutumuna malikdir. Bəzən bu tutmlar o qədər böyük olur ki, onları nəzərə almaq lazım gəlir.

Uzun elektrik xətlərinin məftillərini buna misal göstərmək olar (şəkil 2.3).



Şəkil 2.3. İkiməftilli xəttin naqillərarası (C_{12}) və yerə nəzərən tutumları (C_{11} , C_{22})

Kondensatorların birləşmə sxemləri. Lazımi tutum standart kondensatorun tutumuna uyğun gəlmədikdə və ya qurğunun gərginliyi kondensatorun nominal gərginliyindən çox olduqda kondensatorları batareyə şəklində birləşdirib istifadə edirlər.

Təcrübədə kondensatorların ardıcıl, paralel və qarışıq birləşməsindən istifadə edilir.

Kondensatorun nominal gərginliyi U_n qurğunun gərginliyindən azdırsa, onları ardıcıl birləşdirirlər. Belə halda hər kondensatora düşən gərginliyi $U \leq U_n$ qədər azaltmaq olur.

Kondensatoru ardıcıl birləşdirdikdə (şəkil 2.4,a) yük q kondensatorların hamısında eyni, ümumi gərginlik isə ayrı-ayrı kondensatorların gərginlikləri cəminə bərabər olacaqdır:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

(2.6) ifadəsini nəzərə alsaq,

$$\frac{q}{C_{\text{um}}} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots + \frac{q}{C_n}$$

və yaxud

$$\frac{1}{C_{\text{um}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k} \quad (2.7)$$

olar. Buradan görünür ki, hesabatda ardıcıl birləşmiş kondensatorları tutumu C_{um} hər bir kondensatorun tutumundan kiçik olan bir kondensatorla əvəz etmək olar. Əgər $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$ olarsa,

$$C_{\text{um}} = \frac{C}{n} \quad (2.8)$$

olar.

Kondensatorları paralel birləşdirdikdə (şəkil 2.4b) ξ torda eyni, batareyanın yükü q isə ayrı-ayrı kondensatorları olacaqdır

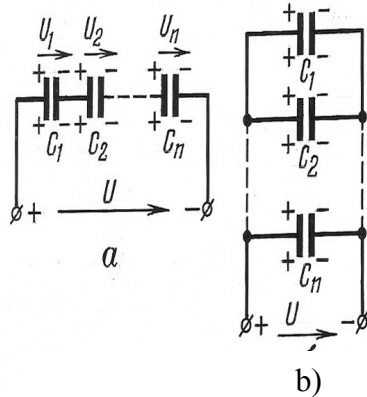
$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$$

(2.6) ifadəsini nəzərə alsaq,

$$C_{\text{um}} U = C_1 U + C_2 U + \dots + C_n U$$

və yaxud

$$C_{\text{um}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{k=1}^n C_k \quad (2.9)$$



Şəkil 2.4. Kondensatorların ardıcıl (α) və paralel (δ) birləşməsi

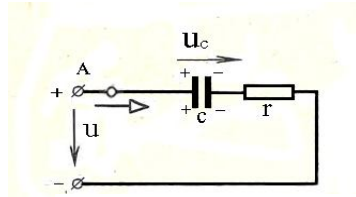
olar. Aydınır ki, birləşmənin bu üsulundan çox böyük tutumlar almaq üçün istifadə edilir.

Tutumun lazımı qiymətini almaq və bu zaman kondensatorlara düşən gərginliyin buraxılan qiymətindən artıq olmasına yol vermək üçün kondensatorların qarışıq birləşməsindən istifadə edilir.

Kondensatorun dolması.

Kondensatorun sabit cərəyan mənbəyinə qoşulduqda dolma prosesi

A açarını vurduqda dövredə elektrik yüklərinin nizamlı hərəkəti baş verir və məftildən



Şəkil 2.5. Kondensatorun dolması

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt} \quad (2.10)$$

cərəyanı axır.

Kondensatorun lövhələrində elektrik yükləri toplanmışca lövhələr arasındakı gərginlik $u_c = \frac{q}{c}$ artır.

Kondensatorun gərginliyi u_c mənbənin gərginliyinə bərabər olduqda dövredən axan cərəyan sıfır olacaqdır.

Dövreyə (şəkil 2.5) Kirxhofun ikinci qanununu tətbiq edək:

$$U = u_c + ir \quad (2.11)$$

(2.10) və (2.11) ifadələrini nəzərə alsaq

$$U = u_c + rC \frac{du_c}{dt} \quad (2.12)$$

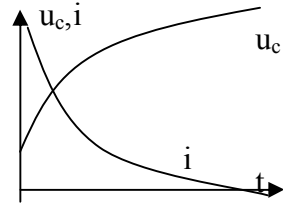
Bu diferensial tənliyin həlli $t=0$, $u_c=0$ başlanğıc şərt daxilində olar:

$$u_c = U \left(1 - e^{-\frac{t}{rC}} \right) \quad (2.13)$$

Kondensatorun dolma cərəyanının ifadəsi üçün alırıq:

$$i = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{rc}} \quad (2.14)$$

Kondensatorun dolma prosesi zamanı dövredə cərəyan başlanğıc $i = \frac{U}{r}$ ($t=0$ olduqda) qiymətindən $i=0$ ($t=\infty$ olduqda) qiymətinə qədər artır.



Şəkil 2.6 Kondensatorun dolması zamanı cərəyan və gərginlik qrafikləri

$u_c(t)$ və $i(t)$ -nin dəyişmə qrafikləri şəkil 2.6-da göstərilmişdir.

Elektrik sahəsinin enerjisi. (2.11) tənliyinin hər iki tərəfini idt hasilinə vursaq, dövrənin enerji balansını alırıq:

$$Uidt = i^2 r dt + u_c idt \quad (2.15)$$

Bu tənliyə əsasən mənbənin enerjisi $Uidt$ müqavimətdəki istilik itgilərinə $i^2 r dt$ və tutumun dielektrikdə elektrik sahəsi enerjisinin artmasına sərf olunur:

$$dW_c = u_c idt = C u_c du_c$$

Kondensatorda u_c gərginliyi 0-dan U -yə qədər artıqda elektrik sahəsində toplanan enerji üçün fizikadan məlum olan

$$W_c = \int dW_c = \int_0^U C u_c du_c = \frac{CU^2}{2} \quad (2.16)$$

ifadəsini alırıq. Kondensatorun dolma prosesi müddətində r müqavimətində istiliyə ayrılan enerji müqavimətin qiymətindən asılı olmur, sabit qalır. Doğurdan da,

$$W = \int_0^\infty i^2 r dt = \int_0^\infty \left(\frac{U}{r} e^{-\frac{t}{rc}} \right)^2 r dt = \frac{CU^2}{2} \quad (2.17)$$

Buradan görünür ki, müqavimətdə istiliyə ayrılan enerji müqavimətin qiymətindən asılı deyil və həmişə kondensatorda toplanan enerjiyə bərabərdir.

2.3. Kondensatorlu elektrik dövrələrinə aid sərbəst işlər üçün məsələlərin həlli metodikası

Məsələ 2-1.H

$C=20 \text{ mkF}$ tutumlu kondensator almaq üçün parafin hopdurulmuş kağız lentin lazımı uzunluğunu tapmalı. Lentin eni $a=20 \text{ sm}$, qalınlığı $d=0,05 \text{ mm}$, dielektrik nüfuzluğu $\epsilon_m=3,2 \cdot 10^{11} \text{ F/m}$. Məsələni yastı kondensator üçün həll etməli.

Həlli. Yastı kondensatorun tutumu üçün olan

$$C = \frac{\epsilon_m S}{d}$$

düsturunda $S=a \cdot l$ (l -lentin uzunluğudur) ifadəsini nəzərə alsaq, tapa bilərik:

$$l = \frac{C \cdot d}{\epsilon_m \cdot a} = \frac{20 \cdot 10^{-6} \cdot 0,05 \cdot 10^{-3}}{3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 25 \cdot 10^{-2}} = 125 \text{ m}$$

Məsələ 2-2 H.

Tutumları $C_1=200 \text{ mkF}$, $C_2=300 \text{ mkF}$, $C_3=600 \text{ mkF}$ olan üç ədəd kondensator ardıcıl birləşdirilib, $U=240 \text{ V}$ gərginliyi qoşulmuşdur. Hər kondensatorda gərginliyi və toplanan enerji ehtiyatını tapmalı.

Həlli. Batareyanın ümumi tutumunu tapırıq:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_{\text{um}}} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{200} + \frac{1}{300} + \\ &+ \frac{1}{600} = \frac{1}{100}, C_{\text{um}} = 100 \text{mkF} \end{aligned}$$

batareyada və hər bir kondensatorda toplanan elektrik yükləri miqdarının bərabərliyi

$$q = C_{\text{um}} U = C_1 U_1 = C_2 U_2 = C_3 U_3$$

şərtindən hər kondensatorda gərginliyi təyin edirik:

$$U_1 = \frac{C_{\text{um}}}{C_1} \cdot U = \frac{100}{200} \cdot 240 = 120 \text{ V},$$

$$U_2 = \frac{C_{\text{um}}}{C_2} \cdot U = \frac{100}{300} \cdot 240 = 80 \text{ V}$$

$$U_3 = \frac{C_{\text{um}}}{C_3} \cdot U = \frac{100}{600} \cdot 240 = 40 \text{ V}$$

kondensatorun elektrik sahələrində toplanan enerjilər:

$$W_{e1} = \frac{C_1 U_1^2}{2} = \frac{200 \cdot 10^{-6} \cdot 120^2}{2} = 1,44 \text{ C}$$

$$W_{e2} = \frac{C_2 U_2^2}{2} = \frac{300 \cdot 10^{-6} \cdot 80^2}{2} = 0,96 \text{ C}$$

$$W_{e3} = \frac{C_3 U_3^2}{2} = \frac{600 \cdot 10^{-6} \cdot 40^2}{2} = 0,48 \text{ C}$$

2.4. Kondensatorlu elektrik dövrəsinə aid sərbəst işlər

1. Praktikada hansı quruluşlar elektrik tutumuna malikdir?
2. Elektrik izolyasiya materiallarına hansı tələbatlar verilir?
3. Kondensatorların ardıcıl və paralel birləşməsindən nə vaxt istifadə edilir?

4. Tutumları $C_1=10 \text{ mF}$ və $C_2=30 \text{ mF}$ olan 2 kondensator ardıcıl birləşdirilib, $U=220 \text{ V}$ gərginliyə qoşulmuşdur. Hər bir kondensatorda gərginliyi və onun elektrik sahəsində toplanmış enerjini tapmalı

5. U gərginliyinə qədər doldurulmuş C tutumlu kondensatorun elektrik sahəsində $\frac{CU^2}{2}$ qədər enerji toplandığı məlumdur. Əgər bu

kondensatoru onunla eyni tutumlu kondensatora paralel qoşsaq, kondensatorlarda gərginliklər bərabərləşənə qədər 1-ci kondensator

boşalacaq, ikinci dolacaqdır. Kondensatorlarda gərginliklər $U_1=U_2=\frac{U}{2}$

olacaqdır. Ümumi enerji ehtiyatı isə $\frac{C_1 U_1^2}{2} + \frac{C_2 U_2^2}{2} = \frac{CU^2}{4}$ ilkin ehtiyatdan 2 dəfə olur. Enerji ehtiyatının yarısının proses zamanı nəyə sərf olunduğunu izah edin.

6. Nöminal gərginliyi $U_n=200V$ olan $C_1=6mkF$ və $C_2= 15mkF$ kondensatorlara verilir. $U=500V$ gərginlikli şəbəkəyə qoşula biləcək $C=12 mVF$ tutumlu batareya yığmaq tələb olunur. Batareyanın sxemini çəkməli və kondensatorların tələb olunan minimal sayını tapmalı.

3-cü fəsil

ELEKTROMAQNİT HADİSƏLƏRİ. MAQNİT DÖVRƏLƏRİ

3.1. Maqnit sahəsinin elektromexaniki təsiri və maqnit sahəsinə xarakterizə edən əsas kəmiyyətlər

Fizika kursundan məlumdur ki, elektrik cərəyanını əhatə edən mühitdə maqnit sahəsi əmələ gəlir. Maqnit sahəsi burada yaranan hadisələrin müşahidə edilməsi ilə aşkar olunur.

Maqnit sahəsinə xarakterizə edən əsas kəmiyyət maqnit induksiya vektorudur ($\vec{B}$). Maqnit induksiya maqnit sahəsinin elektrotexniki və induksion təsirlərini xarakterizə edir.

Maqnit induksiya vektorunu $\vec{B}$ təyin etmək üçün maqnit sahəsinin elektrotexniki təsirindən istifadə etmək daha rahatdır. Amper qanununa görə maqnit sahəsində yerləşdirilmiş cərəyanlı məftilə (şəkil 3.1) təsir edən qüvvə belə ifadə olunur:

$$F = BIl \sin \alpha \quad (3.1)$$

burada B – maqnit induksiya; I – məftilin cərəyanı, A ; l – məftilin aktiv uzunluğu, m ; α – məftillə sahənin istiqamətləri arasındakı bucaqdır.

Bu halda F qüvvəsinin istiqaməti şəkil 3.1-də göstərildiyi kimi sol əl qaydası ilə təyin edirlər. (3.1) ifadəsindən maqnit induksiya

$$B = \frac{F}{Il \sin \alpha} \quad (3.2)$$

$$I=1A, l=1m, \alpha=90^\circ$$

olsa $B=F$ alınar.

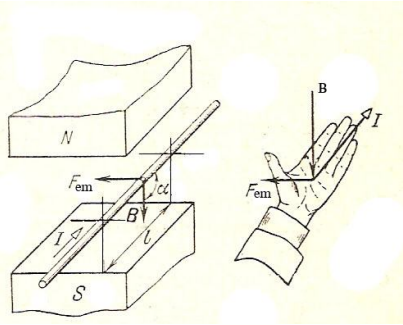
Deməli, maqnit induksiya, sahəyə perpendikulyar istiqamətdə yerləşdirilmiş vahid uzunluqlu və vahid cərəyanlı düz məftilə sahənin təsir göstərdiyi qüvvə ilə təyin edilir.

Maqnit induksiyaının vahidi BS sistemində **Tesla**dır (TI). Mühəndis hesabnan vahiddən də istifadə edilir:

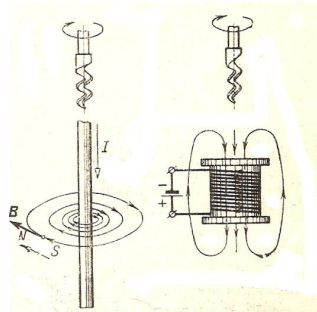
$$1TI = 10^4 Qs$$

Maqnit sahəsinə qrafiki təsvir etmək üçün maqnit **induksiya xətlərindən** və yaxud sadəcə olaraq, **maqnit xətlərindən** istifadə edilir. Bu xətlərin istənilən nöqtəsində induksiya vektoru $\vec{B}$ onlara toxunandır. Maqnit xətləri həmişə qapalı konturlar təşkil edir və bir-biri ilə heç vaxt kəsişmir. Düz xətlə cərəyanlı naqilin və cərəyanlı sarğacın maqnit sahələrinin istiqamətləri, onları yaradan cərəyanlarla sağ gedişli burğu qaydası üzrə bağlıdır (şəkil 3.2)

Maqnit sahəsinin ikinci əsas kəmiyyəti maqnit selidir (Φ). Qeyri-müntəzəm maqnit sahəsində maqnit induksiya vektorunun elementar sahədən (şəkil 3.3) seli



Şəkil 3.1. Maqnit sahəsinin elektromexaniki təsiri. Sol əl qaydası



Şəkil 3.2. Düz xətlə naqilin və sarğacın maqnit sahəsi. Burğu qaydası

$$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \cos \theta ds, \quad (3.3)$$

burada α - $\vec{B}$ vektoru ilə $d\vec{S}$ səthinin normalı $\vec{N}$ arasındakı bucaqdır.

S-səthindən keçən maqnit seli Φ ifadəsi ilə təyin edilir:

$$\Phi = \int_S d\phi = \int_S B \cos \alpha ds \quad (3.4)$$

Əgər maqnit seli müntəzəm ($B=\text{const}$) və səth müstəvidirsə, maqnit seli:

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (3.5)$$

Sahə (S) maqnit selinə perpendikulyar və $\alpha=0$ isə

$$\Phi = BS \quad (3.5a)$$

olar. Maqnit selinin vahidi **Veberdir**.

$$1 \text{ Vb} = 1 \text{ T l } 1 \text{ m}^2$$

Mühəndis hesablamalarında maqnit selini Maksvelle (Mks) də ölçürlər:

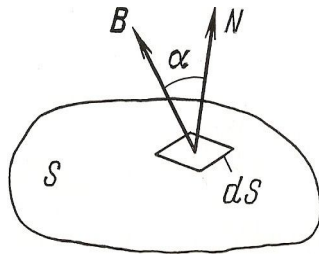
$$1 \text{ Vb} = 10^{-8} \text{ Mks}$$

Maqnit sahələrini tədqiq etdikdə və maqnit quruluşlarını hesabladıqda hesabat kəmiyyəti olan maqnit sahəsinin intensivliyi vektorunda $\vec{H}$ istifadə edilir. Bu kəmiyyətin vahidi Amper/metr (**A/m**)-dir.

Maqnit induksiya vektoru $\vec{B}$ ilə maqnit sahəsinin intensivliyi vektoru aşağıdakı münasibətdədir:

$$\vec{B} = \mu_m \vec{H} \quad (3.6)$$

burada μ_m – mühitin mütləq maqnit nüfuzluğudur.



Şəkil 3.3 Maqnit selinin təyini

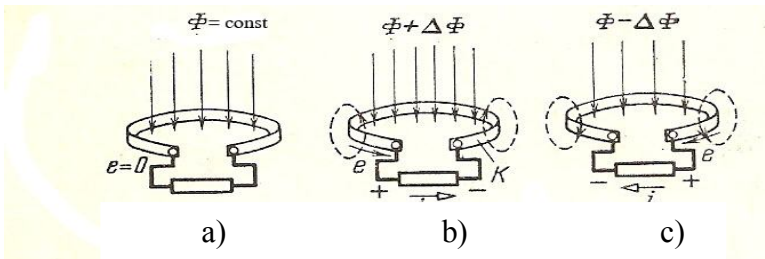
Qeyri-ferromaqnit materialların (ağac, kağız, mis, hava və s.) maqnit nüfuz əmsalı boşluğun maqnit nüfuz əmsalından, demək olar ki, fərqlənmir:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Hn/m}$$

Ferromaqnit materiallar üçün μ_m sabit olmayıb, maqnit induksiyasından asılıdır.

3.2. Maqnit sahəsinin induksion təsiri. Elektromaqnit induksiya qanunu

Maqnit sahəsinin induksion təsirinin əsasını Faradey və Maksvellin elektromaqnit induksiya qanunu təşkil edir. Faradeyin 1831-ci ildə kəşf etdiyi elektromaqnit induksiya qanununa görə hər hansı konturla (K) əlaqədər olan (şəkil 3.4) maqnit seli Φ dəyişdikdə həmin konturda elektrik hərəkət qüvvəsi induksiyanır (yaranır).



Şəkil 3.4 Lensin elektromaqnit ətalət prinsipinin izahı

Bu e.h.q maqnit selinin dəyişmə sürətinə bərabərdir, yəni:

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (3.7)$$

Kontur n sayda sarğıdan ibarət olsa və eyni bir maqnit seli ilə kəsilsə, induksiya e.h.q belə olar:

$$e = -w \frac{d\phi}{dt} \quad (3.8)$$

Bu ifadədəki mənfi işarəsi Lens tərəfindən kəşf edilmiş **elektromaqnit ətalət prinsipinə** əsasən yazılmışdır.

Elektromaqnit ətalət prinsipinin izahı şəkil 3.4-də verilmişdir. Maqnit selinin sabit qiymətində (**$\Phi = \text{const}$**) **$d\phi/dt=0$** və **$e=0$** (şəkil 3.4,a). Maqnit seli **Φ** artdıqda induksiyanlanmış cərəyan əsas maqnit selinin əksinə yönəlmiş öz maqnit selini yaradır (şəkil 3.4,b). Maqnit seli **Φ** azaldıqda (şəkil 3.4,b) induksiyanlanmış cərəyanın yaratdığı sel əsas sellə eyni istiqamətdə olur.

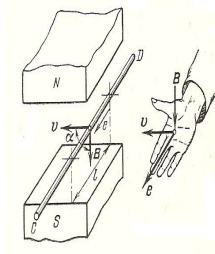
Maqnit sahəsinin elektromexaniki təsirini verilmiş şəkillərdə göstərsək, görürük ki, maqnit seli artdıqda kontura təsir edən elektromexaniki qüvvələr (istiqaməti sol əl qaydası ilə tapılır) konturun yığılmasına, maqnit seli azaldıqda isə böyüməsinə səbəb olur. Buradan Lensin elektromaqnit ətalət prinsipinin fiziki mahiyyəti aşkar olur: **hər hansı elektrik konturu ondan keçən maqnit selini sabit saxlamağa çalışır.**

Müntəzəm maqnit sahəsində maqnit xətlərini kəsərək hərəkət edən düzxətli naqildə (şəkil 3.5) induksiyanlanmış e.h.q belə ifadə edilir:

$$e = B l v \sin \theta \quad (3.9)$$

burada **e** - induksiyanlanmış e.h.q, **V** ; **B** - maqnit induksiya, **T** ; **l** - naqilin maqnit xətlərini kəsən aktiv hissəsi, m; **θ** - sahəyə nəzərən naqilin hərəkət sürəti, m/san; **θ** - sürət vektoru ilə induksiya vektoru arasındakı bucaqdır.

İnduksiyanlanmış e.h.q-nın istiqamətini bu halda Lensin prinsipinə əsaslanmış **sağ əl qaydası** ilə təyin etmək lazımdır.



Şəkil 3.5 Maqnit sahəsində hərəkət edən naqildə e.h.q-nın yaranması. Sağ əl qaydası

3.3. Elektrik generatorunun və mühərrikinin iş prinsipi

Elektrik maşınlarının (generatorların və mühərriklərin) iş prinsipi elektromaqnit induksiya və elektromaqnit qüvvələr qanununa əsaslanmışdır.

Naqilin mühərrik rejimində işləməsinə baxaq (şəkil 3.6). Əgər müntəzəm maqnit sahəsində yerləşdirilmiş naqilə kənardan U gərginliyi tətbiq etsək, naqildən I cərəyanı keçəcəkdir. Yaranmış elektromaqnit qüvvənin $F_{em} = BI$ təsirindən naqil hərəkət edəcək və bu zaman onda e.h.q induksiyanacaq. Bu e.h.q əks-e.h.q adlanır. Əks-e.h.q-nın təsirindən naqilin hərəkəti müntəzəmləşəcək ($F_{em}=F_{mex}$ olacaq) və naqildən axan cərəyan belə ifadə olunacaq:

$$I = \frac{U - E}{r}$$

burada r - naqilin müqavimətidir.

Alınmış tənlikdən tapa bilərik ki:

$$U = Ir + E \quad (3.10)$$

Hər iki tərəfi I -yə vursaq, alarıq:

$$IU = I^2 r + IE \quad (3.11)$$

Əks-e.h.q –nın qiyməti $E=BI\vartheta$ olduğuna görə və yaxud

$$\begin{aligned} IU &= I^2 r + IB I \vartheta \\ IU &= I^2 r + F_{em} \vartheta \end{aligned} \quad (3.12)$$

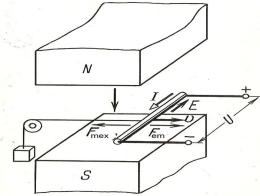
olur, çünki BI , F_{em} qüvvəsini ifadə edir.

(3.12) tənliyinə əsasən sabit cərəyan mənbəyindən verilən güc $IU = P_{el}$ istilik itgilərinin gücü $I^2 r = P$ ilə mexaniki gücün $P_{mex} = F_{em} \cdot \vartheta$ cəminə bərabərdir. Mexaniki gücü hərəkət edən naqili yaradır:

$$P_{em} = P + P_{mex} \quad (3.13)$$

(3.11) və (3.13) ifadələrinin müqaisəsindən görünür ki, hərəkət edən naqilin mexaniki gücü onda induksiyanmış əks-e.h.q ilə mütənasibdir:

$$P_{mex} = F_{em} \cdot \vartheta = El \quad (3.14)$$



Şəkil 3.6 Elementar elektrik mühərrikinin sxemi

Axırncı ifadə elektrik enerjisinin mexaniki enerjiyə çevrilməsi prosesində əks-e.h.q-nın əhəmiyyətini göstərir.

İndi isə naqilin generator rejimində işləməsinə baxaq (şəkil 3.7). Müqaviməti r olan və müntəzəm maqnit sahəsində sabit sürətlə hərəkət edən naqilin uclarına r_y müqavimətli yük qoşsaq, elektromaqnit induksiya qanununa görə naqildə induksiyanlanmış e.h.q belə dövrədə I cərəyanını yaradacaq.

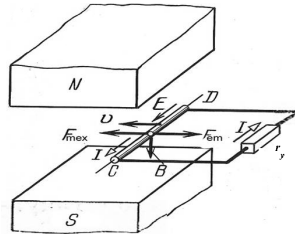
Kirxhofun ikinci qanununa görə yazmaq olar:

$$E = Ir_y + Ir = U + Ir \quad (3.15)$$

Hər tərəfi I -yə vursaq, alırıq:

$$IE = IU + I^2 r \quad (3.16)$$

E.h.q-nin ifadəsini $E = B l \vartheta$ yerinə yazsaq:



Şəkil 3.7. elementar elektrik generatorunun sxemi

$$B l \vartheta = UI + I^2 r \quad (3.17)$$

$\mathbf{BI}/\mathcal{G} = \mathbf{F}_{em}$ maqnit sahəsinin naqilə təsir etdiyi qüvvədir və bu qüvvə öz növbəsində $\mathbf{F}_{mex}$ mexaniki qüvvə ilə müvazinətləşdiyinə görə alırıq.

$$\mathbf{EI} = \mathbf{E}_{em} \cdot \mathcal{G} = \mathbf{F}_{mex} \cdot \mathcal{G} \quad (3.18)$$

(3.18) tənliyindən görünür ki, kənardan naqili hərəkətə gətirmək üçün verilən güc ($\mathbf{P}_{mex} = \mathbf{F}_{mex} \cdot \mathcal{G}$) generatorun yaratdığı elektrik gücünə çevrilir. ($\mathbf{P}_{gen} = \mathbf{EI}$); bu gücün bir hissəsi $\mathbf{r}$ müqavimətində istiliyə ($\mathbf{P} = \mathbf{I}^2 \mathbf{r}$) çevrilir, qalan hissəsi isə ($\mathbf{P}_{el} = \mathbf{UI}$) işlədiciyə sərf olunur:

$$\mathbf{P}_{mex} = \mathbf{P}_{gen} = \mathbf{P}_{el} + \mathbf{P} \quad (3.19)$$

3.4. Maqnit dövrləri

Elektrik maşınları və aparatlarında maqnit sahələri çox vaxt elektromaqnitlərlə, tək-tək hallarda sabit maqnitlərlə yaradılır.

Elektromaqnit, ferromaqnit nüvəli maqnitləşdirici cərəyanlı sargıdan ibarətdir. Sabit maqnit hazırlamağın mürəkkəbliyi, bəla başa gəlməsi və maqnit sahəsini tənzimləməyin çətinliyi elektromaqnitlərin geniş yayılmasına səbəb olmuşdur.

Maqnit sahəsinin gücləndirilməsi və maqnit xətlərinin fəzanın müəyyən hissəsində toplanması üçün elektrik maşın və aparatlarını elə hazırlayırlar ki, maqnit seli əsasən ferromaqnit materiallarından keçsin.

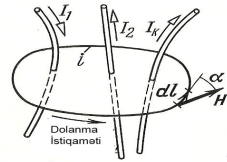
Maqnit selinin qapandığı bir neçə ferromaqnit (polad) və qeyri-ferromaqnit (hava) hissələrin vəhdətinə **maqnit dövrəsi** deyilir.

Tam cərəyan qanunu. Maqnit dövrlərinin hesabının əsasını tam cərəyan qanunu təşkil edir.

Tam cərəyan qanunu riyazi olaraq belə ifadə olunur (şəkil 3.8).

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \oint H \cos \alpha dl = \sum I_k \quad (3.20)$$

burada $\vec{H}$ - fəzanın verilmiş nöqtəsində maqnit sahəsinin intensivlik vektoru; $d\vec{l}$ - qapalı l konturunun uzunluq elementi; α - $\vec{H}$ və $d\vec{l}$ vektorları arasındakı bucaq; $\sum I$ - l konturundan keçən cərəyanların cəbri cəmidir.



Şəkil 3.8. Tam cərəyan qanunu

l konturundan keçən I_k cərəyanının işarəsi o vaxt müsbət olur ki, həmin cərəyanla konturu dolama istiqamətləri sağ gedişli burğu qaydasında olsun.

Maqnit dövrəsi üçün Om qanunu. Bir cinsli materialdan hazırlanmış qapalı üzükşəkilli (toroid) sadə maqnit sahəsinə baxaq (şəkil 3.9).

Maqnitləşdirici dolacaq toroidin çevrəsi üzrə müntəzəm paylanmışdır. Üzüyün içərisində maqnit xətləri mərkəzi O nöqtəsində olan konsentrik çevrələrədən ibarətdir. Maqnit xətlərindən birini i_x qapalı kontur qəbul edib, onun üçün tam

cərəyan qanununu tətbiq edək. Bu zaman $\vec{H}$ və $d\vec{l}$ vektorları istiqamətlərinin eyni ($\alpha=0$), konturun bütün nöqtələrində qurulmuş simmetriyaya görə H_x -in qiymətinin sabit və konturdan keçən cərəyanlar cəminin I_w -ə bərabər olduğunu nəzərə almaq lazımdır. Onda

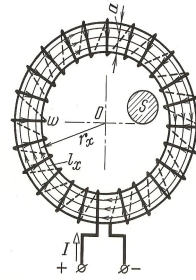
$$\oint H_x \cos \alpha dl = H_x \oint dl = H_x l^x = I_w \quad (3.21)$$

$$\oint H_x \cos \alpha dl = H_x \oint dl = H_x l^x = I_w \quad (3.22)$$

$$H_x = \frac{I_w}{l_x} = \frac{I_w}{2\pi r_x} \quad [A/m]$$

Bərabər paylanmış dolaqlı üzük-vari maqnit keçicisinin maqnit sahəsi üzüyün daxilində toplanır. Üzükdən xaricdə maqnit sahəsi yoxdur ($H=0$).

Maqnit selini təyin edək. Bunun üçün maqnit sahə intensivliyinin orta qiymətindən istifadə edirik:



Şəkil 3.9 Toridal maqnit dövrəsi

$$H_{or} = \frac{I_w}{l}$$

burada l - orta maqnit xəttinin uzunluğudur, m.

$\Phi = B_{or} \cdot S$ və $B_{or} = \mu_m H_{or}$ ifadələrini nəzərə alsaq,

tapırıq:

$$\Phi = B_{or} \cdot S = \mu_m H_{or} \cdot S \quad (3.23)$$

(3.22) ifadəsini nəzərə alsaq,

$$\Phi = \mu_m S \frac{I_w}{l} = \frac{I_w}{\frac{l}{\mu_m S}} = \frac{F}{R_m} \quad (3.24)$$

Bu ifadə **HOPKENSON** tərəfindən çıxarılmış və sonrandan elektrik dövrəsi üçün Om qanununun $I = \frac{E}{\frac{l}{\rho S}} = \frac{E}{r}$

ifadəsinə formal oxşaması səbəbindən Om qanunu adlandırılmışdır. Lakin fiziki proseslərin mahiyyətə fərqi isə çox dərinidir.

$$F=I \cdot w \text{ kəmiyyətinə maqnitləşdirici qüvvə, } R = \frac{l}{\mu_m S}$$

kəmiyyətinə isə maqnit keçiricisinin **maqnit müqaviməti** deyilir.

3.5. Ferromaqnit materiallar və onların xassələri

Elektrik maşın və aparatlarının maqnit dövrələrini əsasən ferromaqnit materiallardan hazırlayırlar. Ona görə də ferromaqnit materialların xassələrinin öyrənilməsi vacib məsələdir. Məlumdur ki, ferromaqnit materialların maqnit nüfuzluğu μ_m sabit olmayıb, R_m maqnit müqavimətinin dəyişən olmasına və maqnit dövrəsi hesabının çətinləşməsinə səbəb olur. Odur ki, maqnit dövrələrini hesablamaq üçün maqnitlənmə əyriləri verilməlidir. Bu əyrilər təcrübə yolu ilə qapalı maqnit keçiricisini (şəkil 3.9-da göstəriləndiyi kimi) sınaqla alınır.

Nümunənin başlanğıc maqnitləşməsinə α əyrisi (şəkil 3.10) uyğun gəlir, buna başlanğıc **maqnitlənmə əyrisi** deyilir. əgər nümunənin $+H_x$ -dan $-H_x$ -ya qədər dövrü maqnitləşdirsək, $B(H)$ qrafiki (μ əyrisi) qapalı əyri olar. Bu əyriyə *histerezis ilgəyi* deyilir. H_x -nin müxtəlif qiymətləri üçün histerezis ilgəhlərinin ailəsini alırıq. H_x -nin H_{mak} -dan böyük qiymətlərində histerezis ilgəyinin sahəsi daha böyükdür. $H_x = H_{mak}$ uyğun histerezis ilgəyinə **sərhəd histerezis ilgəyi** deyilir (şəkil 3.11).

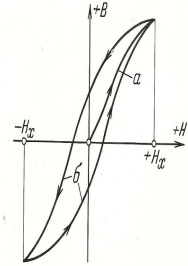
Sərhəd histerezis ilgəyi ferromaqnit materialın $q a l i q$ i n d u k s i y a s ı n ı n B_q və **koertsetiv qüvvəni** H_c müəyyən edir. Histerezis ilgəhlərinin təpələrini birləşdirən əyriyə **əsas maqnitlənmə əyrisi** deyilir.

Bu əyrilər sorğu kitablarında verilir və onlardan maqnit dövrələrinin hesablanmasında istifadə olunur. Koertsetiv qüvvənin materialı qalıq maqnitliyini saxlamaq bacarığını

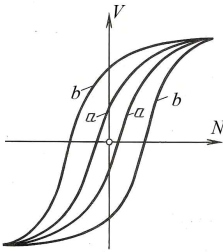
xarakterizə edir. Ferromaqnit materialların dövrü maqnitləşməsi üçün enerji sərf etmək lazımdır. Bu enerjinin miqdarı bir dövr üçün histerezis ilgəyinin sahəsinə mütənasibdir.

Buna görə dövrü maqnitlənmə şəraitində işləyən elektrotexniki quruluşların maqnit keçiricisini histerezis ilgəyin ensiz olan ferromaqnit materiallardan hazırlamaq əlverişlidir (şəkil 3.12, a əyrisi).

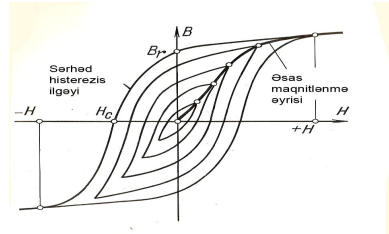
Belə ferromaqnit materiallara maqnit-yumşaq materiallar deyilir (elektrotexniki polad, xüsusi ərintilər, məsələn, permalyol və s.).



Şəkil 3.10 Histerezis ilgəyi



Şəkil 3.11 Sərhəd histerezis ilgəyinin alınması



Şəkil 3.12. Maqnit-yumşaq (a) və maqnit-bərk (b) materialların histerezis ilgəkləri

Sabit maqnit hazırlamaq üçün histerezis ilgəyin enli olan (şəkil 3.12, b əyrisi) ferromaqnit materiallardan istifadə edilir. Belə materiallara maqnit-bərk materiallar deyilir (dəmirin volframla, xromla və alüminumla bir sıra ərintiləri).

3.6. Budaqlanmayan maqnit dövrələrinin hesabi

Bircinsli maqnit dövrəsini (şəkil 3.13) hesabalamaq üçün orta qüvvə xəttini qapalı kontur qəbul edib, tam cərəyan qanunu tətbiq edirlər. Maqnit selinin bir hissəsinin havada

qapandığı çox vaxt nəzərdən atmaq və bütün selin maqnit keçiricisindən qapandığını qəbul etmək olar.

Maqnit dövrələrinin hesabında düz və tərs məsələləri fərqləndirilir. Hər iki məsələ bircinsli maqnit dövrəsi üçün asanlıqla həll edilir.

Düz məsələdə verilmiş maqnit selinə və dövrənin həndəsi ölçülərinə görə maqnit induksiyanı $\mathbf{B} = \Phi/S$, maqnitləşmə əyrisindən $\mathbf{B}$ -yə uyğun maqnit sahə intensivliyinin $\mathbf{H}$, sonra isə tam cərəyan qanununun tətbiqi ilə maqnitləşdirici qüvvəni təyin edirlər:

$$\mathbf{F} = I\omega = \mathbf{H}l \quad (3.25)$$

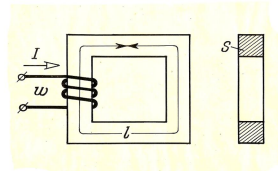
Bircinsli maqnit dövrəsi üçün **t ə r s m ə s ə l ə n i** həll etdikdə (3.25) düsturu ilə verilmiş maqnitləşdirici qüvvəyə və maqnit dövrəsinin həndəsi ölçülərinə əsasən $\mathbf{H}$ -ı, sonra isə maqnitləşmə əyrisindən $\mathbf{B}$ -ni tapırlar.

Axtarılan maqnit selinin $\mathbf{u} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$ düsturu ilə hesablayırlar.

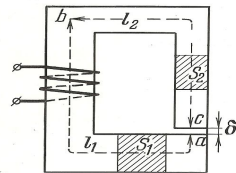
İndi isə bircinsli olmayan maqnit dövrəsini hesablayaq (şəkil 3.14).

Düz məsələ. Maqnit seli, maqnit dövrəsinin həndəsi ölçüləri və ferromaqnit hissələrin maqnitləşmə əyriləri verilmişdir. Maqnitləşdirici qüvvənin təyin edilməsi tələb olunur.

Maqnit dövrəsini bircins hissələrə bölür və orta qüvvə xəttinin yolunu göstəririk. Bütün hissələrdə maqnit seli Φ eyni olduğuna görə həmin hissələrdə maqnit induksiya $\left(\mathbf{B} = \frac{\Phi}{S} \right)$



Şəkil 3.13. Bircinsli maqnit dövrəsi



Şəkil 3.14. Budaqlanmayan maqnit dövrəsi

və maqnit sahə intensivliyi H_x sabitdir. Bu isə otra maqnit xəttinin yaratdığı kontur üçün $\oint \vec{H} d\vec{l}$ integralını asanlıqla

hesablamağa imkan verir. $\oint \vec{H} d\vec{l}$ integralını dövrənin hissələri üçün yazılmış integralların cəmi ilə əvəz etmək olar:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \int_a^b \vec{H}_1 d\vec{l} + \int_b^c \vec{H}_2 d\vec{l} + \int_c^a \vec{H}_3 d\vec{l} = \quad (3.26)$$

$$= H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_0 \delta = I_w$$

burada l_1 və l_2 - dövrənin ferromaqnit hissələrinin uzunluğu, m; δ - hava aralığının enidir, m.

H_1 və H_2 -nin qiyməti maqnit induksiyasının qiymətlərinə $\left(B_1 = \frac{\Phi}{S_1} ; B_2 = \frac{\Phi}{S_2} \right)$

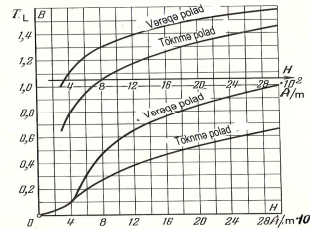
görə maqnitlənmə ayrılərindən tapılır. Şəkil 3.15-də vərəqə və tökmə poladları üçün maqnitlənmə ayriləri göstərilmişdir.

Hava aralığı üçün (δ hissəsi) maqnit sahə intensivliyinin qiyməti induksiyaya ($B_0=B_2$) görə

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 8 \cdot 10^5 B_0 [A/m] \quad (3.27)$$

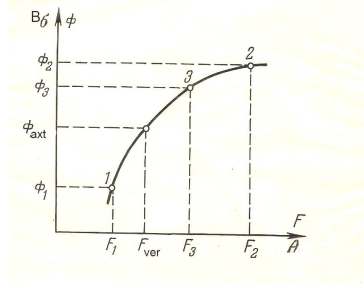
münasibətindən təyin edilir. Bu ifadədə B_0 Tesla ilə ölçülür.

Tərs məsələ. Maqnit dövrəsinin həndəsi ölçüləri, ferromaqnit materialların xarakteristikaları və maqnitləşdirici



Şəkil 3.15 Poladın maqnitləşmə ayriləri

qüvvə $F=I \cdot w$ verilmişdir; Φ maqnit selini təyin etmək lazımdır. Belə məsələləri ardıcıl yaxınlaşma metodu ilə həll edirlər: maqnit selinə bir neçə dəfə ixtiyari qiymətlər verib, hər bir qiymət üçün, maqnitləşdirici qüvvəni düz məsələdəki kimi hesablayırlar. Alınmış qiymətlərə görə $\Phi(F)$ əyrisini qururlar (şəkil 3.16).



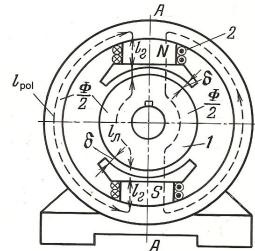
Şəkil 3.16. Tərs məsələnin həlli

Bu əyridən maqnitləşdirici qüvvənin verilmiş qiymətinə $F_{ver}=I \cdot w$ görə maqnit selinin axtarılan qiyməti Φ_{akt} təyin edirlər.

3.7. Budaqlanan maqnit dövrələrinin hesabi

Elektrik maşınları və aparatlarının maqnit dövrələri çox vaxt budaqlanan olur və maqnit seli ayrı-ayrı sellərə budaqlanaraq bir neçə yoldan qapanır (şəkil 3.17, 3.18, 3.19). Budaqlanan maqnit dövrələri simmetrik və qeri-simmetrik olur.

Simmetrik maqnit dövrələri. Əgər maqnit dövrəsinin (şəkil 3.17) simmetriya oxu AA üzrə iki müstəqil hissəyə ayırısaq, bu dövrənin iş şəraitini dəyişməz və maqnit selləri öz qiymətlərində qalar. Bununla əlaqədar olaraq simmetrik maqnit dövrəsinin bir hissəsi üçün aparmaq kifayətdir. Həmin hissə sadə dövrə olduğu üçün 3.6 bölməsindəki metodla hesabat edilir.



Şəkil 3.17. Elektrik maşının simmetrik maqnit dövrəsi

Qeyri-simmetrik maqnit dövrələri. Belə dövrələrin hesabi maqnit dövrələri üçün Kirxof qanunlarının tətbiqinə əsaslanmışdır və qeyri-xətli

sabit cərəyan dövrələrinin hesabına oxşardır.

Maqnit xətlərinin kəsilməzliyinə görə (şəkil 3.18) maqnit nöqtəsinin istənilən düyünündə maqnit sellərinin cəbri cəmi sıfıra bərabərdir:

$$\sum \Phi = 0 \quad (3.28)$$

Bu ifadə **maqnit dövrəsi üçün Kirxofun birinci qanunu adlanır.**

abcd konturuna tam cərəyan qanununu tətbiq edək: Konturu dolanma istiqamətini ixtiyari (məsələn, saat əqrəbi istiqamətində) seçirik:

$$F_1 - F_2 = H_1 l_1 - H_2 l_2$$

$H_2 l_2$ həddi ona görə mənfi işarə ilə götürülmüşdür ki, H_2 -nin istiqaməti konturun dolanma istiqamətinin əksinədir.

$$H_1 = \frac{\Phi_1}{S_1 m_1} \text{ və } H_2 = \frac{\Phi_2}{S_2 m_2}$$

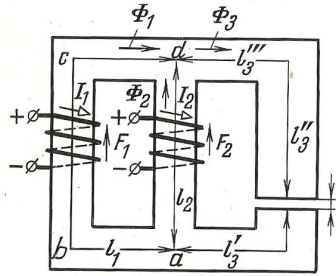
əvəz etsək, alırıq.

$$F_1 - F_2 = \Phi_1 \frac{l_1}{S_1 m_1} - \Phi_2 \frac{l_2}{S_2 m_2} = \Phi_1 R_1 - \Phi_2 R_2$$

və yaxud

$$\sum_{k=1}^n F_k = \sum_{k=1}^n \Phi_k R_k \quad (3.29)$$

burada F_k , Φ_k , R_k - uyğun olaraq dövrənin k -cı hissəsinin maqnitləşdirici qüvvəsi, maqnit seli və maqnit müqavimətidir.



Şəkil 3.18. İki maqnitləşdirici dolaqlı qeyri-simmetrik maqnit dövrəsi

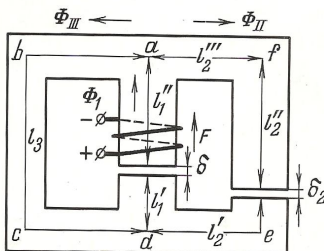
$\Phi_k R_k$ hasilı elektrik dövrələrində I_r hasilinə oxşayır. Ona görə buna **maqnit gərginliyi** deyilir. (3.29) tənliyi maqnit dövrəsi üçün Kirxofun ikinci qanunu ifadə edir.

Bir maqnitləşdirici dolaqlı qeyri-simmetrik maqnit dövrəsinin hesablanma qaydasına baxaq (şəkil 3.19).

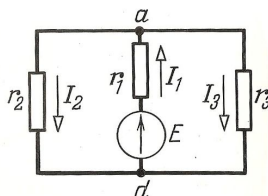
Verilir: a) dövrənin həndəsi ölçüləri; b) ferromaqnit material-ların maqnitlənmə əyriləri; c) dolağın maqnitləşdirici qüvvəsi F .

Dövrənin bütün hissələrində maqnit sellərini təyin etmək tələb olunur.

Ayrı-ayrı budaqların *ad*, *abcd* və *afed* maqnit müqavimətlərini R_I , R_{II} və R_{III} ilə, onlardan keçən maqnit sellərini isə Φ_I , Φ_{II} , Φ_{III} ilə işarə edək.



Şəkil 3.19. Bir maqnitləşdirici dolaqlı qeyri-simmetrik maqnit dövrəsi



Şəkil 3.20. Bir mənbəli budaqlanan elektrik dövrəsi

Kirxofun qanunlarını *afeda* və *abcd* konturlarına, eləcə də a düyününə tətbiq etsək, alarıq:

$$\left. \begin{aligned} F &= \Phi_I R_I + \Phi_{II} R_{II} \\ F &= \Phi_I R_I + \Phi_{III} R_{III} \\ \Phi_I &= \Phi_{II} + \Phi_{III} \end{aligned} \right\} \quad (a)$$

Bu tənliklər sistemi şəkil 3.20-də göstərilmiş elektrik dövrəsində cərəyanları təyin etmək üçün yazılmış

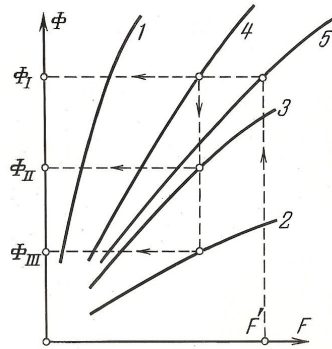
$$\left. \begin{aligned} E &= I_1 r_1 + I_2 r_2 \\ E &= I_1 r_1 + I_3 r_3 \\ I_1 &= I_2 + I_3 \end{aligned} \right\} \quad (b)$$

Tənliklər sisteminə oxşardır. Qeyri-xəttilik elektrik dövrələri qrafoanalitik üsulla hesablandığı kimi, belə maqnit dövrələri də həmin üsulla aşağıdakı qayda ilə hesablanır:

Maqnit selinə Φ bir neçə qiymət verib, hər bir qiymət üçün hesabat kəmiyyətini $\Phi R = F$ təyin edirlər. Sonra hər budaq üçün və b e r a m p e r xarakteristikası adlanan $\Phi(F)$ qrafiklərini qururlar (şəkil 3.21-də 1, 2 və 3 əyriləri uyğun olaraq *ad*, *afed* və *abcd* hissələri üçündür).

Maqnit dövrəsinin iki paralel budağını (*abcd* və *afed*) bir ekvivalent budaqla əvəz etmək olar. Bu budağın veber-ampere xarakteristikası (əyri 4) 2 və 3 əyrilərinin ordinatlarını toplaqlamaqla alınır.

Beləliklə, budaqlanan maqnit dövrəsi budaqlanmayan ekvivalent dövrə ilə əvəz edilir. 1 və 4 əyrilərinin absisələrini toplamaqla bütün dövrənin veber-ampere xarakteristikasını (əyri 5) alırlar. Bu asılılıqdan istifadə edib maqnitləşdirici qüvvənin verilmiş F_1 qiymətinə görə dövrənin budaqlanmayan hissəsində maqnit selini Φ_1 təyin edirik. Bu selin hissələri Φ_{II} və Φ_{III} 2,3 və 4 əyrilərinin köməyi ilə tapılır.



Şəkil 3.21 Qeyri-simmetrik maqnit dövrəsi üçün volt-ampere xarakteristikaları

3.8. Özünəinduksiya

Sabit cərəyanlı dövrədə sabit maqnit seli yaranır. Əgər cərəyan dəyişməz qalırsa, maqnit seli də dəyişmir və dövrənin iş rejiminə heç bir təsir göstərmir. Dövrədə cərəyanın hər hansı dəyişməsi dövrənin xüsusi maqnit selinin dəyişməsinə səbəb olur: nəticədə dövrənin elementlərində e . h. q. induksiyanır:

$$e = \frac{d\phi}{dt} \quad (3.30)$$

Qapalı konturda xüsusi maqnit selinin formasından nəticəsində e.h.q.-nin induksiyanması hadisəsinə *ö z ü n ə i n d u k s i y a* h a d i s ə s i, e.h.q.-yə isə *ö z ü n ə i n d u k s i y a* e.h.q (e_L) deyilir.

Konturun xüsusi ilişən maqnit seli ϕ onun cərəyanından asılıdır və ferromaqnit mühit yoxdursa, cərəyanla i düz mütənasibdir:

$$\phi = Li \quad (3.31)$$

Elektrik dövrəsinin ölçülərindən və formasından asılı olan L vuruğuna **induktivlik** deyilir. İnduktivliyin vahidi Henridir (Hn):

$$1 Hn = \frac{1 Veber}{1 Amper} = \frac{1 Volt \cdot san}{1 Amper} = 1 Om \cdot san$$

(3.31) ifadəsini nəzərə alsaq, özünəinduksiya e.h.q üçün

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (3.32)$$

olar. (3.32) ifadəsində mənfi işarəsi göstərir ki, özünəinduksiya e.h.q onu yaradan cərəyanın dəyişməsinə əks təsir göstərir. Bu əks-təsir dövrənin induktivliyi böyük olduqca böyük olur. Deməli, induktivlik dövrədən axan cərəyanın dəyişməsinə

dövrənin mane olmaq qabiliyyətini göstərir. Elektrik dövrəsinin induktivliyi maqnit selinin keçdiyi mühitin maqnit xassələrindən də asılıdır. Böyük induktivlik almaq üçün sarğaclardan istifadə olunur.

Toroidal sarğacın induktivliyini hesablayaq. Maqnit sahəsinin intensivliyi

$$H = \frac{Iw}{l}$$

Nüvədə maqnit seli belə ifadə edilir.

$$\Phi = BS = \frac{Iw}{l} \mu S$$

Burada toroidal sarğacın bütün sarğılarının eyni maqnit seli ilə (Φ) kəsişdiyini hesab edirik; beləliklə:

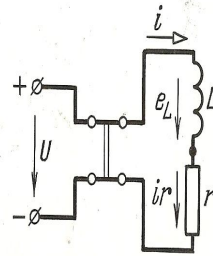
$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{w\Phi}{I} = \frac{w^2 \mu S}{l} = \frac{w^2}{R_m} \quad (3.33)$$

burada R_m - nüvənin maqnit müqavimətidir.

Sarğacın maqnit sahəsinin enerjisi. Sabit U gərginlikli şəkil 3.22-də göstərilmiş dövrəyə baxaq. Dövrə iki hissədən müqavimət çox kiçik olan L induktivlikli sarğacdən və induktivliyi çox kiçik olan müqavimətdən ibarətdir.

Dövrəni qapadıqda cərəyan öz qiymətini $I = \frac{U}{r}$ (Om qanunu

ilə təyin edilir) ani yox, özünəinduksiya e.h.q-nın təsirinədən tədricən alacaqdır. Dövrəyə Kirxofun ikinci qanununu tətbiq etsək, alarıq:



Şəkil 3.22. Sarğacın sabit gərginliyə qoşulması

$$U = ir - e_L = ir + L \frac{di}{dt} \quad (3.34)$$

Bu ifadədən görünür ki, tətbiq edilmiş gərginlik U müqavimətindəki gərginlik düşgüsünə və dövrədə yaranan özünəinduksiya e.h.q-ni dəf etməyə sərf olunur.

(3.34) ifadəsinin hər iki tərəfini idt -yə vursaq,

$$U idt = i^2 r dt + L di \quad (3.35)$$

alırıq. Bu tənlik enerjinin saxlanması qanununu ifadə edir. Buna görə dövrəyə dt müddətində daxil olmuş $U idt$ enerjisi r müqavimətində istiliyə ($i^2 r dt$) ayrılır və qismən induktiv sarğacın maqnit sahəsində ($L di$) toplanır.

Dövrədə cərəyanın istənilən andakı qiyməti üçün maqnit sahəsində toplanmış enerji

$$W_m = \int_0^I L di = \frac{LI^2}{2} \quad (3.36)$$

Qərarlaşmış cərəyan üçün ($i=I$) maqnit sahəsinin enerjisi

$$W_m = \frac{LI^2}{2} \quad (3.36,a)$$

(3.36) düsturundan görünür ki, induktivlik L dövrənin maqnit sahəsində enerji toplamaq qabiliyyətini (elektrokinetik enerji) də ifadə edir.

Elektrik dövrlərində induktivliyin təsiri formaca mexaniki sistemlərdə kütlənin ətalət təsirinə oxşardır. Buna əmin olmaq üçün özünəinduksiya e.h.q.-nin ifadəsi

$$\left(e_L = -L \frac{di}{dt} \right) \text{ ilə ətalət qüvvəsinin ifadəsini } \left(F_{em} = -m \frac{d\vartheta}{dt} \right)$$

və eləcə də maqnit sahəsində toplanmış enerji $\left[W = \frac{1}{2} (LI^2) \right]$ ilə

ϑ sürəti ilə hərəkət edən m kütləsinin kinetik enerjisinin

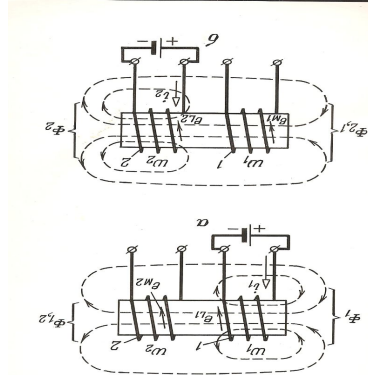
$$\left[W_{kin} = \frac{1}{2} (m \vartheta^2) \right] \text{ ifadələrini müqaisə etmək kifayətdir.}$$

3.9. Qarşılıqlı induksiya

Elektrotexniki qurğularda ayrı-ayrı elementlər çox vaxt ümumi maqnit seli ilə kəsişir. Şəkil 3.23-də maqnit rabitəli iki sarğac göstərilmişdir.

Əgər **1** sarğacından i_1 cərəyanı keçirsə (şəkil 3.23,a) və açıq olan **2** sarğacı ona çox yaxın yerləşdirilibsə, onda **1** sarğacının maqnit selinin bir hissəsi **2** sarğacının sarğıları ilə də kəsişəcəkdir. **1** sarğacının ümumi maqnit selinə Φ_1 **özünəinduksiyasseli**, hər iki sarğacla eyni zamanda birləşən maqnit selinə $\Phi_{1,2}$ isə **qarşılıqlı induksiya seli** deyilir.

Ferromaqnit mühit olmadıqda Φ_1 və $\Phi_{1,2}$ maqnit selləri və bunlara uyğun $\Psi_1 = w_1 \Phi_1$ və $\Psi_{1,2} = w_2 \Phi_{1,2}$ kəsişmə selləri i_1 cərəyanına mütənasib olacaqdır:



Şəkil 3.23 İnduktiv rabitəli dövrələr

$$\Psi_1 = L_1 i_1, \quad \Psi_{1,2} = M_{1,2} i_1 \quad (3.37)$$

burada $M_{1,2}$ – **1** və **2** sarğıları arasında qarşılıqlı induktivlikdir.

1 sarğacının i_1 cərəyanı dəyişdikdə **2** sarğacında induksiyaalan e.h.q.

$$e_{M2} = \frac{d\Psi_{1,2}}{dt} = -M_{1,2} \frac{di_1}{dt} \quad (3.38)$$

qarşılıqlı induksiya e.h.q. adlanır və hadisəyə qarşılıqlı induksiya hadisəsi deyilir.

Müləhizələri **2** sarğacında i_2 cərəyanın axması və **1** sarğacının açıq olması, **1** sarğacında qarşılıqlı induksiya e.h.q üçün alırıq:

$$e_{M1} = \frac{d\psi_{2,1}}{dt} = -M_{2,1} \frac{di_2}{dt} \quad (3.39)$$

burada $M_{2,1}$ - 2 və 1 sargıqları arasında qarşılıqlı induktivlikdir.

Təcrübə göstərir ki, $M_{1,2}=M_{2,1}=M$. Qarşılıqlı induktivliyin (M) vahidi **Henridir**.

Hər iki sargıacdən cərəyan axdığı ümumi hala baxaq (şəkil 3.24). Sargıqların cərəyanları i_1 və i_2 eyni zamanda dəyişərlərsə, hər iki sargıacda həm özünəinduksia, həm də qarşılıqlı induksiya e.h.q.-ləri yaranar:

$$\left. \begin{aligned} e_{L1} &= -L_1 \frac{di_1}{dt}, & e_{M1} &= -M \frac{di_2}{dt} \\ e_{L2} &= -L_2 \frac{di_2}{dt}, & e_{M2} &= -M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

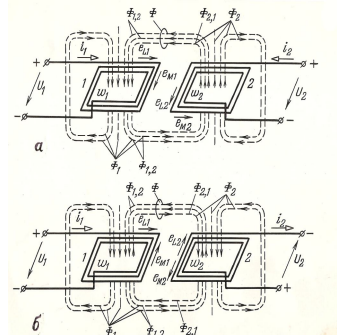
Maqnit rabitəli iki dövrənin maqnitləşdirici qüvvələrinin təsiri istiqamətlərində iki hal ola bilər:

a) düz (şəkil 3.24,a); $\Phi_{1,2}$ və $\Phi_{2,1}$ maqnit selləri eyni istiqamətdə olub bir-birini gücləndirir. Bu zaman hər sargıacda induksiyaalan e.h.q.

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= e_{L1} + e_{M1} \\ e_2 &= e_{L2} + e_{M2} \end{aligned} \right\} \quad (3.41)$$

b) əks (şəkil 3-24,b) $\Phi_{1,2}$ və $\Phi_{2,1}$ maqnit selləri bir-birinin əksinə təsir edir və bir-birini zəiflədir. Bu zaman

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= e_{L1} - e_{M1} \\ e_2 &= e_{L2} - e_{M2} \end{aligned} \right\} \quad (3.42)$$



Şəkil 3.24. Maqnitləşdirici qüvvələrin düz (a) və əks (b) təsiri

Maqnit rabitəli iki sarğac sisteminin maqnit sahəsində toplanan enerji

$$W_m = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} \pm M_{i_1 i_2} \quad (3.43)$$

Bu ifadə “müsbət” işarəsi maqnitləşdirici qüvvələrin düz təsirinə, “mənfi” işarəsi isə əks təsirinə aiddir.

Qarşılıqlı induktivliyin (M) sarğacların induktivlikləri (L_1 və L_2) hasilinin kvadrat kökünə olan nisbətinə ***rabitə əmsali*** deyilir.

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

Qarşılıqlı induksiya hadisəsindən elektrotexnikada geniş istifadə olunur. Transformatorların quruluşu və iş prinsipi bu hadisəyə əsaslanmışdır. Qarşılıqlı induksiya metal məmulatları qızdırmaq və metalı əritmək üçün induksiya peçlərdə istifadə edilir. Bəzi hallarda qarşılıqlı induksiya xoşagəlməz nəticələr verir. Məsələn, radio quruluşlarında həmin hadisənin təsiri ilə zərərli e.h.q.-lər yarana bilər və bu da signalın təhris edilməsinə səbəb olur.

3.10. Maqnit dövrələri və elektromaqnit hadisələrinə aid sərbəst işlər üçün məsələlərin həlli metodikası.

Sabit maqnitli maqnit dövrələrinin hesablanması haqqında anlayış

Məsələ 3.1.

Sabit maqnitlərdən müxtəlif quruluşlarda, məsələn maqnetoelektrik generatorları, ölçü cihazları, relelər və s. də maqnit sahəsi yaratmaq üçün geniş istifadə olunur.

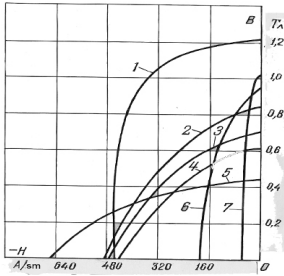
Bu quruluşların hər birində sabit maqnitin yaratdığı maqnit seli maqnit-yumuşaq materialdan olan hissələrdən (armatur adlanır) və hava aralıqından keçir. Belə maqnit dövrəsində maqnitləşdirici dolaq olmadığı üçün tam cərəyan qanunu belə ifadə edilir:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = 0 \quad (3.45)$$

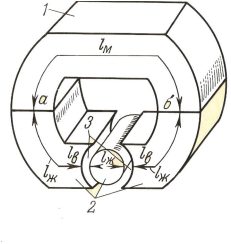
Armaturada və hava aralığında maqnit sahəsinin intensivliyi induksiya ilə eyni istiqamətdədir və deməli, sabit maqnitin içində maqnit sahə intensivliyi H_M maqnit induksiyasının B_M əksinə yönəlmişdir. Əgər armaturda maqnit gərginliyi düşgüsünü kiçik olduğuna görə nəzərdən atsaq, yaza bilərik:

$$H_M l_M + H_h l_h = 0 \quad (3.46)$$

burada $H_h l_h$ – hava aralığında maqnit gərginlik düşgüsü; l_M – sabit maqnitin içərsindəki orta maqnit xəttinin uzunluğudur.



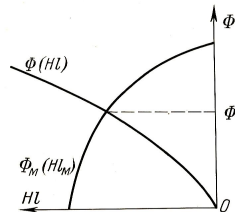
Şəkil 3.25 Dəmir-nikel alimium sistemli xəlitələr və marten poladları üçün maqnitləşmə əyriləri:
1-ANKO4; 2-ANKO2; 3-ANKO1;
4-AN2; 5-ANK; 6-polad (30%co);
7-volfram poladı E7V6



Şəkil 3.26. Sabit maqnitli maqnit dövrəsi

Sabit maqnitləri hesablamaq və onlardan istifadə etmək üçün sərhət histerezis ilgəyinin B-H koordinat sistemindəki ikinci rübündə yerləşmiş hissəsi əsas xarakteristika və **maqnitləşmə əyrisi** adlanır. Şəkil 3.25-də bir neçə maqnit-bərk materialın maqnitləşmə əyriləri göstərilmişdir.

Sabit maqnitli ən sadə maqnit dövrələrinin (şəkil 3.26) hesabətını apardıqda əvvəlcə həndəsi ölçüləri təyin edib, sabit maqnitin maqnitləşmə əyrisinin koordinatlarını dəyişir lər: Φ və HL . Bu koordinat oxla-



Şəkil 3.27. Sabit maqnitli dövrənin həlli

rında miqyasları: B -i S_M -ə və H -ı I_M -ə vurmaqla əldə edilir (şəkil 3.27). Sonra maqnit dövrəsinin qalan hissəsi üçün maqnit selinin maqnit gərginliyindən (U_{abM}) asılılığını qururlar. Alınmış $\Phi(HI)$ və ya $\Phi(U_{abM})$ əyrisini $\Phi_m(HI_M)$ olan qrafikdə koordinat başlanğıcından sola doğru qururlar. Bu iki əyrinin kəsişmə nöqtəsinin ordinatı hava aralığında maqnit selinin qiymətini verəcəkdir.

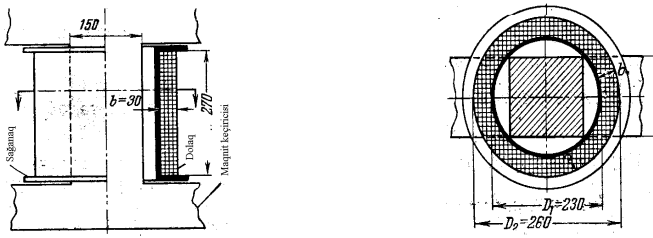
Maqnitləşdirici qüvvəyə görə sarğacların hesabı

Məsələ 3.2

Maqnit dövrəsini hesabladıqda sarğacın maqnitləşdirici qüvvəsi F təyin edilir. Sonra sarğac dolağı sarğalarının sayını və icra edildiyi məftilin en kəsiyini hesablamaq tələb olunur. Sarğacın hesabında qidalandığı şəbəkənin gərginliyi U (paralel birləşmə zamanı) və yaxud sarğacın dolağından axacaq cərəyan (ardıcıl birləşmə zamanı) verilə bilər.

Konkret misalda paralel qoşulacaq sarğacın hesablanması ardıcılığına baxaq.

Maqnit keçiricisinin ölçüləri verilmiş hissəsində (şəkil 3.28) dolaq yerləşdirmək lazımdır. Dolağın maqnitləşdirici qüvvəsi $F=6000 \text{ A}$ olmalıdır. Bəsləyici şəbəkənin gərginliyi $U=110 \text{ V}$. Dolaq PBD markalı pambıq-kətan izolyasiyalı mis məftildən hazırlanmalıdır. Ətraf mühitin maksimal temperaturu $\theta_{\text{muh}} = 35^\circ \text{C}$. Dolağın buraxıla bilən qızma temperaturu $\theta_{\text{bur}} = 100^\circ \text{C}$. Sarğac uzun müddətli qoşulmaya hesablanmalıdır.



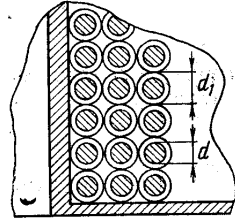
Şəkil 3.28 Maqnitləşdirici sarğacın nüvədə yerləşdirilməsinə

Dolaq silindirik karkasa sarınacaqdır. Dolağın hündürlüyü h maqnit keçiricisinin verilmiş ölçülərinə görə təyin edilir. Dolağın bütün qatlarının qalınlığını aşağıdakı münasibətdən təyin edirik:

$$k_0 b h \delta = I_w = F \quad (3.47)$$

burada $k_0 = bh$ – sahəsinin naqıl materiallar doldurma əmsalıdır (şəkil 3.29); δ – cərəyanın buraxılabilən sıxlığıdır, A/mm^2 .

İlk hesabatda $k_0 = 0,5$; $\delta = 1,5 \text{ A/mm}^2$ qəbul edirik.



Şəkil 3.29 Doldurma əmsalı k_0 -ın təyini

$$b = \frac{F}{k_0 h \delta} = \frac{6000}{0,5 \cdot 270 \cdot 1,5} \approx 30 \text{ mm}$$

Dolaq qalınlığının $b \approx 30 \text{ mm}$ və sarğacın diametrinin $D_1 = 230 \text{ mm}$ olduğunu bilərək, dolağın sarğısının orta uzunluğunu təyin edirik:

$$l_{or} = \pi(D_1 + b) \cdot 10^{-3} = \pi(230 + 30) \cdot 10^{-3} = 0,82 \text{ m}$$

Məftilin diametrini təyin edək. Bundan ötrü

$$F = I_w = \frac{U}{r} w \quad (3.48)$$

münasibətindən istifadə edirik. Burada $r = \frac{l_{or} w}{\gamma S} = \frac{4 l_{or} w}{\gamma \pi d^2}$ dolağın

müqavimətidir. r -in ifadəsini (3.48) düsturunda yerinə yazsaq:

$$d = \sqrt{\frac{4 l_{or} F}{U \gamma \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,82 \cdot 6000}{110 \cdot 47 \cdot 3,14}} = 1,1 \text{ mm} \quad (3.49)$$

($\gamma = 47 \text{ m/Om} \cdot \text{mm}^2 - 80^\circ \text{C}$ temperaturda misin xüsusi keçiriciliyi-dir). Sorğu kitabından diametri $d = 1,12 \text{ mm}$, en kəsiyi $S = 0,98 \text{ mm}^2$ olan məftil seçirik; izolyasiya ilə məftilin diametri $d_1 = 1,39 \text{ mm}$. d və d_1 diametrlərini bilib doldurma əmsalının həqiqi qiymətini tapırıq:

$$k_0 = \frac{\pi d^2}{4 d_1^2} = \frac{3,14 \cdot 1,12^2}{4 \cdot 1,39^2} = 0,51 \quad (3.50)$$

k_0 -in alınmış qiyməti qəbul olunmuş qiyməti ilə eynidir və hesabı dəqiqləşdirmək tələb edilmir (əks halda, b və d -nin qiymətlərini yenidən hesablamaq lazım olardı).

Dolağın cərəyanı

$$I = \delta S = 1,5 \cdot 0,98 = 1,47 \text{ A}$$

Dolağın lazımı sarğılar sayı

$$w = \frac{F}{I} = \frac{6000}{1,47} \approx 4100 \text{ sarğı}$$

Sarğacın tələb etdiyi güc

$$P = UI = 110 \cdot 1,47 \approx 162 \text{ Vt}$$

İndi isə sarğacı qızma şəraitinə yoxlamaq lazımdır. Sarğacın tələb etdiyi gücün tamamilə istiliyə çevrildiyini və istiliyin əhatə edən mühitə sarğacın yalnız yan səthindən yayıldığını nəzərə alsaq, istilik balansını tənliyi belə yazılar:

$$P = \alpha S_{\text{yan}} (\theta_{\text{sar}} - \theta_{\text{muh}}) \quad (3.51)$$

(istilikvermə əmsalını $\alpha = 12 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Vt}}{\text{sm}^2 \cdot \text{der}}$ qəbul edirik).

Sarğacın yan səthi

$$S_{\text{yan}} = \pi(D_1 + 2b) \cdot h \cdot 10^{-2} = 3,14 \cdot 290 \cdot 270 \cdot 10^{-2} \approx 2500 \text{ sm}^2$$

Sarğacın qərarlaşmış qızma temperaturu

$$\theta_{\text{sar}} = \theta_{\text{muh}} + \frac{P}{\alpha S_{\text{yan}}} = 35 + \frac{162}{12 \cdot 10^{-4} \cdot 2500} = 35 + 54 = 89^0 \text{ C}$$

Sarğacın qızma temperaturu buraxıla bilən qiymətdən kiçikdir. Əgər $\theta_{\text{sar}} > \theta_{\text{bur}}$ olsaydı, hesabı yenidən δ -nın kiçildilmiş qiyməti üçün aparmaq lazım olardı. Bu halda isə cərəyan sıxlığını bir qədər artıq götürüb bütün hesabı yenidən aparmaq lazımdır. Sarğacı verilmiş F və I -yə görə hesablamaq çox sadədir. Dolağın sarğıları sayı

$$w = \frac{F}{I}$$

münasibətindən, məftilin diametri isə qəbul edilmiş δ - ya görə hesablanır:

$$S = \frac{I}{\delta}$$

Qızmaya yoxlama yuxarıda göstərilən qayda ilə aparılır.

Məsələ 3.3

$L = 0,75 \text{ m}$ uzunluğunda düz naqıl sabit cərəyan mənbəyindən bəslənilir və elektomaqnit qüvvəsinin təsiri ilə maqnit sahəsində sahəyə perpendikulyar istiqamətdə hərəkət edir. Maqnit sahəsinin induksiya $B=1 \text{ Tl}$, mənbənin gərginliyi $U=4 \text{ V}$, dövrənin müqaviməti $r=0,05 \text{ Om}$ –dur. Naqılın yaratdığı mexaniki güc $P_{mex}=60 \text{ Vt}$ isə, o, hansı sürətlə hərəkət edir.

Həlli.

Naqılın sabit sürətlə hərəkət etməsi $F_{mex}=F_{em}$ müvazinət şəratında mümkündür. Bu tənlikdə məlum ifadələri

$$F_{mex} = \frac{P_{mex}}{g}, \quad F_{em} = BIl$$

nəzərə alsaq, məchul sürətə görə kvadrat tənlik alınır:

$$BIg^2 - Ug + \frac{rP_{mex}}{B} = 0$$

Ədədi qiymətləri yerinə yazıb tənliyi həll edirik: $r_y=0,25 \text{ Om}$ olan metal naqıl hərəkət etdirilir. naqıl $r_y=1,75 \text{ Om}$

$$0,75g^2 - 4g + 4 = 0$$

$$g = \frac{2 \pm \sqrt{4-3}}{0,75} = \frac{2 \pm 1}{0,75},$$

$$g_1 = 4 \text{ m/san}; \quad g_2 = 1,33 \text{ m/san}$$

Sürət üçün alınmış hər iki qiymətin doğruluğunu yoxlamaq işi oxucuya həvalə edilir.

Məsələ 3.4

Sabit maqnitin NS qütbləri arasında (şəkil 3.7) kənar qüvvə ilə uzunluğu $l=0,8 \text{ m}$ və müqaviməti $r_y=1,75 \text{ Om}$ qiymətli xarici müqavimətlə qapanmışdır. Dövrədən axan cərəyan $I=12 \text{ A}$, maqnit sahəsinin induksiya $B=1,2 \text{ Tl}$ isə naqıldə induksiyaalanan e.h.q-ni, naqılın hərəkət sürətini tapmalı və dövrənin enerji balansını yoxlamalı.

Həlli

Naqildə induksiyaalanan e.h.q-nı Kirxhofun ikinci qanunu dövrəyə tətbiq edərək tapırıq;

$$E = I \cdot (r_g + r_y) = 12 \cdot (0,25 + 1,75) = 24 \text{ V}$$

Naqilin hərəkət sürəti

$$g = \frac{E}{Bl} = \frac{24}{1,2 \cdot 0,8} = 25 \text{ m / san}$$

Naqilə təsir edən qüvvə isə

$$F_{eM} = BI l = 1,2 \cdot 12 \cdot 0,8 = 11,52 \text{ N}$$

Deməli, naqildə $F_{Mex}=F_{eM}=11,52 \text{ N}$ mexaniki qüvvə tətbiq edilməli və bunun yaratdığı güc

$$P_{Mex} = F_{Mex} g = 11,52 \cdot 25 = 288 \text{ Vt}$$

olmalıdır.

Naqildə istehsal olunana $P_e=EI=24 \cdot 12=288 \text{ Vt}$ elektrik gücünün bir hissəsi $P_{r_g}=I^2 r_g=12^2 \cdot 0,25=36 \text{ Vt}$ istilik şəklində naqilin özündə itir, digər hissəsi $P_{r_y}=I^2 r_y=12^2 \cdot 1,75=252 \text{ Vt}$ yük müqavimətində sərf olunur. Güclər balansını ödənilir: $P_e=P_{Mex}=288 \text{ Vt}$.

Məsələ 3.5

Maqnit dövrəsinin hava (şəkil 3.14) aralığında $B_{hava}=1,2 \text{ Tl}$ maqnit induksiyası yaratmaq tələb olunur. Maqnit keçiricisi polad vərəqələrdən hazırlanmışdır. (maqnitlənmə əyrisi şəkil 3.15-də verilmişdir). Maqnitləşdirici qüvvəni tapmalı.

Maqnit dövrəsinin ölçüləri verilmişdir: $S_l=300 \text{ sm}^2$, $S_2=150 \text{ sm}^2$, $l_2=99,8 \text{ sm}$, $\delta=0,2 \text{ sm}$, $l_1=110 \text{ sm}$, $S_\delta=150 \text{ sm}^2$.

Həlli.

Maqnit selinin və dövrənin hər bir hissəsində maqnit induksiyasını tapırıq:

$$\Phi = B_{\text{hava}} \cdot S_{\delta} = 1,2 \cdot 0,015 = 0,018 \text{ Vb}$$

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{0,018}{150 \cdot 10^{-4}} = 0,6 \text{ Tl}$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{0,018}{150 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \text{ Tl}$$

Polad vərəqə üçün maqnitlənmə əyrisindən istifadə edib, maqnit dövrəsinin birinci (l_1) və ikinci (l_2) hissəsində maqnit sahə intensivliyinin qiymətini tapırıq.

$$H_1=106 \text{ A/m}; H_2=550 \text{ A/m}.$$

Hava aralığında maqnit sahə intensivliyini belə tapırıq:

$$H_{\text{hava}}=8 \cdot 10^5 \cdot B_{\text{hava}}=8 \cdot 10^5 \cdot 1,2=9,6 \cdot 10^5 \text{ A/m}.$$

Dolağın axtarılan maqnitləşdirici qüvvəsi

$$F = Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_{\text{hava}} \cdot \delta = 106 \cdot 1,1 + 550 \cdot 0,993 + 9,6 \cdot 10^5 \cdot 0,002 = 116,6 + 548,9 + 1920 = 2585,5 \text{ A}$$

Burada görürük ki, dolağın maqnitləşdirici qüvvəsinin $\frac{1920}{2585,5} \times 100 \approx 74 \%$ -ı hava aralığında şərf olunur. Odur ki, elektrik

maşınlarını konstruksiya etdikdə bu həqiqəti nəzərə alıb, hava aralığını mümkün qədər kiçik götürmək vacib məsələdir.

3.11. Maqnit dövrələri və elektromaqnit hadisələrinə aid sərbəst işlər

1. Manit sahəsinin mövcudluğu necə aşkar olunur?
2. Maqnit induksiya vektoru maqnit sahəsinə necə xarak-terizə edir və onun qiymət və istiqaməti necə tapılır?
3. Şəkil 3.6-da elementar mühərrikin quruluş sxemi verilmişdir. Naqılın maqnit sahəsində aktiv uzunluğu $L=0,5 \text{ m}$, müqaviməti isə $r=1 \text{ Om}$ -dur. Naqıl $U=2 \text{ V}$ gərginliyi ilə qoşulmuşdur və F_{Em} elektromaqnit qüvvəsinin təsiri ilə $\mathcal{J} = 1 \text{ m/san}$ sürətlə hərəkət edərək mexaniki iş görür. Naqıldən axan cərəyanı tapmalı və mühərrik üçün güclər balansını qurmalı. Maqnit sahəsinin induksiyası $B = 1,4 \text{ Tl}$.

4. Elementar generator üçün (şəkil 3.7) verilmişdir: naqilin uzunluğu $l=0,5\text{ m}$, onun maqnit sahəsində hərəkət sürəti $\mathbf{g}=0,5\text{ m/san}$, maqnit sahəsinin induksiyası $\mathbf{B}=1,6\text{ Tl}$, naqilin müqaviməti $\mathbf{r}=0,1\text{ Om}$, yükün müqaviməti $\mathbf{r}_y=0,3\text{ Om}$. Dövrə-dən axan cərəyanı tapmalı və güclər balansını yoxlamalı.

5. Tökmə poladdan hazırlanmış (şəkil 3.9) nüvədə $\mathbf{B}=1,3\text{ Tl}$ maqnit induksiyası yaradılmalıdır. Nüvəyə müntəzəm sarınmış dolağın $\mathbf{w}=200$ sarğısı vardır. Nüvənin en kəsiyi sahəsi $\mathbf{S}=8\text{ sm}^2$, orta xəttinin uzunluğu $\mathbf{l}_{or}=78\text{ sm}$ -dir. Nüvədə $\delta=0,5\text{ mm}$ hava aralığı yaradılrsa, dolağın cərəyanı və nüvənin maqnit müqaviməti necə dəyişər? Nüvədə maqnit seli sabit qalmalıdır. Səpələnmə selini nəzərə almamalı.

6. Şəkil 3.14-də göstərilmiş maqnit dövrəsinin ölçüləri verilmişdir: $\mathbf{h}=97,5\text{ sm}$, $\mathbf{l}_2=82,4\text{ sm}$, $\delta=0,1\text{ sm}$, $\mathbf{S}_1=10\times15\text{ sm}^2$, $\mathbf{S}_2=10\times10\text{ sm}^2$. maqnit keçiricisinin hava aralığında $\mathbf{B}=1\text{ Tl}$ maqnit induksiyası yaratmaq lazımdır. Dolağın maqnitləşdirici qüvvəsini tapmalı. Maqnit keçiricisi vərəqə poladdandır (şəkil 3.15). Səpələnmə selini nəzərə almamalı.

7. Maqnit dövrəsi və həndəsi ölçüləri əvvəlki məsələdə olduğu kimidir. Maqnitləşdirici qüvvənin $\mathbf{F}=\mathbf{I}\mathbf{w}=5000\text{ A}$ olduğunu bilərək, dövrədə Φ maqnit selini tapmalı. Səpələnmə selini nəzərə almamalı.

8. Bəsləyici şəbəkənin gərginliyi $\mathbf{U}=220\text{ V}$ isə maqnit-ləşdirici qüvvəsi $\mathbf{F}=6000\text{ A}$ olan sarğacı hesablamalı (şəkil 3.22). (Məsələnin həlli üçün verilir: dolaq məftillərinin standart diametrləri: **0,72; 0,74; 0,77; 0,8; 0,83 mm**; bu məftillər üçün izolyasiyanın qalınlığı **0,11 mm**-dir).

4-cü fəsil

DƏYİŞƏN CƏRƏYAN ELEKTRİK DÖVRƏLƏRİ

4.1. Əsas anlayışlar

Müasir elektroenergetika sinusoidal dəyişən cərəyandan istifadə olunması üzərində qurulmuşdur. Elektrik enerjisi elektrik stansiyalarında yalnız üçfazlı sinusoidal dəyişən cərəyanda istehsal olunur. Tələbatçıların mütləq çoxluğu öz işi üçün sinusoidal dəyişən cərəyandan istifadə edir. Dəyişən cərəyandan belə geniş istifadə edilməsinin əsas səbəbi onun sadə elektromaqnit aparatla, yəni transformatorla transformasiya olunmasının mümkün-lüyüdür. Bundan başqa periodik dəyişən cərəyanlar içərisində sinusoidal cərəyan ən sadəsidir. Sinusoidal cərəyan dövrlərinin hesabı nisbətən asandır. Sinusoidal kəmiyyətin zamana görə törəməsi sinusoidal kəmiyyətdir və bu səbəbdən də sinusoidal cərəyan dövrlərində xoşagəlməz kənar hadisələr baş vermir.

Dəyişən cərəyanı xarakterizə edən əsas kəmiyyətlərin təriflərinə baxaq.

Tezlik və period. Dəyişən cərəyanın bir tam dəyişməsinə **dövr** deyilir. Bir dövrün davam etmə müddəti **period** (T) adlanır.

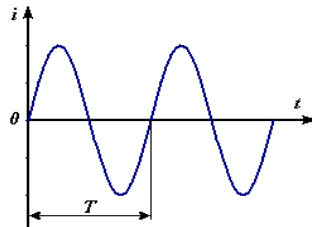
Bir saniyədəki periodların sayına (f) **tezlik** deyilir.

Tezlik perioda tərs kəmiyyət-dir (şəkil 4.1):

$$f = \frac{1}{T}.$$

Tezliyin ölçü vahidi **Hers** (Hz) adlanır:

$$1 \text{ Hz} = 1/\text{san.}$$



Şəkil 4.1 Dəyişən cərəyan qrafiki

Cərəyanın periodu 1 san olarsa, onun tezliyi **1 Hs** olar.

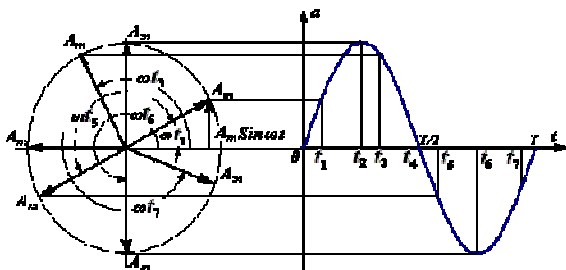
Postsovet və bir çox dünya ölkələrində sənaye cərəyanının tezliyi 50 Hs, ABŞ və Yaponiyada isə – 60 Hs qəbul edilmişdir.

Sənayedə xüsusi məqsədlər üçün müxtəlif tezlikli, 500 Hs-dən 50 MHs-ə qədər, cərəyanlardan istifadə olunur.

Sinusoidal kəmiyyətin bucaq tezliyi, fazı, başlanğıc fazı, ani və maksimal qiymətləri. Sinusoidal kəmiyyətin dəyişməsi qrafiki olaraq sinusodla təsvir edilir. Sinusoidal əyrini qurmaq üçün uzunluğu seçilmiş miqyasda sinusoidal kəmiyyətin maksimal qiymətinə bərabər fırlanan vektor götürürük. Vektor $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ sabit bucaq sürətilə saat əqrəbinin əksi istiqamətində fırlanır. ω –nın ifadəsinə dəyişən cərəyanın tezliyi daxil olduğuna görə vektorun bucaq sürətinə cərəyanın ***bucaq tezliyi*** deyilir.

Vektorun üfüqi vəziyyətini, zamanın hesablanmağa başladığı $t = 0$ anı üçün, onun çıxış vəziyyəti kimi qəbul edirik. Hesablama başladıqdan t_1 müddət keçdikdə A_m vektoru ωt_1 bucağı qədər dönər (şəkil 4.2). Yeni vəziyyətdə olan vektorun şaquli ox üzərindəki proyeksiyası $A_m \sin \omega t_1$ olar. İxtiyari t zaman anı üçün $A_m \sin \omega t$ ifadəsi sinusoidal kəmiyyətin bu andakı ani qiymətini təyin edir.

Fırlanan vektorun ucünün çəkdiyi çevrənin yanında düzbucaqlı koordinat sisteminə $a = A_m \sin \omega t$ asılılığının əyrisi qurulmuşdur. Şəkil 4.2-dən görüldüyü kimi fırlanan vektorun bir tam dövrü sinusoidal kəmiyyətin tam dəyişməsinin bir perioduna uyğundur. Bir period ərzində sinusoidal kəmiyyət iki dəfə ***maksimal qiymət*** alır (A_m).

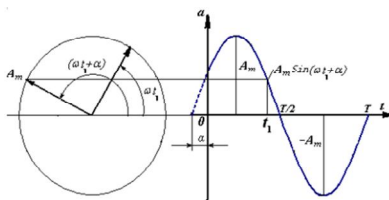


Əgər $t=0$ başlanğıc anında vektor üfüqi oxla hər hansı α bucağı təşkil edirsə, onda sinusoidal kəmiyyət hesablama başlanan anda sıfıra bərabər olmaz, $A_m \sin \alpha$ – a bərabər olar. α bucağı başlanğıc bucaq və ya ***başlanğıc faz*** adlanır. $(\omega t + \alpha)$ ifadəsinə sinusoidal kəmiyyətin ***fazu*** deyilir.

Yuxarıda izahatdan aydın olur ki, $\mathbf{a} = \mathbf{A}_m \sin \omega t$ sinusoidal kəmiyyəti sabit bucaq sürətilə fırlanan vektorla təsvir etmək olar. Bu zaman vektorun uzunluğu seçilmiş miqyasda kəmiyyətin maksimal qiymətini (amplitudunu), şaquli ox üzərindəki proyeksiyası isə sinusoidal kəmiyyətin ani qiymətini ve-

rir. Vektorla üfqi oxun müsbət istiqaməti arasındakı bucaq sinusoidal kəmiyyətin başlanğıc fazını təyin edir. Sinusoidal kəmiyyəti təsvir edən vektora sinusoidal kəmiyyətin **vektor diagramı** deyilir. Sinusoidal kəmiyyətin düzbucaqlı koordinat sistemindəki əyrisinə bəzən sinusoidal kəmiyyətin **dalğa diagramı** deyilir.

Fəz sürüşməsi. Eyni dövrəyə aid olan gərginlik u və cərəyan i sıfır və maksimal qiymətlərindən eyni anda keçmirsə, onlar fəzca bir-birinə nəzərən sürüşmüşdür.



Şəkil 4.3. Sinusoidal kəmiyyətin maksimal qiyməti

Fazların bu sürüşməsi sinusoidal gərginlik və cərəyanın başlanğıc fazlarının fərqinə bərabərdir (şəkil 4.4).

Baxılan hal üçün yaza

bilərik:

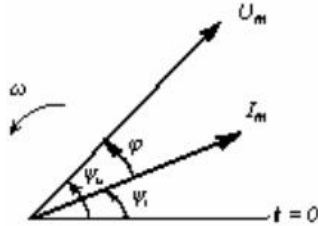
$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

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

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

Şəkil 4.4-dən görünür ki, gərginlik cərəyandan fazca bucağı qədər irəlidedir. Əgər $\varphi = 0$ olarsa, gərginlik və cərəyan fazca üst - üstə düşür, $\varphi = \pm \pi$ olduqda isə – fazca əksdirlər.

φ bucağına gərginlik və cərəyan arasında *fazlar fərqi* deyilir.



Şəkil 4.4 Sinusoidal kəmiyyətin faz sürüşməsi

Sinusoidal kəmiyyətin təsiredici qiyməti. Elektrotexnikada dəyişən cərəyanı xarakterizə edən əsas kəmiyyət onun *təsiredici qiymətidir*.

Dəyişən cərəyanın təsiredici və yaxud effektiv qiyməti onun istilik təsirini sabit cərəyanın istilik təsiri ilə müqayisə etməklə təyin edilir. Cərəyanın təsiredici qiymətini tapmaq üçün Coul-Lens qanununu tətbiq edib alırıq ki, o, cərəyanın ortakvadratik qiymətinə bərabərdir, yəni:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}.$$

Sinusoidal cərəyan $i = I_m \sin \omega t$ üçün təsiredici qiymət onun amplitud qiyməti ilə sadəcə ifadə olunur:

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

Coul-Lens qanununu aşağıdakı şəkildə yazaraq gərginliyin də istilik təsirindən danışmaq olar:

$$Q_{\text{ist}} = \int_0^T u^2 g dt = U^2 g t ,$$

burada g – dövrənin keçiriciliyidir.

Beləliklə tapırıq ki,

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} .$$

E.h.q.-nin təsiredici qiyməti üçün oxşar ifadə alarıq:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} .$$

Təsiredici qiymət dəyişən cərəyanın əsas xarakteristikası kimi ona görə seçilmişdir ki, cərəyanın təsiri, çox halda, cərəyanın kvadratı ilə mütənasibdir, məsələn, cərəyanın istilik və cərəyanlı naqillərin mexaniki təsirləri. Buna görə də bir sıra sistemli elektrik cihazlar həm sabit, həm də dəyişən cərəyanlar üçün yarayır. Dəyişən cərəyan dövrlərində onlar kəmiyyətlərin təsiredici qiymətlərini göstərir.

Təsiredici qiymətlər böyük hərflərlə indeksiz işarə edilir.

Sinusoidal kəmiyyətin orta qiyməti. Sinusoidal kəmiyyət və həm də əyrisi zaman oxuna simmetrik olan istənilən periodik dəyişən kəmiyyətin tam period ərzində orta qiyməti sıfıra bərabərdir, çünki müsbət və mənfi yarımdalğaların sahələri qiymətcə bərabər, işarəcə əksdirlər. Ona görə də belə kəmiyyətlərin orta qiymətini müsbət yarımpериод üçün təyin edirlər. Məsələn, sinusoidal cərəyan üçün:

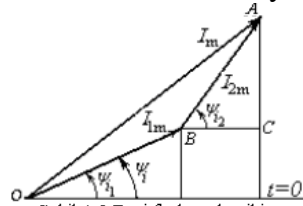
$$I_{or} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m .$$

Gərginlik və e.h.q. üçün də oxşar ifadələr alırıq:

$$U_{or} = \frac{2}{\pi} U_m , \quad E_{or} = \frac{2}{\pi} E_m .$$

Sinusoidal cərəyan dövrlərinin analizində vektor diaqramından istifadə edilməsi. Sinusoidal cərəyan

dövrlərini analiz edərkən kəmiyyətlər üzərində cəbri əməllər (toplama və çıxma) icra etmək lazım olur. Eyni tezlikli sinusoidal kəmiyyətlərin cəbri toplanması və çıxılması bunları təsvir edən vektorların həndəsi toplanması və çıxılmasına uyğun gəlir. Bu, kəmiyyətlərin vektor diaqramını qurmaqla sinusoidal cərəyan dövrlərinin hesabını sadələşdirməyə və onu əyani etməyə imkan yaradır. Tutaq ki, fazları eyni olmayan iki i_1 və i_2 cərəyanlarının cəminə bərabər olan i cərəyanını tapmaq lazımdır (şəkil 4.5):



Şəkil 4.5 Eyni fazları olan iki cərəyanın cəmi

$$i_1 = I_{1m} \sin (\omega t + \psi_1),$$

$$i_2 = I_{2m} \sin (\omega t + \psi_2).$$

i cərəyanının anı qiyməti:

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_2 = I_{1m} \sin (\omega t + \psi_1) + I_{2m} \sin (\omega t + \psi_2) = \\ &= (I_{1m} \cos \psi_1 + I_{2m} \cos \psi_2) \sin \omega t + \\ &\quad + (I_{1m} \sin \psi_1 + I_{2m} \sin \psi_2) \cos \omega t \end{aligned}$$

Vektor diaqramından və sonuncu ifadədən görünür

ki,

$$I_m \cos \psi = I_{1m} \cos \psi_1 + I_{2m} \cos \psi_2,$$

$$I_m \sin \psi = I_{1m} \sin \psi_1 + I_{2m} \sin \psi_2.$$

Beləliklə, cərəyanın ani qiyməti üçün aşağıdakı ifadəni alırıq:

$$i = I_m (\cos \psi \sin \omega t + \sin \psi \cos \omega t) = I_m \sin (\omega t + \psi).$$

Şəkil 4.5-dəki vektor diaqramından cəm cərəyanın amplitudunu və başlanğıc fazını aşağıdakı düsturlarla tapırıq:

$$I_m = \sqrt{(I_{1m} \cos \psi_1 + I_{2m} \cos \psi_2)^2 + (I_{1m} \sin \psi_1 + I_{2m} \sin \psi_2)^2},$$

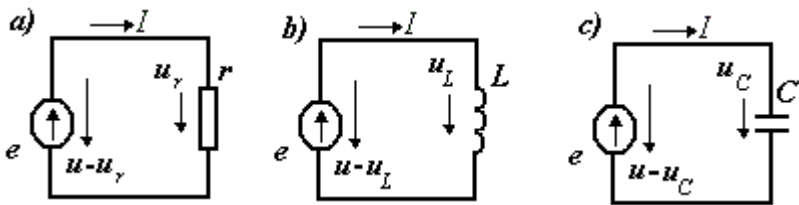
$$\psi = \arctg \frac{I_{1m} \sin \psi_1 + I_{2m} \sin \psi_2}{I_{1m} \cos \psi_1 + I_{2m} \cos \psi_2}.$$

Sinusoidal cərəyan dövrlərini analiz etdikdə vektor diaqramı kəmiyyətlərin təsiredici qiymətləri üçün qurulur, çünki, onların bu qiymətləri arasında münasibətlər təyin edilir.

Dəyişən cərəyan elektrik dövrlərinin əvəz sxemlərinin elementləri. Elektrik quruluşlarının ayrı-ayrı elementlərində dəyişən cərəyan dəyişən elektrik və maqnit sahələri yaradır. Bu sahələrin dəyişən olması səbəbindən elektrik dövrəsində özünəinduksiya, qarşılıqlı induksiya və cərəyanların sürüşməsi hadisələri baş verir və bunlar dövrədə gedən proseslərə xeyli təsir göstərir. Ona görə də bu dövrlərdəki proseslərin analizi mürəkkəbləşir.

Dəyişən cərəyan dövrlərinin analizi üçün ideal elementlərdən ibarət elektrik əvəz sxemi qurulur. İdeal elementlərə aiddir : ideal e.h.q. mənbəsi, rezistiv element (r), induktiv element (L), tutum elementi (C) və qarşılıqlı induksiya elementi (M). Bu elementlərdən hər biri müəyyən hadisəni təzahür etdirir və bu hadisəni nəzərə almaq istədikdə həmin element sxemə daxil edilir.

r , L , C ideal elementləri passivdirlər, yəni onların elektrik enerji mənbələri yoxdur. Onlarda cərəyan və gərginliklərin müsbət istiqamətləri eynidir. (şəkil 4.6,a,b,c). Enerji mənbələrində cərəyanın və e.h.q.-nin müsbət istiqamətləri eynidir. Mənbənin gərginliyinin müsbət istiqaməti onun e.h.q.-sinin müsbət istiqamətinə əksdir. İstiqamətlər belə olduqda işlədicinin $p = ui$ və mənbənin $p = ei$ ani güclərinin müsbət qiymətləri onu göstərir ki, birinci işlədici, ikinci isə mənbə kimi işləyir.



Şəkil 4.6. r, L, C ideal elementlər

Ani güclərinin mənfi qiymətlərində isə birinci mənbə rejimində, ikinci işlədici rejimində işləyir.

Elektrik dövrəsinin əvəz sxeminin rezistiv elementi.

Rezistiv element (rezistor) real elektirik dövrəsində elektrik enerjisinin dönmədən başqa enerjiyə çevrilməsi prosesinin mövcudluğunu xarakterizə edir. Rezistiv elementin parametri onun aktiv müqavimətidir, hansındakı elektrik dövrəsinin real elementinin tələb etdiyi qədər elektrik enerjisi udulur.

Rezistiv element real naqilin ondan keçən cərəyana göstərdiyi müqaviməti xarakterizə edə bilər. Bu zaman naqildə ayrılan istilik enerjisi qədər enerji səpələnir. Belə naqilin aktiv müqaviməti onun sabit cərəyana göstərdiyi müqavimətindən böyükdür. Buna səbəb dəyişən cərəyanda səthi effekt hadisəsinin mövcud olmasıdır.

Rezistiv elementin gərginliyi u_r və cərəyanı i Om qanununa əsasən ani qiymətlər üçün yazılmış tənliklə bağlıdır:

$$u_r = i r$$

Bu tənlikdən aydın olur ki, cərəyan və gərcinliyin miqyasını lazımi şəkildə seçdikdə, $i(t)$ və $u_r(t)$ ayrıləri üst-üstə düşər.

Rezistiv elementin ani gücü

$$p_r = u_r i = i^2 r$$

həmişə müsbət işarəlidir, bu o deməkdir ki, rezistiv elementdə elektrik enerjisi dönmədən istiliyə çevrilir.

Elektrik dövrəsinin əvəz sxeminin induktiv elementi.

İnduktiv element real elektrik dövrəsində nəzərə alınması lazım olan maqnit sahəsinin varlığını xarakterizə edir. Maqnit sahəsində enerji toplanan induktiv elementin parametri onun induktivliyidir (L). Bu enerjinin qiyməti cərəyanın kvadratı ilə düz mütənasibdir:

$$W_m = \frac{Li^2}{2}.$$

Maqnit sahəsi elektrik dövrəsinin cərəyan axan bütün hissələrində yaranır, deməli, elektrik dövrəsinin bütün real elementləri induktivliyə malikdir. Bəzi hallarda onun qiyməti nəzərdən atılacaq dərəcədə kiçik ola bilər. Başqa hallarda isə onu nəzərə almaq vacibdir, yoxsa hesablamaların nəticələri səhv olar. Güclü maqnit sahəsi almaq üçün induktiv sargılardan istifadə edilir, bunların induktivliyini nəzərə almamaq olmaz. Dövrənin hər hansı elementinin induktivliyi onunla ilişən maqnit seli ilə cərəyanı arasında mütənasiblik əmsalı kimi qəbul edilə bilər: $\Psi = Li$.

İnduktiv elementin gərginliyi və cərəyanı öz aralarında, elektromaqnit induksiya qanunundan çıxan, aşağıdakı ifadə ilə bağlıdır:

$$u_L = L \frac{di}{dt}.$$

Bu ifadədən məlum olur ki, cərəyan artarkən induktiv elementin gərginliyi $u_L > 0$, cərəyan azalarkən isə $u_L < 0$ olur.

İnduktiv elementin ani gücü:

$$p_L = u_L i = Li \frac{di}{dt}$$

cərəyan və gərginliyin işarəsindən asılıdır.

Gərginliyin müsbət ($u_L > 0$) halında müsbət cərəyan artanda ($\frac{di}{dt} > 0$) ani güc müsbət ($p_L > 0$) olur, enerji induktiv elementin maqnit sahəsində toplanır, yəni o, işlədici kimi işləyir. Müsbət cərəyan azalanda ($\frac{di}{dt} < 0$) isə $p_L < 0$ olur, induktiv element mənbə kimi işləyir və maqnit sahəsində topladığı enerjini dövrəyə qaytarır. Baxılan hallardan başqa daha iki hal vardır. $i < 0$ və $\frac{di}{dt} < 0$ olduqda $p_L < 0$ olur, induktiv element mənbə kimi işləyir. $i > 0$ və $\frac{di}{dt} > 0$ olduqda isə $p_L > 0$ olur, induktiv element işlədici kimi işləyir.

Elektrik dövrəsinin əvəz sxeminin tutum elementi.

Tutum elementi real elektrik dövrəsində nəzərə alınması lazım olan elektrik sahəsinin varlığını xarakterizə edir. Tutum elementinin parametri onun tutumudur (C). Buna

tutum elementinin yükü q ilə onun gərginliyi u_C arasında mütənasiblik əmsalı kimi baxmaq olar: $q = C u_C$.

Real dövrənin hər bir elementi tutuma malikdir. Onun təsirinin nəzərə alınması tutumun kəmiyyətini müəyyən edən bir çox amillərdən asılıdır.

Böyük tutum almaq üçün kondensatorlardan istifadə edilir ki, bunların tutumlarını nəzərə almaq vacibdir.

Tutum elementinin gərginliyi ilə cərəyanı aşağıdakı tənliklə bağlıdır:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}.$$

Bu ifadədən aydın olur ki, tutum elementinin gərginliyi artdıqda onun cərəyanı müsbət ($i > 0$), gərginlik azaldıqda isə mənfi ($i < 0$) olur.

Tutum elementinin ani gücü öz işarəsini gərginliyin və cərəyanın işarəsindən asılı olaraq dəyişir. Müsbət gərginliyin artdığı və mənfi gərginliyin azaldığı zamanda ani güc $p_C = u_C i$ müsbətdir. Enerji mənbədən tutum elementinə ötürülür və onun elektrik sahəsində toplanır. Element işlədici rejimdə işləyir. Müsbət gərginliyin azaldığı və mənfi gərginliyin artdığı zamanda ani güc $p_C = u_C i$ mənfidir. Elektrik sahəsində toplanmış enerji mənbəyə qayıdır. Tutum elementi mənbə rejimində işləyir.

Tutum elementinin elektrik sahəsində toplanan enerji gərginliyin kvadratı ilə mütənasibdir:

$$W_e = \frac{C u_C^2}{2}.$$

Tutum elementinin cərəyanının dəyişmə qanunu verilmişdirsə onun gərginliyi aşağıdakı ifadə ilə təyin oluna bilər:

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt + \text{const}.$$

Dəyişən cərəyan dövrəsində çox vaxt

$$u_c(0) = \text{const} = 0.$$

Kirxhof qanunlarının dəyişən cərəyan dövrələrinin hesabında tətbiqi. Dəyişən cərəyan elektrik dövrələrinin hesabında Kirxhof qanunlarına görə tənlikləri qurmaq üçün sxemdə cərəyanların şərti müsbət istiqamətlərini və dövrənin qapalı konturlarını hərlənmə istiqamətlərini seçmək lazımdır. Kirxhof qanunları istənilən halda kəmiyyətlərin ani qiymətləri üçün doğrudur və belə ifadə edilir:

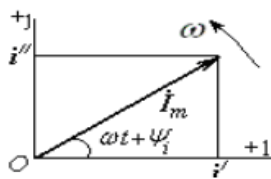
Kirxhofun birinci qanunu: $\sum i = 0$,

Kirxhofun ikinci qanunu: $\sum e = \sum u$.

Sinusoidal kəmiyyətlərin kompleks ədədlərlə ifadəsi.

Vektor diaqramından istifadə olunması sinusoidal kəmiyyətlər üzərində cəbri toplama əməllərini sadələşdirir və əyani edir. Sinusoidal kəmiyyətlərin toplanması və çıxılmasına sinusoidal cərəyan elektrik dövrələrinin hesabında tez-tez rast gəlinir. Vektor diaqramından istifadə sadə və bir mənbəli dövrələrlə məhdudlaşır. Mürəkkəb sinusoidal cərəyan dövrələrinin analizi üçün kompleks ədədlərdən istifadə edilir ki, bu vektorlar üzərindəki həndəsi əməlləri kompleks ədədlər üzərində cəbri əməllərlə əvəz etməyə və belə dövrələrin hesabını xeyli sadələşdirməyə imkan verir.

Riyaziyyat kursundan məlumdur ki, kompleks müstəvidə hər bir vektora bir müəyyən kompleks ədəd uyğundur və bu ədəd cəbri, triqonometrik və üstlü formada yazıla bilər. Məsələn, şəkil 4.7-də vektor diaqramı təsvir edilmiş $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ cərəyanına uyğun kompleks ədəd belə yazılır:



Şəkil 4.7 Kompleks müstəvidə vektorun təsviri

$$I_m \cos(\omega t + \psi_i) + j I_m \sin(\omega t + \psi_i) = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}.$$

$\omega t + \psi_i$ faz bucağını vektorun $+1; +j$ koordinat oxlarındakı proyeksiyalarına görə təyin edirlər.

$$\omega t + \psi_i = \arctg \frac{i''}{i'}.$$

Şəkil 4.7-dən görünür ki, dekart koordinat müstəvisinin absis oxu kompleks müstəvinin həqiqi ədədlər oxu ilə ($+1$ oxu) üst-üstə düşür. Ona görə də sinusoidal kəmiyyətin ani qiyməti xəyali ədədlər oxu ($+j$ oxu) üzərində olur.

Kompleks müstəvidə cərəyan vektorunun kompleks ədədinin xəyali təşkilədici cərəyanın sinusoidal dəyişməsinə təyin edir və I_m simvolu ilə işarə edilir:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = \operatorname{Im}(I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}).$$

$I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$ kompleks ədədini iki kompleks ədədin hasilini kimi göstərmək rahatdır:

$$I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = I_m e^{j\psi_i} \cdot e^{j\omega t} = \dot{I}_m e^{j\omega t}.$$

Birinci kompleks ədəd $\dot{I}_m$ (hərfin üstündə nöqtə var) vektorun başlanğıc zaman anındakı vəziyyətinə uyğundur və *kompleks amplitud* adlanır:

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}.$$

İkinci kompleks ədəd $e^{j\omega t}$ vektoru başlanğıc vəziyyətə nisbətən ωt bucağı qədər *döndərici operator*dur.

Deməli, sinusoidal kəmiyyətin ani qiyməti $i_m e^{j\omega t}$ hasilinin j - sız xəyali hissəsinə bərabərdir:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = \operatorname{Im}(I_m e^{j(\omega t + \psi_i)})$$

Sinusoidal kəmiyyətin bir yazı formasından digərinə keçməkdən ötrü Eyer düsturundan istifadə edilir:

$$e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha.$$

4.2. Birfazlı dəyişən cərəyan elektrik dövrləri

Rezistorlu sinusoidal cərəyan dövrəsi. Aktiv müqaviməti r olan rezistorun uçlarına (şəkil 4.8) tətbiq edilmiş gərginlik istənilən anda Om qanununa görə belə təyin olunur: $u = ir$

Buradan $u = U_m \sin \omega t$ olarsa, alırıq:

$$i = \frac{u}{r} = \frac{U_m}{r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t,$$

burada $I_m = \frac{U_m}{r}$ - cərəyanın amplitududur.

Cərəyan və gərginliyin təsiredici qiymətləri üçün alırıq

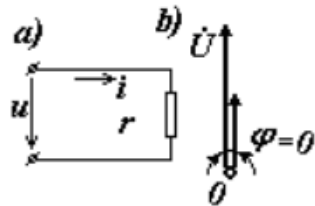
$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}r} = \frac{U}{r}.$$

Cərəyan və gərginliyin simvolik təsvirləri üçün analogi ifadə alınır:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{r}.$$

Cərəyan və gərginliyin vektor diaqramı şəkil 4.8,b-də qurulmuşdur.

Alınmış ifadələrdən aşağıdakı nəticələrə gəlmək olar:



Şəkil 4.8 Aktiv müqavimətli dövrə (a) və onun vektor diaqramı (b)

a) rezistorun cərəyan və gərginliyi fazca üst-üstə düşür;

b) Om qanunu cərəyan və gərginliyin təkcə ani qiymətlər üçün deyil, həm də onların amplitud, təsiredici və kompleksləri üçün də doğrudur.

Rezistorlu dövrənin gücünü təyin edək. Rezistorun ani gücü həmişə müsbətdir:

$$p_r = ui = iri = i^2 r.$$

Baxılan halda $i = I_m \sin \omega t$, ona görə də

$$p_r = (I_m \sin \omega t)^2 r = I_m^2 r \sin^2 \omega t = \\ = \frac{1}{2} U_m I_m (1 - \cos 2\omega t) = UI(1 - \cos 2\omega t).$$

u , i və p_r - in qrafikləri şəkil

4.9-də göstərilmişdir. Ani gücün ifadəsindən və qrafikindən görünürki, o ikiqat bucaq tezliylə öz orta qiyməti ətrafında rəqs edir. Gücün period ərzində orta qiymətinə dövrənin **aktiv gücü** deyilir.

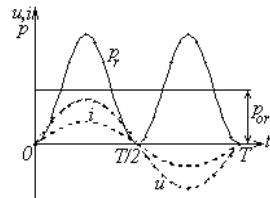
Baxılan halda rezistorlu dövrənin aktiv gücü

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p_r dt = UI = I^2 r = U^2 / r$$

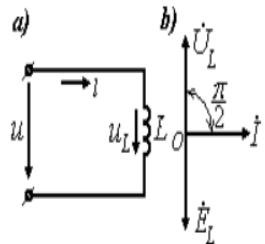
sabit cərəyanın gücü ilə eyni şəkildədir.

4.3. İnduktiv sarğachlı sinusoidal cərəyan dövrəsi

Elə real elektrik dövrəsi yoxdur ki, onun induktivliyi olmasın. Təkcə induktivliyə malik dövrələrə baxmaq süni üsul-



Şəkil 4.9 Aktiv müqavimətli dövrə üçün $i(t)$ və $p(t)$ asılıqları



Şəkil 4.10 induktivli dövrə (a) və onun vektor diaqramı (b)

dur və bu, belə dövrəni maksimum tam öyrənməyə imkan verir.

Fərz edirik ki, sarğac yalnız induktivliyə malikdir. Tutaq ki, belə sarğacdən (şəkil 4.10) sinusoidal cərəyan axır:

$$i = I_m \sin \omega t .$$

İnduktiv element üçün $u_L = L \frac{di}{dt}$ olduğuna görə alırıq:

$$u = u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = U_{Lm} \sin (\omega t + 90^\circ) ,$$

burada $U_{Lm} = \omega L I_m$ - gərginliyinin amplitududur.

$$U_{Lm} = \omega L I_m , \quad I_m = \frac{U_{Lm}}{\omega L} = \frac{U_{Lm}}{x_L}$$

Cərəyan və gərginliyin təsiredici qiymətləri üçün belə ifadələr alırıq:

$$U_L = \omega L I , \quad I = \frac{U_L}{\omega L} = \frac{U_L}{x_L} .$$

$x_L = \omega L$ kəmiyyətinin ölçüsü müqavimət ölçüsüdür və ona dövrənin *induktiv müqaviməti*, yaxud induktivliyin *reaktiv müqaviməti* deyilir:

$$x_L = \omega L = 2\pi f L .$$

Sarğacın özünəinduksiya e.h.q.-si:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = - u_L = E_{Lm} \sin (\omega t - 90^\circ) .$$

Şəkil 4.10,b-də dövrənin vektor diaqramı göstərilmişdir.

E.h.q., gərginlik və induktiv müqaviməti simvolik şəkildə təyin edək. Əgər cərəyanın kompleksi

$\dot{I}_m = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$ şəklində ifadə edilibsə, onda gərginliyin kompleksi belə yazılar:

$$\dot{U}_{Lm} = L \frac{d\dot{I}_m}{dt} = j\omega L I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = jx_L \dot{I}_m.$$

Cərəyan və gərginliyin təsiredici qiymətləri üçün də analogi ifadələr yazıla bilər:

$$\dot{U}_L = jx_L \dot{I} \quad \text{və} \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}_L}{jx_L},$$

burada $jx_L = j\omega L$ - induktiv müqavimətin kompleksidir.

Bütün yuxarıda deyilənlərdən aşağıdakı nəticələrə gəlmək olar:

a) əgər induktiv sarğacdən axan cərəyan sinusoidaldirsə, onda sarğacın uclarındakı gərginlik də sinoidal olacaq və fəza cərəyanı $\pi / 2 = 90^\circ$ bucaq qədər, yəni dördə bir period qədər ötəcək;

b) Om qanunu induktivlikli dövrədə kəmiyyətlərin təsiredici və amplitud qiymətləri üçün doğrudur. Bu zaman reaktiv müqavimət anlayışından istifadə etməli və induktivliyin yaratdığı fəzalar fərqlərini nəzərə almaq lazımdır.

Dövrənin anı gücünü təyin edək:

$$p_L = u_L i = U_{Lm} \cos \omega t \cdot I_m \sin \omega t = U_L I \sin 2\omega t.$$

Anı güc və həm də sarğacın maqnit sahəsinin enerjisi

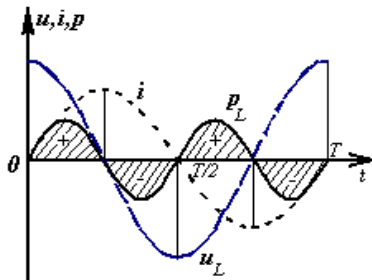
$$W_m = \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} \sin^2 \omega t = \frac{LI_m^2}{2} \cdot \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$$

İkiqat bucaq tezliylə sinus qanunu ilə dəyişir, yəni maqnit sahəsinin dəyişmə sürəti dövrənin anı gücünə bərabərdir:

$$p_L = \frac{dW_m}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{Li^2}{2} \right) = Li \frac{di}{dt} = Lu_L = U_L I \sin 2\omega t$$

Gücün orta qiyməti sifıra bərabərdir. Elektrik enerjisinin başqa növ enerjiyə çevrilməsi yoxdur. Dövrədə fasiləsiz olaraq enerji mənbəsi ilə induktiv sarğacın maqnit sahəsi arasında enerji mübadiləsi gedir. Bu mübadilənin intensivliyi ani gücün maksimal qiyməti ilə xarakterizə olunur, buna sarğacın **induktiv gücü** və yaxud **induktivliyin reaktiv gücü** deyilir və Q_L ilə işarə edilir:

$$Q_L = U_L I = I^2 x_L = \frac{U_L^2}{x_L}.$$



Şəkil 4.11 Xalis induktiv yüklü dövrə üçün $i(t)$, $v(t)$ və $p(t)$ asılıqları

Reaktiv gücün ölçü vahidinə volt-ampere reaktiv (var) və yaxud kilovolt-ampere reaktiv (kvar) deyilir.

Cərəyanın, gərginliyin və ani gücün ayrılıqları şəkil 4.11-də göstərilmişdir.

p_L sinusoidinin hər bir ştrixlənmiş dalğası mənbə ilə sarğac arasında mübadilədə iştirak edən enerjinin miqdarını ifadə edir.

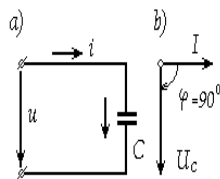
4.4. Kondensatorlu sinusoidal cərəyan dövrəsi

İdeal kondensatorun yalnız tutumu olur. Sinusoidal gərginlik mənbəsinə qoşulmuş belə kondensatorlu dövrədəki prosesə baxaq:

$$u = U_m \sin \omega t$$

(şəkil 4.12). Tutum elementi üçün

$$i = C \frac{du_c}{dt} \quad \text{və} \quad u_c = u$$



Şəkil 4.12 Tutum yüklü dövrə (a) və onun vektor diaqramı (b)

olduğuna görə:

$$i = \omega C U_{Cm} \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + 90^\circ),$$

burada $I_m = \omega C U_{Cm}$ - cərəyanın amplitududur.

$\frac{1}{\omega C}$ kəmiyyətinin ölçüsü müqavimət ölçüsüdür və kondensatorun *reaktiv müqaviməti*, yaxud elektrik dövrəsinin *tutum müqavimi* adlanır, x_C ilə işarə edilir:

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Kondensatorun gərginlik və cərəyanının təsiredici qiymətləri üçün Om qanununun ifadəsi olan aşağıdakı düsturları alırıq:

$$U_C = \frac{1}{\omega C} I = x_C I \quad \text{və} \quad I = \omega C U_C = \frac{U_C}{\frac{1}{\omega C} x_C}.$$

Bu asılılıqları kompleks formada təyin edirik.

$u_C = \operatorname{Im}(\dot{U}_{Cm} e^{j\omega t})$ olduğuna görə yazı bilərik:

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \operatorname{Im}(j \omega C \dot{U}_{Cm} e^{j\omega t}) = \operatorname{Im}(I_m e^{j\omega t}),$$

buradan cərəyan və gərginliyin amplitud və təsiredici qiymətləri üçün simvolik formada Om qanununun ifadələrini tapırıq:

$$\begin{aligned} I_m &= j \omega C \dot{U}_{Cm} = \frac{\dot{U}_{Cm}}{\frac{1}{j \omega C}} = \frac{\dot{U}_{Cm}}{-j \frac{1}{\omega C}} = \frac{\dot{U}_{Cm}}{-j x_C}, \\ I &= \frac{\dot{U}_C}{-j x_C} \quad \text{və} \quad \dot{U}_C = -j x_C I = -j \omega C I. \end{aligned}$$

burada $-j\frac{1}{\omega C} = -jx_C$ - tutum müqavimətinin kompleksidir.

Dövrənin cərəyanı və gərginliyinin vektor diaqramı şəkil 4.12,b-də qurulub.

Deyilənlərdən aşağıdakı nəticələrə gəlirik:

a) əgər tutum elementində gərginlik sinusoidal dəyişirsə, onda cərəyan da sinusoidal dəyişir. Gərginlik fazca cərəyandan 90° , yəni dördə bir period geri qalır;

b) sinusoidal cərəyan dövrəsində tutum özünü müqavimət kimi aparır, bunun qiyməti cərəyanın tezliyi ilə

tərs mütənasibdir: $x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$. Buna kondensatorun

tutum müqaviməti və yaxud tutumun **reaktiv müqaviməti** deyilir;

c) tutum müqaviməti anlayışından istifadə edib tutum elementli sinusoidal cərəyan dövrəsinə Om qanununu tətbiq etmək olar. Bu zaman yadda saxlanmalıdır ki, tutum müqaviməti cərəyanla gərginlik arasında dördə bir period (90°) faz fərqi yaradır.

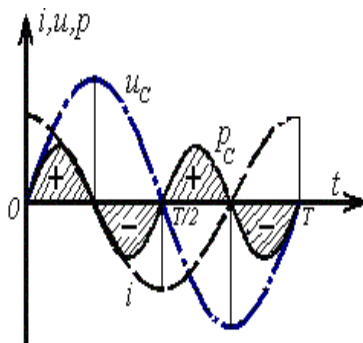
Ani gücün ifadəsini təyin edirik. Kondensatorun ani gücü:

$$p_C = u_C i = U_C I \sin 2\omega t$$

ikiqat tezliklə dəyişir, period ərzində orta qiyməti sıfıra bərabərdir. Deməli, induktiv sargacda olduğu kimi kondensatorlu dövrədə mənbə ilə kondensatorun elektrik sahəsi arasında enerji mübadiləsi baş verir. Kondensator periodik olaraq ikiqat tezliklə dolur-boşalır. Bu mübadilənin intensivliyi ani gücün maksimal qiymətilə xarakterizə olunur. Gücün bu qiymətinə kondensatorun **tutum gücü** və yaxud **tutumun reaktiv gücü** deyilir və Q_C ilə işarə olunur:

$$Q_C = U_C I = I^2 x_C = \frac{U_C}{x_C}.$$

Reaktiv gücün ölçü vahidi volt-ampere reaktiv, yaxud kilovolt-ampere reaktiv adlanır. Cərəyan, gərginlik və gücün ayrılırları şəkil 4.13-də göstərilmişdir. Bu şəkildə güc sinusoidinin hər bir ştrixlənmiş yarımdalğası mənbə ilə kondensator arasında mübadilə edilən enerjinin miqdarını təsvir edir.



Şəkil 4.13 Tütüm yüklü dövrə üçün $i(t)$, $u(t)$ və $p(t)$

4.5. Elementləri ardıcıl birləşdirilmiş sinusoidal cərəyan dövrəsi

Dövrənin hər bir real elementi bir yox, iki və ya üç xassəyə malik ola bilər. Məsələn, induktivlik sarğacının aktiv müqaviməti və induktivliyi vardır. Mühərriklər, hesablamalarda, ekvivalent aktiv müqavimət və induktivliklə təsvir edilir. Bəzi hesablamalarda təkcə kondensatorun deyil, elektrik ötürücü xətlərin və başqa quruluşların elektrik tutumunu nəzərə almaq vacib olur.

Əvəz sxemində dövrə ideallaşdırılmış haldataoplu parametrlə təsvir olunur. Bu zaman dövrənin hesabı xeyli sadələşir.

Şəkil 4.14-də rezistiv, induktiv və tutum elementləri ardıcıl birləşmiş dövrənin sxemi təsvir edilmişdir.

Əgər dövrənin sıxaclarında gərginlik sinusoidaldirsə, yəni

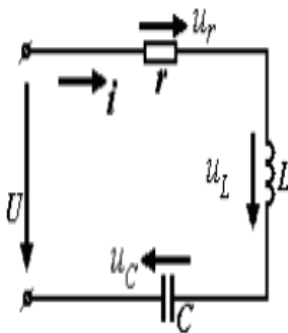
$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

onda dövrədən sinusoidal cərəyan axacaq:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i).$$

Kirxhofun ikinci qanununa əsasən dövrə üçün aşağıdakı tənliyi yazırıq:

$$u = u_a + u_L + u_C = ir + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt.$$



Sinusoidal kəmiyyətlərin anı qiymətlərinin cəbri cəmini onların təsiedici qiymətlərinin vektor tənliyi ilə əvəz etmək olar:

Şəkil 4.14. r, L, C-dən ibarət ardıcıl dövrə

$$\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

Sadə dövrələr üçün Om qanununun kompleks ifadələrindən

$$\dot{U}_a = \dot{I} r, \quad \dot{U}_L = j x_L \dot{I} \quad \text{və} \quad \dot{U}_C = -j x_C \dot{I}.$$

istifadə edib alırıq:

$$\dot{U} = \dot{I} r + j x_L \dot{I} - j x_C \dot{I} = (r + j(x_L - x_C)) \dot{I} = \dot{Z} \dot{I}.$$

Buradan cərəyanın kompleksi üçün alırıq:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}}.$$

Bu, tam sinusoidal cərəyan dövrəsi üçün Om qanununun ifadəsidir.

$$\dot{Z} = r + j(x_L - x_C) = Z e^{j\varphi}$$

kəmiyyəti tam müqavimətin kompleksidir. Buna dövrənin *tam və yaxud zahiri müqaviməti* deyilir.

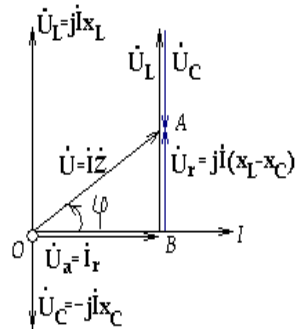
Tam müqavimətin kompleksinin modulu və arqumenti məlum düsturlarla hesablanır:

$$Z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}, \quad \varphi = \frac{x_L - x_C}{r}.$$

Tam müqavimətin kompleksinin arqumenti dövrənin gərginliyi və cərəyanı arasında faz fərqi təyin edir. Əgər $\varphi > 0$ olarsa, onda induktiv müqavimət üstündür və reaktiv müqavimət müsbət ədədlə ifadə olunur, gərginlik fazca cərəyandan irəli düşür.

Əgər $\varphi < 0$ olarsa, onda tutum müqavimət üstündür və reaktiv müqavimət mənfi ədədlə ifadə olunur, gərginlik fazca cərəyandan geri düşür.

Şəkil 4.15-də cərəyan və gərginliyin vektor diaqramı göstərilmişdir. Vektor diaqramında OAB üçbucağı **gərginliklər üçbucağı** adlanır. Bu üçbucağın hipotenuzu dövrənin tam gərginliyini təsvir edir. Cərəyan vektoru ilə üst-üstə düşən OB kateti gərginliyin **aktiv**, cərəyan vektoruna perpendikulyar olan AB kateti isə – **reaktiv** mürəkkəbəsi adlanır. Buradan gərginlik üçün kompleks formada aşağıdakı ifadəni alırıq:



Şəkil 4.15. r, L, C -dən ibarət ardıcıl dövrənin vektor diaqramı

$$\dot{U} = \dot{U}_a + j\dot{U}_r = \dot{U}_a + j(\dot{U}_L - \dot{U}_C).$$

Əgər $\psi_i = 0$ ($\dot{I} = I$) qəbul etsək, onda:

$$\dot{U} = U_a + j(U_L - U_C) = I[r + j(x_L - x_C)].$$

Şəkil 4.15-da vektor diaqramı bu hal üçün qurulmuşdur.

4.6. Sinusoidal dəyişən cərəyan dövrəsinin gücü

Dəyişən cərəyan dövrəsi üçün ani güc cərəyan və gərginliyin ani qiymətlərinin vurma hasilinə bərabərdir:

$$p = ui.$$

Əgər cərəyan və gərginlik sinusoidaldirsə, yəni

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \text{ və } u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

ani güc üçün aşağıdakı ifadəni tapırıq:

$$\begin{aligned} p &= U_m \sin(\omega t + \psi_u) I_m \sin(\omega t + \psi_i) = \\ &= \frac{U_m I_m}{2} [\cos(\psi_u - \psi_i) - \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i)]. \end{aligned}$$

Cərəyan və gərginliyin başlanğıc fazlarının fərqi φ ilə işarə edilir, yəni $\varphi = \psi_u - \psi_i$, onda:

$$\begin{aligned} p &= UI [\cos \varphi - \cos(2\omega t + 2\psi_u - \varphi)] = \\ &= UI \cos \varphi [1 - \cos 2(\omega t + \psi_u)] - UI \sin \varphi \sin 2(\omega t + \psi_u). \end{aligned}$$

UI hasili dəyişən cərəyan dövrəsinin *tam, yaxud zahiri gücü* adlanır və S ilə işarə olunur. Bu güc elektrik qurğusunun tələbatçı ilə mənbə arasında enerji prosesinin intensivliyini xarakterizə edir, lakin elektrik enerjisinin dönmədən başqa enerjiyə çevrilməsini xarakterizə edə bilməz. Tam gücün ölçü vahidi volt-amper (VA), kilovolt-amper (kVA) adlanır.

$S = UI$ nəzərə alıb ani gücü belə yazaq:

$$p = S \cos \varphi [1 - \cos 2(\omega t + \psi_u)] - S \sin \varphi \sin 2(\omega t + \psi_u).$$

Ani güc sinus qanunu ilə dəyişən iki hissədən ibarətdir. Birinci hissə həmişə müsbət işarəli olub özünün orta qiyməti ətrafında ikiqat tezliklə rəqs edir və elektrik enerjisini dönmədən başqa enerjiyə çevrilməsinin intesivliyini təyin edir. Period ərzində gücün orta qiyməti, yəni dövrənin aktiv gücü:

$$P = UI\cos\varphi = S\cos\varphi = I^2 r .$$

Ani gücün ikinci hissəsi özünün sıfır qiyməti ətrafında ikiqat tezliklə dəyişir. Onun amplitud qiyməti dövrənin reaktiv gücünü təyin edir:

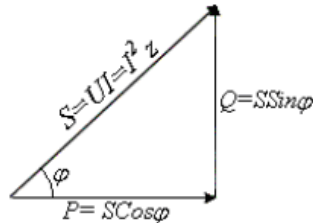
$$Q = Q_L - Q_C = S\sin\varphi = UI\sin\varphi = I^2 (x_L - x_C) .$$

Biz artıq bilirik ki, aktiv gücün vahidi vatt (Vt), kilovatt (kVt), reaktiv gücün vahidi isə volt-amper reaktiv (VAr), kilovolt-amper reaktiv (kVAr) adlanır. Güclərin

$$S = UI ,$$

$$P = S\cos\varphi ; \quad Q = S\sin\varphi$$

ifadələrindən aydın olur ki, onlar düzbucaqlı üçbucaq təşkil edir (şəkil 4.16). Buna **güclər üçbucağı** deyilir.



Güc vektorial kəmiyyətdir, buna görə də onu kompleks müstəvidə kompleks ədədlə ifadə etmək olar:

Şəkil 4.16. Güclər üçbucağı

$$\tilde{S} = P + jQ = UI(\cos\varphi + j\sin\varphi) = UIe^{j\varphi}$$

Tam gücün $\tilde{S}$ kompleksini gərginliyin kompleksini cəryanın qoşma kompleksinə vurmaqla da almaq olar:

$$\tilde{S} = \tilde{U}I = Ue^{j\psi_u} Ie^{-j\psi_i} = UIe^{j\varphi} = P + jQ = UI(\cos\varphi + j\sin\varphi)$$

Güc əmsalı. Dövrənin cərəyan və gərginliyinin fazlar fərqi bucağının kosinusuna **güc əmsalı** deyilir, çünki o, dövrənin aktiv gücünün tam gücünə olan nisbətini bərabər olub gücün hansı hissəsinin elektrik enerjisinin dönmədən başqa enerjiyə çevrilməsində iştirak etdiyini göstərir:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}.$$

Dövrənin güc əmsalını həm də aktiv müqavimətin tam müqavimətə nisbəti kimi təyin etmək olar:

$$\cos\varphi = \frac{r}{z} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + x^2}}.$$

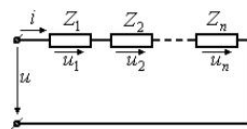
Dövrənin reaktiv müqaviməti sıfıra bərabər olanda (ideal hal), yəni $x = x_L - x_C = 0$ olduqda güc əmsalı birə bərabərdir: $\cos\varphi = 1$. Bu halda mənbə ilə işlədicini birləşdirən məftillərdə reaktiv gücün pulsasiyası yoxdur. Nəticədə birləşdirici məftillərdə elektrik enerji itgiləri azalır. Buna görə də güc əmsalına elektrik qurğusunun **energetik göstəricisi** kimi baxılır.

4.7. Sinusoidal cərəyan dövrəsində elementlərin ardıcıl birləşdirilməsinin ümumi halı.

Tutaq ki, sıxacları $u = U_m \sin \omega t$ sinusoidal gərginlik mənbəsinə qoşulmuş dövrə $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dots, \dot{Z}_n$ müqavimətlərinin ardıcıl birləşməsindən ibarətdir (şəkil 4.17).

Kirxhofun ikinci qanununa əsasən yazmaq olar ki:

$$u = u_1 + u_2 + \dots + u_n$$



Şəkil 4.17. $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ müqavimətlərinin ardıcıl birləşməsi

Sinusoidal kəmiyyətlərin ani qiymətlərinin cəmindən onların komplekslərinin cəminə keçmək olar:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dots + \dot{U}_n. \quad (a)$$

Bu tənlikdə hər bir toplanan dövrə hissəsi üçün Om qanununa görə təyin edilir:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= i\dot{Z}_1 = i[r_1 + j(x_{L_1} - x_{C_1})], \\ \dot{U}_2 &= i\dot{Z}_2 = i[r_2 + j(x_{L_2} - x_{C_2})], \dots, \\ \dot{U}_n &= i\dot{Z}_n = i\left[r_n + j(x_{L_n} - x_{C_n})\right]. \end{aligned}$$

Bu ifadələri (a) tənliyində yerinə yazsaq, alırıq:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= i(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dots + \dot{Z}_n) = \\ &= i[r_1 + r_2 + \dots + r_n + j(x_{L_1} + x_{L_2} + \dots + x_{L_n}) - (x_{C_1} + x_{C_2} + \dots + x_{C_n})] = \\ &= i[r + j(x_L - x_C)] = i\dot{Z} = i(r + jx), \end{aligned}$$

burada: $r = \sum_1^n r_k$, $x_L = \sum_1^n x_{L_k}$, $x_C = \sum_1^n x_{C_k}$ - dövrənin

ekvivalent aktiv, induktiv və tutum müqavimətləridir; $\dot{Z}$ - dövrənin ekvivalent tam müqavimətidir:

$$\dot{Z} = \sum_1^n r_k + j\left(\sum_1^n x_{L_k} - \sum_1^n x_{C_k}\right) = \sum_1^n Z_k.$$

Om qanunu üçün aşağıdakı ifadəni alırıq:

$$i = \frac{\dot{U}}{\sum_1^n Z_k} = \frac{\dot{U}}{\sum_1^n r_k + j\sum_1^n x_k}.$$

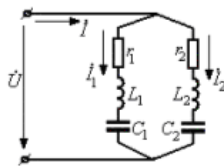
4.8. Sinusoidal cərəyan dövrəsində elementlərin paralel birləşdirilməsi

Kompleks müqavimətlərin paralel birləşməsinin ümumi halına baxaq (şəkil 4.18). Kompleks şəkildə Om qanununa görə sxemin budaqlarındakı cərəyanların kompleks ifadələrini yazaq:

$$I_1 = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}_1} = \dot{Y}_1 \dot{U},$$

$$I_2 = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}_2} = \dot{Y}_2 \dot{U}$$

Burada Y_1 və Y_2 - budaqların tam kompleks keçiricilikləridir. Ümumi halda tam keçiriciliyin kompleksi belə şəkildə yazılır:



Şəkil 4.18 Budqalana dövrə

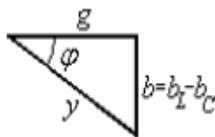
$$\begin{aligned} \dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}} &= \frac{1}{r + j(x_L - x_C)} = \frac{r}{z^2} - j\left(\frac{x_L}{z^2} - \frac{x_C}{z^2}\right) = \\ &= g - j(b_L - b_C) = ye^{-j\varphi} \text{ Sim,} \end{aligned}$$

burada $g = \frac{r}{z^2}$ - budağın aktiv keçiri-

ciliyi; $b_L = \frac{x_L}{z^2}$ və $b_C = \frac{x_C}{z^2}$ - budağın

induktiv və tutum keçiricilikləridir; $b = b_L - b_C$ - budağın reaktiv keçiriciliyi;

$y = \frac{1}{z}$ - budağın tam keçiriciliyinin moduludur.



Şəkil 4.19 Keçiriciliklər üçbucağı

Kompleks müstəvidə tam keçiriciliyinin kompleksi düzbucaqlı üçbucaq şəklində təsvir olunur və **keçiriciliklər üçbucağı** adlanır (şəkil 4.19). Üçbucaqdan alırıq:

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = \sqrt{g^2 + b^2} ,$$

$$g = y \cos \varphi , \quad b = y \sin \varphi ,$$

$$\cos \varphi = \frac{g}{y} , \quad \sin \varphi = \frac{b}{y} .$$

Dövrənin budaqlanmayan hissəsindən axan cərəyanı (şəkil 2.18) Kirxhofun birinci qanununa görə tapırıq:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{U}(\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2) = \dot{U}\dot{Y} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}} .$$

burada $\dot{Y} = \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2$ - budaqlanmış dövrənin ekvivalent tam kompleks keçiriciliyidir və paralel budaqların kompleks keçiriciliklərinin cəminə bərabərdir.

Ümumi halda:

$$\dot{Y} = \sum_1^n \dot{Y}_k$$

Tam ekvivalent keçiriciliyin mürəkkəbələri:

$$g = \sum_1^n g_k , \quad b = \sum_1^n (b_{L_k} - b_{C_k}) .$$

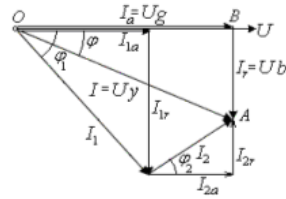
Cərəyanları mürəkkəbələrə ayıraq. Cərəyanın gərginlik istiqamətindəki proyeksiyasına *cərəyanın aktiv mürəkkəbəsi*, buna perpendikulyar istiqamətdə proyeksiyasına isə *cərəyanın reaktiv mürəkkəbəsi* deyilir (şəkil 2.20):

$$I_a = I_{1a} + I_{2a} = (g_1 + g_2)U = gU \quad I_r = I_{1r} + I_{2r} = (b_1 + b_2)U = bU ,$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = U\sqrt{g^2 + b^2} = yU = \frac{U}{z}$$

$$\dot{\mathbf{I}} = \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{a}} - j\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{U}}(\mathbf{g} - j\mathbf{b}) = \mathbf{I}e^{j(\psi_{\mathbf{u}} - \varphi)}$$

Bu üçbucağı keçiriciliklər üçbucağının gərginliyin moduluna vurmaqla da almaq olar və əksinə, cərəyanlar üçbucağını gərginliyin moduluna bölməklə keçiriciliklər üçbucağını almaq olar.

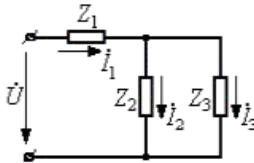


4.9. Sinusoidal cərəyan dövrəsində elementlərin qarışıq birləşdirilməsi

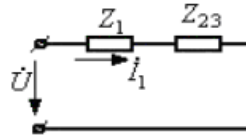
$$r_{23} = \frac{g_2 + g_3}{(g_2 + g_3)^2 + (b_2 + b_3)^2}, x_{23} = \frac{b_2 + b_3}{(g_2 + g_3)^2 + (b_2 + b_3)^2},$$

$$z_{23} = \frac{1}{y_{23}} = \frac{1}{\sqrt{(g_2 + g_3)^2 + (b_2 + b_3)^2}}$$

burada $\mathbf{g}_2, \mathbf{g}_3$ - budaqların aktiv keçiricilikləri; $\mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3$ - budaqların reaktiv keçiricilikləridir.



Şəkil 4.21 Qarışıq birləşmə



Şəkil 4.22 Qarışıq birləşmədə
alınan ekvivalent çevrilmə

Belə ekvivalent çevirmədən sonra verilmiş dövrəni $\dot{Z}_1$ və $\dot{Z}_{23}$ kompleks müqavimətlərin ardıcıl birləşməsindən ibarət təsvir etmək olar (şəkil 4.22).

I_1 cərəyanını Om qanununa görə tapırıq:

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{(r_1 + r_{23})^2 + (x_1 + x_{23})^2}}; \quad \varphi = \arctg \frac{x_1 + x_{23}}{r_1 + r_{23}}.$$

Paralel budaqların sıxaclarındakı gərginlik:

$$U_{23} = I_1 z_{23}.$$

İndi isə paralel budaqlardan keçən cərəyanları təyin edirik:

$$I_2 = \frac{U_{23}}{z_2}, \quad I_3 = \frac{U_{23}}{z_3}.$$

Bir qayda olaraq kompleks müqavimətləri qarışıq birləşmiş dövrələrin hesabını simvolik üsulla aparırlar. Bu metodla əvvəlcə dövrənin ekvivalent tam müqaviməti, sabit cərəyan dövrələrində olduğu kimi, təyin edilir:

$$\dot{Z} = \dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3}.$$

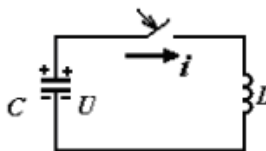
İndi isə budaqlardan axan cərəyanlar tapıla bilər:

$$i_1 = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}}, \quad i_2 = \frac{\dot{U} - i_1 \dot{Z}_1}{\dot{Z}_2}, \quad i_3 = \frac{\dot{U} - i_1 \dot{Z}_1}{\dot{Z}_3}.$$

4.10. Sinusoidal cərəyan dövrələrində rezonans hadisələri

Hər bir fiziki sistem məxsusi sərbəst rəqs tezliyinə malikdir. Məcburi rəqslərin tezliyi sistemin məxsusi rəqs tezliyinə bərabər olduqda, buna **rezonans** hadisəsi deyilir.

İnduktivlik və tutum olan elektrik dövrəsində dolmuş kondensatoru induktiv sargıya qoşduqda kondensatorun sərbəst rəqs boşalma prosesi baş verir. İnduktivlik, tutumlu dövrədə, mexaniki sistemdə kütlə kimi, cərəyanın dəyişməsinə ətalət göstərərək kondensatorun rəqs boşalmasına səbəb olur.



Şəkil 4.23. Kondensatorun U gərginliyinin L konturuna boşalması

Bu rəqsin tezliyinə LC konturunun **məxsusi tezliyi** deyilir. Dövrədə aktiv müqavimət olmadıqda rəqs proses sonsuz uzun müddət davam edə bilər. Belə dövrəyə **itgisiz kontur** deyilir.

Konturun məxsusi rəqs tezliyini təyin etmək üçün U gərginliyinə qədər dolmuş kondensatorun induktivliyə boşalma prosesi gedən kontura baxaq (şəkil 4.23).

Dövrə üçün, kondensator qoşulduqdan sonra, Kirxhofun ikinci qanun tənliyini yazırıq:

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = 0 .$$

Bu tənliyi zamana görə differensiallasaq, alırıq:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{LC} i = 0 .$$

İkinci tərtibdən bircins xətti differensial tənlik olan bu tənliyin həlli belədir:

$$i = A_1 e^{jt/\sqrt{LC}} + A_2 e^{-jt/\sqrt{LC}},$$

burada A_1 və A_2 - integrallama sabitləridir, başlanğıc şərtlərdən tapılır:

$t = 0$ olanda:

$$i = 0, \quad \left(\frac{di}{dt} \right)_{i=0} = \left(-\frac{u_C}{L} \right)_{i=0} = -\frac{U}{L}.$$

Buna görə də alırıq ki:

$$A_1 + A_2 = 0,$$

$$A_1 - A_2 = \frac{U}{j\sqrt{L/C}}.$$

Buradan tapırıq:

$$A_1 = -\frac{U}{j\sqrt{L/C}}; \quad A_2 = \frac{U}{j\sqrt{L/C}}$$

Beləliklə, cərəyan üçün aşağıdakı ifadəni alırıq:

$$i = \frac{U}{\sqrt{L/C}} \sin \frac{1}{\sqrt{LC}} t.$$

$\sqrt{\frac{L}{C}}$ kəmiyyəti müqavimət ölçüsünə malikdir və rəqs

konturunun *xarakteristik dalğa müqaviməti* adlanır, c ilə işarə olunur. $1/\sqrt{LC}$ kəmiyyəti bucaq tezliyi ölçüsündədir, konturun *məxsusi rəqs tezliyi* adlanır və ω_0 ilə işarə olunur:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

İtgisiz konturda sərbəst cərəyan aşağıdakı qanunla dəyişir:

$$i = \frac{U}{\rho} \sin \omega_0 t.$$

Mənbənin tezliyi ω konturun məxsusi rəqs tezliyinə ω_0 bərabər olduqda elektrik dövrəsində rezonans hadisəsi yaranır.

Real konturun aktiv müqaviməti olduğuna görə kondensatorun rəqsi boşalma prosesi sönən olur. Rəqs konturunun keyfiyyəti xoşhallıq adlanan Q kəmiyyətilə (keyfiyyət əmsalı) xarakterizə edilir,

$$Q = c/r.$$

Gərginliklər rezonansı. Budaqlanmayan r , L , C elementlərinə malik olan dövrədə, induktiv müqavimət X_L tutum müqavimətinə X_C bərabər olduqda gərginliklər rezonansı baş verir. Bu şərt daxilində dövrənin müqaviməti

$$z = \sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2} = r; \quad \cos \varphi = \frac{r}{z} = 1; \quad I_{rez} = \frac{U}{r}$$

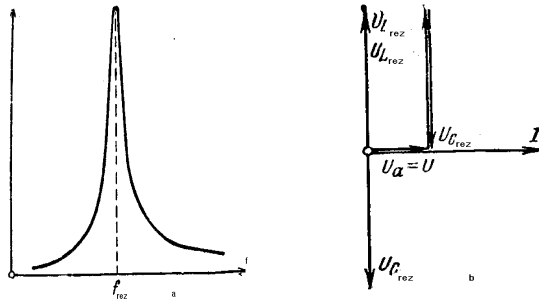
L və C qiymətləri məlumdursa, tezliyin f_{rez} rezonans qiymətini tapmaq olar:

$$X_{L_{rez}} = 2\pi f_{rez} \cdot L = X_{C_{rez}} = \frac{1}{2\pi f_{rez} C}$$

Buradan

$$f_{rez} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2C}}$$

Əgər baxılan dövrənin sıxaclarında gərginliyi V sabit saxlayıb, tezliyi tədricən dəyişsək, cərəyanın qiyməti I dəyişəcəkdir. Rezonans zamanı dövrənin cərəyanı isə maksimal olur (şəkil 4.24)



Şəkil 4.24. Gərginliklər rezonansı üçün cərəyan əyrisi (a) və vektor diaqramı (b)

Rezonans zamanı r müqavimətindəki gərginlik dövrəyə tətbiq edilmiş gərginliyə bərabər olur.

$$U = IZ_{rez} = Ir = U$$

İnduktivlikdə U_{Lrez} və tutumda U_{Crez} gərginliklər qiymətcə bərabər, fəzaca əksdir.

Gərginliklər rezonansı yarandıqda reaktiv elementlərdə gərginliklər mənbənin gərginliyindən Q dəfə böyük olur ki, bu da çox təhlükəlidir. Buna görə də güclü cərəyan elektrik qurğularında gərginliklər rezonansı yarandıqda reaktiv elementlərdə gərginliklər mənbənin gərginliyindən Q dəfə böyük olur ki, bu da çox təhlükəlidir. Buna görə də güclü cərəyanlı elektrik qurğularında gərginliklər rezonansı yolverilməzdir. Radiotexniki zəif cərəyanlı dövrlərdə gərginliklər rezonansı lazım olan tezlikli cərəyanları seçib ayırmaq üçün istifadə edilir.

Cərəyanlar rezonansı. İnduktiv sargıqla kondensator paralel birləşmiş dövrlərdə cərəyanlar rezonansı yaranabilir.

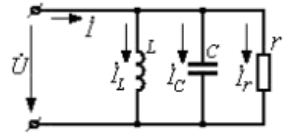
Şəkil 4.25-də verilmiş dövrəyə baxaq. Tutaq ki, cərəyanın tezliyi:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

yəni, LC konturunda rezonans yaranıb. Dövrənin budaqlarının keçiriciliklərini təyin edirik:

$$b_C = \frac{1}{x_C} = \omega_0 C = \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{1}{\rho},$$

$$b_L = \frac{1}{x_L} = \frac{1}{\omega_0 L} = \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{1}{\rho}, \quad g = \frac{1}{r}$$



Şəkil 4.25. L, C və r paralel birləşməsi

Buradan aydın olur ki, induktiv sarğac və kondensator paralel qoşulmuş dövrədə rezonans zamanı reaktiv keçiriciliklər bir-birinə bərabər olur, yəni:

$$b_L = b_C = \frac{1}{c} = \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

Dövrənin tam keçiriciliyi minimal, müqaviməti maksimal qiymət alır:

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = g, \quad z = \frac{1}{y} = \frac{1}{g} = r.$$

Güc əmsalı birə bərabər olur:

$$\cos \varphi = \frac{g}{y} = 1.$$

İnduktivlikli və tutumlu budaqlardakı cərəyanlar bir-birinə bərabərdir. Buna görə də bu rezonans **cərəyanlar rezonansı** adlanır.

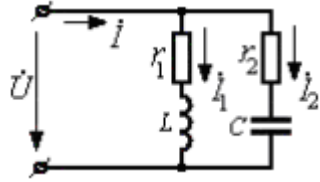
Əgər istənilən elementlərə malik budaqlanan dövrəni xalis reaktiv elementli və ayrıca aktiv budaqlı sxemlə (şəkil 4.24) əvəz etmək olsa, onda bu halda $b_C = \omega C$, $b_L = \frac{1}{\omega L}$

olar və $b_L = b_C$ şərtindən $\omega = \omega_0$ alınar və biz əvvəlki nəticəyə gəlirik.

Şəkil 4.26-də verilmiş budaqlanan dövrə üçün, cərəyanların reaktiv mürəkkəbələrinin bərabərlik şərtindən istifadə edərək, rezonans tezliyini təyin edək:

$$I_L = b_L U = \frac{\omega L}{r_1^2 + (\omega L)^2} U = I_1 \sin \varphi_1,$$

$$I_C = b_C U = \frac{1}{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} U = I_2 \sin \varphi_2.$$



Şəkil 4.26. Budaqlanan dəyişən cərəyan dövrəsi

Rezonans zamanı $I_L = I_C$, onda $b_L = b_C$ və

$$\frac{\omega_0 L}{r_1^2 + (\omega_0 L)^2} = \frac{\omega_0 C}{(\omega_0 r_2 C)^2 + 1}.$$

Buradan iki paralel budaqlı dövrə üçün ümumi halda rezonans tezliyinin ifadəsini alırıq:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r_1^2 C - L}{r_2^2 C - L}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r_1^2 - \rho^2}{r_2^2 - \rho^2}}.$$

$r_1 = r_2$ olduqda $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ alırıq. Burada $\rho = \sqrt{L/C}$ rəqs konturun dalğa müqavimətidir.

Qeyd etməliyik ki, gərginliklər rezonansından fərqli olaraq cərəyanlar rezonansı elektrik qurğusu üçün təhlükəsiz hadisədir. Budaqlardakı cərəyanlar onların keçiriciliklərindən asılıdır və qarşılıqlı müstəqildir.

4.11. Qurğunun güc əmsalının artırılması

Güc əmsalının ($\cos\varphi$) qiymətinin kiçik olması generatorların, ötürücü xətlərin və transformatorların gücündən natamam istifadəsinə səbəb olur və bunu aktiv gücün ifadəsindən görmək çətin deyil:

$$P = UI\cos\varphi .$$

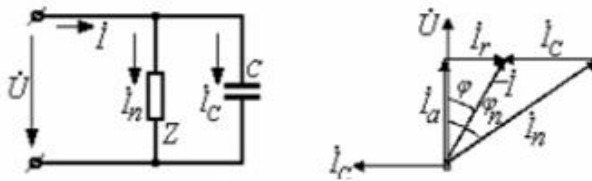
İstənilən elektrik qurğusu (generator, transformator, ötürücü xətt) nominal gərginliyə (izolyasiyası) və nominal cərəyana (naqillərin en kəsikləri) hesablanır. Buna görə də bu qurğulardan ən tam istifadə $\cos\varphi = 1$ olduqda mümkündür, çünki bu zaman:

$$P_{\text{maks}} = UI .$$

Bundan başqa, $\cos\varphi$ -nin kiçik qiymətlərində dövrənin elementləri faydasız olaraq reaktiv cərəyanla yüklənir, nəticədə dövrənin birləşdirici məftillərində (ötürücü xətlərdə) enerji itgisi artır. Bu itgilərin xəttin sonunda qoşulmuş elektrik qurğusunun güc əmsalının kvadratı ilə tərs mütənasib, yəni

$$\Delta P = I^2 r_x = \left(\frac{P}{U\cos\varphi} \right)^2 r_x = \frac{A}{\cos^2\varphi}$$

olduğunu nəzərə alsaq, onda güc əmsalının iqtisadi əhəmiyyətini anlamaq olar.



Şəkil 4.27. Statik kondensator batareyasının qoşulması (a) güc əmsalının vektor diaqramı (b)

Enerji mənbəsini, ötürücü quruluşları reaktiv enerjinin (reaktiv cərəyanın) faydasız rəqslərindən azad etmək üçün yükə paralel olaraq statik kondensator batareyası qoşurlar (şəkil 4.27) ki, onun tutum cərəyanı yükün induktiv cərəyanını kompensasiya edir. Vektor diaqramı (şəkil 4.27,b) güc əmsalını artırmaq üçün lazım olan kondensatorların tutumunu hesablamağı mümkün edir. Güc əmsalını $\cos\varphi_n$ qiymətindən $\cos\varphi$ qiymətinə qədər artırmaq üçün lazım olan tutum cərəyanını və kondensatorun tutumunu tapa bilirik:

$$I_C = I_a (\operatorname{tg}\varphi_n - \operatorname{tg}\varphi) = I_n \cos\varphi_n (\operatorname{tg}\varphi_n - \operatorname{tg}\varphi) = \frac{P}{U} (\operatorname{tg}\varphi_n - \operatorname{tg}\varphi) .$$

$$I_C = \frac{U}{x_C} = \omega C U \text{ olduğuna görə kondensatorun lazım}$$

olan tutumu belə tapılır:

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg}\varphi_n - \operatorname{tg}\varphi) .$$

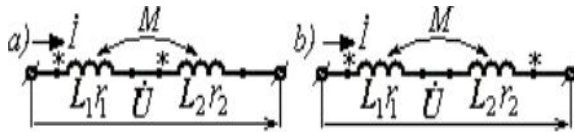
4.12. İnduktiv rabitəli sinusoidal cərəyan dövrləri

Aralarında maqnit rabitəsi olan elementlərə **induktiv rabitəli elementlər** deyilir. İnduktiv rabitə istənilən dövrənin elementləri arasında və həm də elektriki ayrılmış olan dövrlərin elementləri arasında ola bilər.

İnduktiv sargıclar arasında induktiv rabitə olan halda onlarda özünəinduksiya e.h.q.-sindən başqa qarşılıqlı-induksiya e.h.q.-si də yaranır və bunu hesablamalar zamanı nəzərdən atmaq olmaz.

Sargıcların birləşməsindən asılı olaraq özünəinduksiya və qarşılıqlı-induksiya e.h.q. -ləri toplanır və yaxud çıxılır. Birinci halda deyirlər ki, sargıclar düz bağlanıb, ikinci halda isə deyirlər ki, sargıclar tərs bağlanıb. Sxemdə

düz birləşmə ilə tərs birləşməni ayırd etmək üçün sarğacların bir ucu ulduz işarəsi ilə nişanlanır (şəkil 4.28).



Şəkil 4.28. Sarğacların düz (a) və tərs bağlanması (b)

Şəkil 4.28-də iki sarğacın düz və tərs ardıcıl birləşmə sxemləri göstərilmişdir. Əgər sarğaclarda cərəyanlar nişanlı ucuna nəzərən eyni cür istiqamətlənərsə (ulduzdan və ya ulduza doğru), onda sarğaclər düz birləşmiş hesab olunur (şəkil 4.28,a). Əgər sarğaclarda cərəyanlar nişanlı ucuna nəzərən eyni cür istiqamətlənməzsə (şəkil 4.28,b), onda sarğaclər tərs birləşmiş hesab olunur.

Şəkil 4.28,a-da göstərilmiş dövrə üçün Kirxhofun ikinci qanun tənliyini yazaq:

$$u = L_1 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} + ir_1 + ir_2.$$

Kompleks şəkildə təsiredici qiymətlər üçün:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= i[r_1 + r_2 + j\omega(L_1 + M + L_2 + M)] = \\ &= i[r_1 + r_2 + j\omega(L_1 + L_2 + 2M)] = i\dot{Z} \end{aligned}$$

Sarğacların tərs birləşməsi halında (şəkil 4.30,b):

$$\begin{aligned} \dot{U} &= i[r_1 + r_2 + j\omega(L_1 - M + L_2 - M)] = \\ &= i[r_1 + r_2 + j\omega(L_1 + L_2 - 2M)] = i\dot{Z} \end{aligned}$$

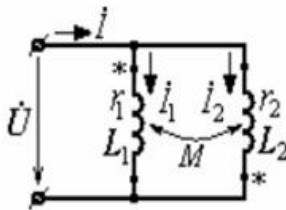
İnduktiv rabitəli sarğacların paralel birləşmə sxeminə baxaq.

Şəkil 4.29-də sarğaclar tərs birləşiblər. Dövrə üçün Kırxhofun ikinci qanun tənliklərini yazaq:

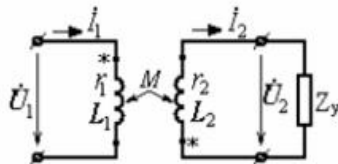
$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{I}_1(r_1 + j\omega L_1) - \dot{I}_2 j\omega M = \dot{I}\dot{Z}_1 - \dot{I}_2 \dot{Z}_M, \\ \dot{U} &= -\dot{I}_1 j\omega M + \dot{I}_2(r_2 + j\omega L_2) = -\dot{I}\dot{Z}_M + \dot{I}_2 \dot{Z}_2.\end{aligned}$$

Sarğacların düz birləşməsi üçün oxşar ifadələr alırıq:

$$\dot{U} = \dot{I}_1 \dot{Z}_1 + \dot{I}_2 \dot{Z}_M, \quad \dot{U} = \dot{I}_1 \dot{Z}_M + \dot{I}_2 \dot{Z}_2$$



Şəkil 4.29. Sarğacların tərs birləşməsi



Şəkil 4.30. İki dolaqlı transformator rabitəsi

Elektriki birləşməyən induktiv rabitəli dövrələrə baxaq. Belə dövrələrə misal dövrələrin ən əsas elementi olan iki dolaqlı transformatorudur (şəkil 4.30).

Transformatorun dolaqlarının dövrələri üçün Kırxhofun ikinci qanununa əsasən yazılmış aşağıdakı tənlikləri alırıq:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{I}_1(r_1 + j\omega L_1) + \dot{I}_2 j\omega M, \\ 0 &= \dot{I}_1 j\omega M + \dot{I}_2(r_2 + j\omega L_2) + \dot{U}_2.\end{aligned}$$

burada $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \dot{Z}_y$ - yükə tətbiq olunmuş gərginlikdir;
 r_1, r_2 - transformatorun dolaqlarının aktiv müqavimətləri;
 L_1, L_2 - transformatorun dolaqlarının induktivlikləridir.

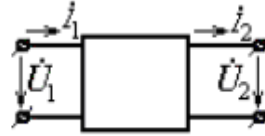
4.13. Passiv xətti dördqütblülər haqqında anlayış

İki giriş və iki çıxış sıxacları olan bir çox elektrotexniki quruluşlar vardır ki, onlara dördqütblü kimi baxmaq olar.

Tərkibində enerji mənbəsi olan dördqütblü **aktiv**, əks halda isə **passiv dördqütblü** adlanır. Passiv dördqütblülərə nümunə transformatoru, elektrik ötürücü xətti, elektrik ölçmə körpüsünü və s. göstərmək olar.

Elektron gücləndiricisinə aktiv dördqütblü kimi baxıla bilər.

Sxemdə dördqütblü dörd sıxacı olan düzbucaqlı kimi təsvir edilir (şəkil 4.31). Onun giriş sıxacları mənbə ilə, çıxış sıxacları isə işlədici ilə birləşdirilir. Dördqütblünün giriş və çıxış kəmiyyətləri onun iki əsas tənliyi ilə münasibətdədir:



Şəkil 4.31. Dörd sıxacı olan düzbucaqlı dördqütblü

$$\dot{U}_1 = \dot{A}\dot{U}_2 + \dot{B}\dot{I}_2, \quad \dot{I}_1 = \dot{C}\dot{U}_2 + \dot{D}\dot{I}_2,$$

burada $\dot{A}$, $\dot{B}$, $\dot{C}$, $\dot{D}$ - dördqütblünün sabit əmsallarıdır, kompleks kəmiyyətlərdir.

Əgər çıxış ucları mənbəyə, giriş ucları işlədiciyə qoşulsa, tənliklərdə $\dot{A}$ və $\dot{D}$ yerlərini dəyişər:

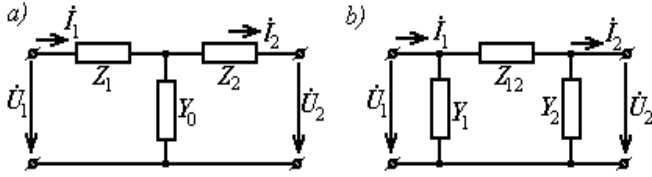
$$\dot{U}_2 = \dot{D}\dot{U}_1 + \dot{B}\dot{I}_1, \quad \dot{I}_2 = \dot{C}\dot{U}_1 + \dot{A}\dot{I}_1.$$

Dördqütblünün əmsalları öz aralarında aşağıdakı tənliklə bağlıdır:

$$\dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C} = 1,$$

ona görə də əmsallardan yalnız üçü müstəqildir. Buradan aydın olur ki, əvəz sxemində dördqütblünü üç elementdən ibarət göstərmək olar. İki mümkün sxem vardır: elementləri ulduz şəklində birləşmiş **T**-şəkilli sxem (şəkil 4.32,a) və

elementləri üçbucaq şəklində birləşmiş **P** - şəkilli sxem (şəkil 4.32,b).



Şəkil 4.32. Elementlərin T və Π şəkilli birləşmə sxemləri

Dördqütblünün əmsallarının təcrübə yolu ilə tapılması. Dördqütblünün əmsallarının təcrübə yolu ilə tapmaq üçün üç təcrübə aparılır:

a) giriş sıxacları tərəfindən yüksüz işləmə təcrübəsi ($I_2 = 0$). Bu zaman P_{10} , U_{10} , I_{10} ölçülür. $\dot{Z}_{10} = r_{10} + jx_{10}$ təyin edilir.

b) giriş sıxacları tərəfindən qısaqapanma təcrübəsi ($U_2 = 0$). Bu zaman P_{1k} , U_{1k} , I_{1k} ölçülür. $\dot{Z}_{1k} = r_{1k} + jx_{1k}$ təyin edilir.

c) çıxış sıxacları tərəfindən yüksüz işləmə təcrübəsi ($I_1 = 0$). Bu zaman P_{20} , U_{20} , I_{20} ölçülür. $\dot{Z}_{20} = r_{20} + jx_{20}$ təyin edilir.

Dördqütblünün tənliklərinə əsasən aşağıdakı ifadələri alırıq:

$$\dot{U}_{10} = A\dot{U}_2, \quad \dot{I}_1 = C\dot{U}_2, \quad \dot{U}_k = B\dot{I}_2,$$

$$\dot{I}_{1k} = D\dot{I}_2, \quad \dot{U}_{20} = D\dot{U}_1, \quad \dot{I}_{20} = C\dot{U}_1.$$

Buradan aşağıdakı asılılıqları tapırıq:

$$\dot{Z}_{10} = \frac{\dot{U}_{10}}{\dot{I}_{10}} = \frac{A}{C}, \quad \dot{Z}_{1k} = \frac{\dot{U}_{1k}}{\dot{I}_{1k}} = \frac{B}{D}, \quad \dot{Z}_{20} = \frac{\dot{U}_{20}}{\dot{I}_{20}} = \frac{D}{C}.$$

Bu münasibətlərdən və dördqütblünün $\dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C} = 1$ tənliyindən istifadə edib dördqütblünün əmsallarını aşağıdakı düsturlarla tapırıq:

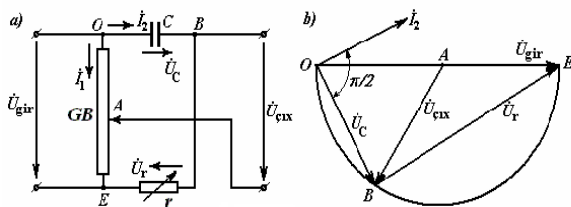
$$\dot{A} = \frac{\dot{Z}_{10}}{\dot{Z}}, \quad \dot{B} = \frac{\dot{Z}_{20}\dot{Z}_{1k}}{\dot{Z}}, \quad \dot{C} = \frac{1}{\dot{Z}},$$

$$\dot{D} = \frac{\dot{Z}_{20}}{\dot{Z}}, \quad \dot{Z} = \sqrt{(\dot{Z}_{10} - \dot{Z}_{1k})\dot{Z}_{20}}.$$

4.14. Fazfırladan quruluş

Çıxışında fazı tənzimlənən dəyişməz gərginlik almaq üçün fazfırladan quruluşdan istifadə olunur. Belə quruluşlar düzləndiricinin gərginliyini tənzimləmək üçün istifadə edilə bilər.

Sadə fazfırladan quruluşun sxeminə baxaq (şəkil 4.33). Çıxış gərginliyi $\dot{U}_{\text{cix}}$ gərginlik bölücüsünün **GB** orta nöqtəsi *A* – dan və *C* kondensatoru ilə tənzimlənən *r* müqavimət rezistoru arasındakı **B** nöqtəsindən verilir.



Şəkil 4.33. Fazfırladan quruluşun sxemi (a) və vektor diaqramı (b)

Kondensatordakı U_C və tənzimlənən rezistordakı U_r gərginliklərinin vektorları bir-birinə perpendikulyardır və onların həndəsi cəmi giriş gərginliyinə bərabərdir. Əgər giriş gərginliyinin modulu sabit qalarsa, onda vektor diaqramındakı *B* nöqtəsi (şəkil 4.33,b), *r* dəyişdikdə,

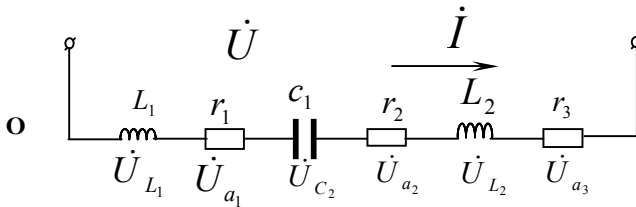
diametri $\dot{U}_{\text{gir}}$ və radiusu $\dot{U}_{\text{cix}}$ olan çevrənin qövsü üzərində hərəkət edəcəkdir. $\dot{U}_{\text{cix}}$ çıxış gərginliyinin fazı giriş gərginliyinə nisbətən, nəzəri olaraq, $-\pi$ – dən 0 - qədər dəyişə bilər. Praktiki olaraq fazın dəyişmə diapazonu kiçikdir.

4.15. Bir fazlı dəyişən cərəyan elektrik dövrlərinə aid sərbəst işlər üçün məsələlərin həlli metodikası

Məsələ 4.15.1

Şəkil 4.15.1.-də verilmiş budaqlanmayan dəyişən cərəyan dövrəsində məlum qiymətlər əsasında tam müqaviməti, gərginlik düşgünlərini və s. hesablamaq. Dövrənin güclər balansını tərtib etməklə, cərəyan və gərginliyə görə kompleks ədədlərə uyğun vektor diaqramını qurmaq.

Verilir: $\dot{U} = 120 \text{ V}$, $r_1 = 10 \text{ Om}$, $r_2 = 24 \text{ Om}$, $r_3 = 15 \text{ m}$, $L_1 = 19 \text{ mHn}$, $L_2 = 60 \text{ mHn}$, $C_1 = 450 \text{ mkF}$, $f = 50 \text{ Hs}$.



Şəkil 4.15.1. Budaqlanmayan dəyişən cərəyan dövrəsi

Həlli:

- 1) Dövrənin tam kompleks müqavimətini təyin etmək.
Əvvəl induktiv və tutum müqavimətlərini hesablayaq.

$$X_{L_1} = \omega L_1 = 2 \pi f L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 19 \cdot 10^{-3} = 5,966 \text{ Om} \approx 6 \text{ Om}$$

$$X_{L_2} = \omega L_2 = 2 \pi f L_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 18,84 \text{ Om} \approx 19 \text{ Om}$$

$$\begin{aligned} X_{C_1} &= \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{2 \pi f C_1} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 450 \cdot 10^{-6}} = \\ &= \frac{10^6}{314 \cdot 450} = \frac{1000000}{141300} = 7,077 \text{ Om} \approx 7,1 \text{ Om} \end{aligned}$$

Müqavimətin $\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{r} \pm \mathbf{jX} = \mathbf{Ze}^{\pm j\varphi}$ düsturunu nəzərə alsaq

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= r_1 + r_2 + r_3 + jX_{L1} + jX_{L2} - jX_{C1} = 10 + 24 + 25 + j6 + \\ &+ j19 - j7,1 = 49 + j25 - j7,1 = 49 + j17,9 \text{ Om} \\ Z &= \sqrt{49^2 + 17,9^2} = \sqrt{2401 + 320,41} = \sqrt{2721,41} = 52,17 \text{ Om} \end{aligned}$$

$$\text{tg}\varphi_1 = \frac{17,9}{49} = 0,3653; \quad \varphi = 20,07^\circ$$

$$\dot{Z} = 52,17e^{+j20,07^\circ} \text{ Om}$$

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= 52,17(\cos 20,07^\circ + j\sin 20,07^\circ) = 52,17 \cdot 0,9393 + \\ &+ j52,17 \cdot 0,3432 = 49 + j17,9 \text{ Om} \end{aligned}$$

Cərəyanı hesablayaq

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}} = \frac{120}{52,17e^{+j20,07^\circ}} = 2,3e^{-j20,07^\circ} \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \dot{I} &= 2,3e^{-j20,07^\circ} = 2,3(\cos 20,07^\circ - j\sin 20,07^\circ) = \\ &= 2,3 \cdot 0,9393 - j2,3 \cdot 0,3432 = 2,16 - j0,79 \text{ A} \end{aligned}$$

2) Ayrı-ayrı işlədiciyədə gərginlik düşgünlərini təyin edək

$$\begin{aligned} \dot{U}_{L1} &= X_{L1} \cdot \dot{I} = j6 \cdot 2,3e^{-j20,07^\circ} = 6e^{j90^\circ} \cdot 2,3e^{-j20,07^\circ} = \\ &= 13,8e^{j69,93^\circ} = 13,8(\cos 69,93^\circ + j\sin 69,93^\circ) = \\ &= 13,8 \cdot 0,3432 + j13,8 \cdot 0,9393 = 4,74 + j12,96 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{a1} &= r_1 \dot{I} = 10 \cdot 2,3e^{-j20,07^\circ} = 23e^{-j20,07^\circ} = 23(\cos 20,07^\circ - j\sin 20,07^\circ) = \\ &= 23 \cdot 0,9393 - j23 \cdot 0,3432 = 21,6 - j7,89 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{C1} &= X_{C1} \cdot \dot{I} = 7,1e^{-j90^\circ} \cdot 2,3e^{-j20,07^\circ} = 16,33e^{-j110,07^\circ} = \\ &= 16,33(\cos 110,07^\circ - j\sin 110,07^\circ) = \\ &= -16,33 \cdot 0,3432 - j16,33 \cdot 0,9393 = -5,6 - j15,34 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{a2} &= r_2 \cdot \dot{I} = 24 \cdot 2,3e^{-j20,07^0} = 55,2e^{-j20,07^0} = \\ &= 55,2(\cos 20,07^0 - j\sin 20,07^0) = \\ &= 55,2 \cdot 0,9393 - j55,2 \cdot 0,3432 = 51,85 - j18,94 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{L2} &= X_{L2} \cdot \dot{I} = 19e^{j90^0} \cdot 2,3e^{-j20,07^0} = 43,7e^{j69,93^0} = 43,7 \\ &(\cos 69,93^0 + j\sin 69,93^0) = 43,7 \cdot 0,3432 + j43,7 \cdot 0,9393 = 15 + j41,05 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{a3} &= r_3 \cdot \dot{I} = 15 \cdot 2,3e^{-j20,07^0} = 34,5e^{-j20,07^0} = \\ &= 34,5(\cos 20,07^0 - j\sin 20,07^0) = \\ &= 34,5 \cdot 0,9393 - j34,5 \cdot 0,3432 = 32,41 - j11,84 \text{ V} \end{aligned}$$

Kirxhofun ikinci qanununa əsasən

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_{L1} + \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{L2} + \dot{U}_{a3} = \\ &= 4,74 + j12,96 + 21,6 - j7,89 - 5,6 - j15,34 + \\ &+ 51,85 - j18,94 + 15 + j41,05 + 32,41 - j11,84; \\ &120 \text{ V} \approx 124 \text{ V} \end{aligned}$$

alınır.

3) Dövrənin güclər balansını tənzimləyən tərtib etmək.

$$\begin{aligned} \sim \quad \dot{S} &= \dot{U} \cdot \dot{I}^* = 120 \cdot 2,3e^{j20,07^0} = 276e^{j20,07^0} = \\ &= 276(\cos 20,07^0 + j\sin 20,07^0) = \\ &= 276 \cdot 0,9393 + j276 \cdot 0,3432 = 259,25 + j94,72 \text{ VA} \end{aligned}$$

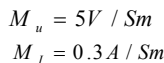
burada **P=259,25 Vt** - aktiv güc; **Q=94,72 VAR** - reaktiv güc

Dövrənin aktiv və reaktiv güclərini aşağıdakı kimi təyin etmək olar:

$$\begin{aligned} P &= \operatorname{Re} \left[\begin{matrix} \bullet & * \\ U & I \end{matrix} \right] = \operatorname{Re} \left[120 \cdot 2,3e^{j20,07^0} \right] = \\ &= 120 \cdot 2,3\cos 20,07^0 = 259,25 \text{ Vt} \end{aligned}$$

və ya

$$\cdot (10 + 24 + 15) = 5,29 \cdot 49 = 259,21 Vt$$



Şəkil 4.15.2 Hesablanmış qiymətlərə uyğun vektor diaqramı

$$Q = J_m \begin{bmatrix} \bullet & * \\ U & I \end{bmatrix} = J_m \begin{bmatrix} 120 \cdot 2,3e^{j20,07^\circ} & 0 \\ 120 \cdot 2,3\sin 20,07^\circ & 7 \end{bmatrix} = 120 \cdot 2,3\sin 20,07^\circ = 94,72 \text{ Var}$$

və ya

$$Q = (Q_{L1} + Q_{L2}) - Q_{C1} = (x_{L1}I^2 + x_{L2}I^2) - x_{e1}I^2 =$$

$$= [6(2,3)^2 + 19(2,3)^2] - 7,1(2,3)^2 = (31,74 + 100,51) -$$

$$- 37,559 = 132,25 - 37,559 = 94,691 \text{ VAr}$$

$$94,72 \text{ VAr} \approx 94,691 \text{ VAr}$$

Hesablanmış qiymətlərə uyğun cərəyan və gərginliklərə görə kompleks müstəvidə miqyasla dövrənin vektor diaqramını quraq (şəkil 4.15.2).

Burada

$$\begin{aligned} \overset{\bullet}{U}_L &= \overset{\bullet}{U}_{L1} + \overset{\bullet}{U}_{L2}; \quad \overset{\bullet}{U}_a = \overset{\bullet}{U}_{a1} + \overset{\bullet}{U}_{a2} + \overset{\bullet}{U}_{a3}; \quad \overset{\bullet}{U} = \overset{\bullet}{U}_a + \overset{\bullet}{U}_r \\ U &= \sqrt{U_a^2 + U_r^2} = \sqrt{(120)^2 + (54,01 - 54,01)^2} = \sqrt{(120)^2} = 120 \text{ V} \end{aligned}$$

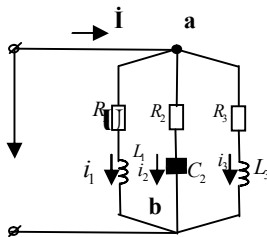
Məsələ 4.15.2

Şəkil 4.15.3-də göstərilmiş və məlum qiymətlərə əsasən ayrı-ayrı qollardan keçən cərəyanları təyin etməli. Dövrənin güclər balansını tənzimləyən tərtib etməklə cərəyan və gərginliyə görə vektor diaqramını qurmalı.

Verilir: $R_1 = 40 \text{ Om}$, $R_2 = 20 \text{ Om}$, $R_3 = 10 \text{ Om}$, $L_1 = 31,8 \text{ mH}$,
 $C_2 = 100 \text{ mkF}$, $L_3 = 95 \text{ mH}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $U = 220 \text{ V}$.

Helli

- 1) Budaqların tam müqavimətlərini təyin edək



Şəkil 4.15.3

$$x_{L1} = \omega L_1 = 2\pi f L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 31,8 \cdot 10^{-3} = 314 \cdot 31,8 \cdot 10^{-3} = 0,314 \cdot 31,8 = 9,9852 Om \approx 10 Om$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= R_1 + jx_{L1} = 40 + j10 = 41,23 e^{j14,04^0} = \\ 41,23 (\cos 14,04^0 + j \sin 14,04^0) &= 39,99 + j10 \text{ Om} \approx 40 + j10 \text{ Om} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_2 &= R_2 - jx_{C2} = 20 - j \frac{1}{\omega C_2} = 20 - j \frac{10^6}{31400} = \\ 20 - j31,85 &= 37,61 e^{-j57,87^\circ} = 37,61 (\cos 57,87^\circ - j \sin 57,87^\circ) \\ &= 20 - j31,85 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

$$x_{L3} = m_{L3} = 2p \cdot f_{L3} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 95 \cdot 10^{-3} = 0,314 \cdot 95 = 29,83 \text{ Ом}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_3 &= \mathbf{R}_3 + j\mathbf{x}_{L3} = 10 + j29,83 = 31,46 e^{j71,47^\circ} = \\ &= 31,46 (\cos 71,47^\circ + j \sin 71,47^\circ) = \\ &= 9,998 + j29,829 \, \Omega \approx 10 + j29,83 \, \Omega \end{aligned}$$

2) Om qanununa uyğun qollardan keçən cərəyanları təyin etmək

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}}{Z_1} = \frac{220}{41,23 e^{j14,04^0}} = 5,336 e^{-j14,04^0} = \\ &= 5,336 (\cos 14,04^0 - j \sin 14,04^0) = 5,18 - j1,29 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}}{Z_2} = \frac{220}{37,61 e^{-j57,87^0}} = 5,85 e^{j57,87^0} = \\ &= 5,85 (\cos 57,87^0 + j \sin 57,87^0) = 3,11 + j4,95 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_3 &= \frac{\dot{U}}{Z_3} = \frac{220}{31,46 e^{j71,47^0}} = 6,99 e^{-j71,47^0} = \\ &= 6,99 (\cos 71,47^0 - j \sin 71,47^0) = 2,22 - j6,63 \text{ A} \end{aligned}$$

3) Kirxhofun birinci qanunu əsasında dövrənin budaqlanmayan hissəsindən keçən cərəyanı təyin etmək:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = (5,18 - j1,29) + (3,11 + j4,95) + (2,22 - j6,63) = \\ &= 10,51 - j2,97 = 10,92 e^{-j15,78^0} \\ \dot{I} &= 10,92 e^{-j15,78^0} \text{ A} \end{aligned}$$

Yoxlama

$$\begin{aligned} \dot{Y}_1 &= \frac{1}{Z_1} = \frac{1}{41,23 e^{j14,04^0}} = 0,024 e^{-j14,04^0} = \\ &= 0,024 (\cos 14,04^0 - j \sin 14,04^0) = 0,0233 - j0,0058 \text{ Sim} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Y}_2 &= \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{37,61 e^{-j57,87^0}} = 0,0266 e^{j57,87^0} = \\ &= 0,0266 (\cos 57,87^0 + j \sin 57,87^0) = 0,014 + j0,0225 \text{ Sim} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Y}_3 &= \frac{1}{\dot{Z}_3} = \frac{1}{31,46 e^{j71,47^0}} = 0,0318 e^{-j71,47^0} = \\ &= 0,0318 (\cos 71,47^0 - j \sin 71,47^0) = 0,01 - j0,03 \text{ Sim}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Y}_{um} &= \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3 = 0,0233 - j0,0058 + 0,014 + j0,0255 + 0,01 - j0,03 = \\ &= 0,0473 - j0,0133 = 0,0492 e^{-j15,73^0}\end{aligned}$$

$$\dot{I} = U \dot{Y}_{um} = 220 \cdot 0,0492 e^{-j15,73^0} = 10,824 e^{-j15,73^0} \text{ A}$$

yəni

$$10,92 e^{-j15,78^0} \text{ A} \approx 10,824 e^{-j15,73^0} \text{ A}$$

- 4) hesablanmış qiymətlər əsasında qollardan keçən cərəyanların aktiv, reaktiv təşkilədicilərini və keçiriciliklərin aktiv, reaktiv mürəkkəbələrini qeyd edək

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 = 5,335 \frac{R_1}{Z_1} = 5,336 \frac{40}{41,23} = 5,1768 \approx 5,18$$

$$I_{1r} = I_1 \sin \varphi_1 = 5,336 \frac{x_{L1}}{Z_1} = 5,336 \frac{10}{41,23} = 1,2942 \approx 1,29 \text{ A}$$

onda

$$I_{2a} = 3,11 \text{ A}; \quad I_{2r} = 4,95 \text{ A}; \quad I_{3a} = 2,22 \text{ A}; \quad I_{3r} = 6,63 \text{ A}$$

$$g_{1a} = g_1 = 0,0233 \text{ Sim}; \quad b_{1l} = 0,0058 \text{ Sim};$$

$$g_2 = 0,014 \text{ Sim}; \quad b_{C2} = b_2 = 0,0225 \text{ Sim};$$

$$g_3 = 0,01 \text{ Sim}; \quad b_{L3} = b_3 = 0,03 \text{ Sim};$$

$$g_{\dot{u}m} = \dot{Y}_{\dot{u}m} \cos \varphi_{\dot{u}m} = \dot{Y}_{\dot{u}m} \frac{\dot{I}_{a\dot{u}m}}{\dot{I}} = 0,0492 \frac{10,51}{10,92} = 0,0473 \quad \text{Sim}$$

$$b_{\dot{u}m} = \dot{Y}_{\dot{u}m} \sin \varphi_{\dot{u}m} = \dot{Y}_{\dot{u}m} \frac{\dot{I}_{r\dot{u}m}}{\dot{I}} = 0,0492 \frac{2,97}{10,92} = 0,0134 \quad \text{Sim}$$

5) Dövrənin güclər balansını tərtib edək

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \dot{U} \dot{I}^* = 220 \cdot 10,92 e^{j15,78^0} = 2402,4 e^{j15,78^0} = \\ &= 2402,4 \left(\cos 15,78^0 + j \sin 15,78^0 \right) = 2311,86 + j653,32 \quad \text{VA} \end{aligned}$$

burada $P_{\dot{u}m} = 2311,86 \text{ Vt}$, $Q_{\dot{u}m} = 653,32 \text{ VAr}$ (induktiv xarakterli).

Yoxlama

$$\begin{aligned} P_{\dot{u}m} &= \text{Re} \left[\dot{U} \dot{I}^* \right] = \text{Re} \left[220 \cdot 10,92 e^{j15,78^0} \right] = \\ &= 220 \cdot 10,92 \cdot \cos 15,78^0 = 2311,86 \quad \text{Vt} \\ Q_{\dot{u}m} &= \text{Im} \left[\dot{U} \dot{I}^* \right] = \text{Im} \left[220 \cdot 10,92 e^{j15,78^0} \right] = \\ &= 220 \cdot 10,92 \cdot \sin 15,78^0 = 653,32 \text{ VAr} \end{aligned}$$

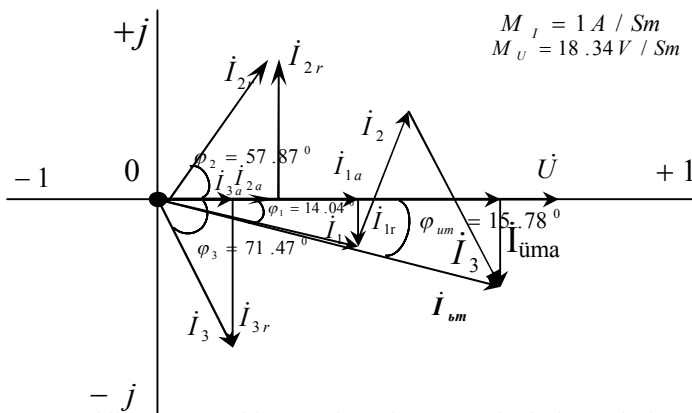
yaxud

$$\begin{aligned} P_{\dot{b}m} &= P_1 + P_2 + P_3 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 = 40(5,336)^2 + 20(5,85)^2 + \\ &+ 10(6,99)^2 = 1138,916 + 684,45 + 488,6 = 2311,97 \text{ V} \end{aligned}$$

$$2311,86 \text{ Vt} \approx 2311,97 \text{ Vt}$$

$$\begin{aligned} Q_{\dot{b}m} &= Q_1 - Q_2 + Q_3 = x_{L1} I_1^2 - x_{C2} I_2^2 + x_{L3} I_3^2 = \\ &= 10(5,336)^2 - 31,85(5,85)^2 + 29,83(6,99)^2 = \\ &= 284,73 - 1089,99 + 1458,497 = 653,24 \text{ VAr} \\ 653,32 \text{ VAr} &\approx 653,24 \text{ VAr} \end{aligned}$$

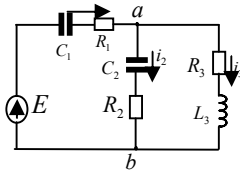
6) Dövrənin gərginlik və cərəyana uyğun miqyasla vektor diaqramını quraq (şəkil 4.15.4).



Şəkil 4.15.4 Hesablanmış qiymətlərə uyğun budaqlanan dəyişən cərəyan dövrəsi üçün vektor diaqramı

Məsələ 4.15.3. Şəkil 4.15.5-da göstərilmiş və işlədiciləri qarışıq birləşdirilmiş bir fazlı dəyişən cərəyan dövrəsində məlum qiymətlər əsasında ayrı-ayrı qollardan keçən cərəyanları hesablayın. Dövrənin güclər balansını tərtib etmək, gərginlik və cərəyana uyğun vektor diaqramını qurun.

Verilir: $E = 120 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $C_1 = 637 \text{ mkF}$, $C_2 = 300 \text{ mkF}$, $L_3 = 15,9 \text{ mHn}$, $R_1 = 8 \text{ Om}$, $R_2 = 3 \text{ Om}$, $R_3 = 4 \text{ Om}$.



Şəkil 4.15.5 Qarışıq birləşmiş dəyişən cərəyan dövrəsi

Həlli:

- 1) Dövrənin ayrı-ayrı qollarının kompleks tam müqavimətlərini hesablayaq:

$$\dot{Z}_1 = R_1 - jx_{C1} = R_1 - j \frac{1}{\omega C_1} = R_1 - j \frac{1}{2\pi f C_1}$$

burada

$$x_{C1} = \frac{1}{2\pi f C_1} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 637 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{314 \cdot 637} = \frac{1000000}{200018} \approx 5 \text{ Om}$$

Onda

$$\dot{Z}_1 = 8 - j5 \text{ Om}; \quad Z_1 = \sqrt{R_1^2 + x_{C1}^2} = \sqrt{8^2 + 5^2} = \sqrt{89} = 9,4 \text{ Om}$$

tam müqavimətin modulu adlanır; $\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{x_{C1}}{R_1} = \frac{5}{8} = 0,625;$

$\varphi_1 = \arctg 0,625 = 32^0$ arqument adlanır.

Dövrənin budaqlanmayan hissəsinin $\dot{Z}_1$ tam kompleks müqavimətini üstlü və triqonometrik şəkildə ifadə edək:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= Z_1 e^{-j\operatorname{tg}\varphi_1} = 9,4e^{-j32^0} = 9,4(\cos\varphi_1 - j\sin\varphi_1) = \\ &= 9,4(\cos 32^0 - j\sin 32^0) = 7,972 - j4,981 \approx 8 - j5 \text{ Om} \end{aligned}$$

$$x_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{2\pi f 300 \cdot 10^{-6}} = \frac{1000000}{314 \cdot 300} = \frac{10000}{942} = 10,61 \text{ Om}$$

$$x_{L3} = \omega L_3 = 2\pi f L_3 = 314 \cdot 15,9 \cdot 10^{-3} = 0,314 \cdot 15,9 = 4,99 \text{ Om}$$

$$\dot{Z}_2 = r_2 - jx_{C2} = 3 - j10,61 = 11e^{-j74,21^0} \text{ Om}$$

$$\dot{Z}_3 = r_2 + jx_{L3} = 4 + j4,99 = 6,4e^{j51,28^0} \text{ Om}$$

2) Dövrənin tam kompleks müqavimətini təyin edək

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{\text{üm}} &= \dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} = 8 - j5 + \frac{11e^{-j74,21^0} \cdot 6,4e^{j51,28^0}}{3 - j10,61 + 4 + j4,99} = \\ &= 8 - j5 + \frac{70,4e^{-j22,93^0}}{7 - j5,63} = 8 - j5 + \frac{70,4e^{-j22,93^0}}{8,98e^{-j38,81^0}} = \\ &= 8 - j5 + 7,83e^{115,88^0} = 8 - j5 + 7,83(\cos 15,88^0 + j\sin 15,88^0) = \\ &= 8 - j5 + 7,53 + j2,14 = 15,53 - j2,86 = 1579e^{-j10,43^0} \end{aligned}$$

3) Dövrəyə, tam dövrə üçün Om qanununu tətbiq edərək budaqlanmayan hissədən keçən $\dot{I}_1$ cərəyanını təyin edək:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_{\text{üm}}} = \frac{120}{15,79e^{-j10,43^0}} = 7,6e^{j10,43^0} = 7,6 \left(\cos 10,43^0 + j \sin 10,43^0 \right)$$

$$7,47 + j1,38 \text{ Om}$$

4) budaqlardan keçən $\dot{I}_2$ və $\dot{I}_3$ cərəyanlarını hesablamaq üçün $\dot{U}_{ab}$ gərginliyini hesablayaq:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{Z}_{ab} \dot{I}_1 = \dot{Z}_{2,3} \dot{I}_1 = \frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} \dot{I}_1 = \frac{11e^{-j74,21^0} \cdot 6,4e^{j51,28^0}}{8,98e^{-j38,81^0}} \\ 7,6e^{j10,43^0} &= 7,83e^{j15,88^0} \cdot 7,6e^{j10,43^0} = 59,51e^{j26,31^0} = \\ &= 59,51 \left(\cos 26,31^0 + j \sin 26,31^0 \right) = 53,34 + j26,38 \text{ V} \end{aligned}$$

Onda

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}_{ab}}{\dot{Z}_2} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_2} = \frac{59,51e^{j26,31^0}}{11e^{-j74,21^0}} = 5,41e^{j100,52^0} = \\ &= 5,41 \left(\cos 100,52^0 + j \sin 100,52^0 \right) = -0,99 + j5,32 \text{ A} \\ \dot{I}_3 &= \frac{\dot{U}_{ab}}{\dot{Z}_3} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_3} = \frac{59,51e^{j26,31^0}}{6,4e^{j51,28^0}} = 9,3e^{-j24,97^0} = \\ &= 9,3 \left(\cos 24,97^0 - j \sin 24,97^0 \right) = 8,43 - j3,92 \text{ A} \end{aligned}$$

Kirxhofun birinci qanununa əsasən

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = -0,99 + j5,32 + 8,43 - j3,92 = 7,44 + j1,4 \text{ A}$$

yəni

$$(7,47 + j1,38) \text{ A} \approx (7,44 + j1,4) \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{Z}_1 \dot{I}_1 = 9,4e^{-j32^0} \cdot 7,6e^{j10,43^0} = 71,44e^{-j21,57^0} = \\ &= 71,44 \left(\cos 21,57^0 - j \sin 21,57^0 \right) = 66,44 - j26,26 \text{ V} \end{aligned}$$

Kirxhofun ikinci qanununa əsasən

$$\overset{\bullet}{E} = \overset{\bullet}{U}_1 + \overset{\bullet}{U}_{ab} = 66,44 - j26,26 + 53,34 - j26,38 = 119,78 - j0,12 \text{ A}$$

$$E = \sqrt{(119,78)^2 + (0,12)^2} = 119,78 \approx 120 \text{ V}$$

Qeyd: hesabatda kiçik fərqin olması hesabatın bir qədər təqribi yerinə yetirildiyini göstərir.

5) Dövrənin güclər balansını tənliyini tərtib edək

$$\tilde{S} = \overset{\bullet}{E} \overset{*}{I}_1 = 120 \cdot 7,6e^{-j10,43^\circ} = 912e^{-j10,43^\circ} =$$

$$= 912 \left(\cos 10,43^\circ - j \sin 10,43^\circ \right) = 896,93 - j165,1 \text{ VA}$$

burada $P = 896,93 \text{ Vt}$ – aktiv güc; $Q = 165,1 \text{ VAr}$ – reaktiv güc (tutum xarakterli),

yaxud

$$P = \operatorname{Re} \left[\overset{\bullet}{E} \overset{*}{I}_1 \right] = \operatorname{Re} \left[120 \cdot 7,6e^{-j10,43^\circ} \right] = 120 \cdot 7,6 \cos 10,43^\circ =$$

$$= 912 \cos 10,43^\circ = 912 \cdot 0,9835 = 896,93 \text{ Bt}$$

$$Q = \operatorname{Im} \left[\overset{\bullet}{E} \overset{*}{I}_1 \right] = \operatorname{Im} \left[120 \cdot 7,6e^{-j10,43^\circ} \right] = 120 \cdot 7,6 \sin 10,43^\circ =$$

$$= 912 \sin 10,43^\circ = 912 \cdot 0,1810 = 165,1 \text{ VAr}$$

Dövrənin tələb etdiyi aktiv və reaktiv gücü aşağıdakı kimi də təyin etmək olar

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 =$$

$$= 8(7,6)^2 + 3(5,41)^2 + (9,3)^2 = 462,08 + 87,8 + 345,96 = 895,76 \text{ Vt}$$

$$896,93 \text{ Vt} \approx 895,76 \text{ Vt}$$

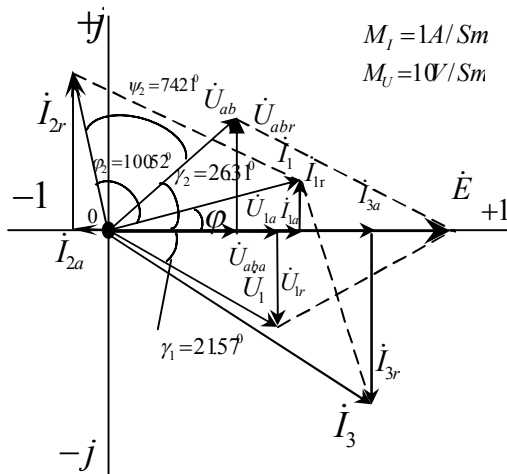
$$Q = Q_3 - (Q_1 + Q_2) = x_{L3} (I_3)^2 - [x_{C1} (I_1)^2 + x_{C2} (I_2)^2] =$$

$$= 4,99(9,3)^2 - [5(7,6)^2 + 10,61(5,41)^2] = 431,58 -$$

$$- (288,8 + 310,53) = 431,58 - 599,33 = -167,75 \text{ VAr}$$

$$165,1 \text{ VAr} \approx 167,75 \text{ VAr}$$

mənfi işarəsi reaktiv gücün tutum xarakterli olduğunu göstərir.



Şəkil 4.15.6 Hesablanmış qiymətlərə
uyğun qarışıq birləşmiş dəyişən
cərəyan dövrəsinin vektor diaqramı

- 6) Hesabatdan alınmış qiymətlər əsasında kompleks müstəvidə miqyasla gərginlik və cərəyana görə dövrənin vektor diaqramını quraq (şəkil 4.15.6).

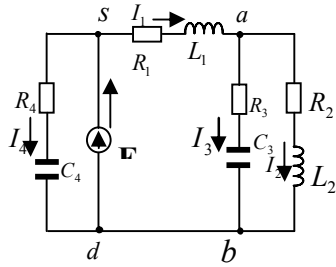
Məsələ 4.15.3. Şəkil 4.15.7-da göstərilmiş və işlədiciləri qarışıq birləşdirilmiş bir fəzalı dəyişən cərəyan dövrəsində məlum qiymətlər əsasında ayrı-ayrı qollardan keçən cərəyanları hesablayın dövrənin güclər balansını tənzimləyən tərtib etməklə gərginlik və cərəyana uyğun vektor diaqramını qurun.

Verilir: $E = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $R_1 = 6 \text{ }\Omega$, $R_2 = 4 \text{ }\Omega$, $R_3 = 10 \text{ }\Omega$, $R_4 = 20 \text{ }\Omega$, $C_3 = 637 \text{ }\mu\text{F}$, $C_4 = 159 \text{ }\mu\text{F}$, $L_1 = 25 \text{ mH}$, $L_2 = 9 \text{ mH}$.

Hælli:

- 1) Dövrənin kompleks tam müqavimətini hesablayaq:

$$\dot{Z}_{\text{üm}} = \frac{\begin{pmatrix} \dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} \end{pmatrix} \cdot \dot{Z}_4}{\dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} + \dot{Z}_4}$$



Şəkil 4.15.7. Qarışıq birləşmiş dəyişən cərəyan dövrəsi

2) Ayrı-ayrı qolların kompleks tam müqavimətlərini təyin edək

$$\begin{aligned} x_{L1} &= \omega L_1 = 2\pi f L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 25 \cdot 10^{-3} = \\ &= 314 \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 0,314 \cdot 25 = 7,85 \text{ Om} \end{aligned}$$

Onda

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= R_1 + jx_{L1} = 6 + j7,85 = 9,88e^{j52,61^0} = \\ &= 9,88(\cos 52,61^0 + j \sin 52,61^0) = \\ &= 5,999 + j7,8495 \approx 6 + j7,85 \text{ Om} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{L2} &= \omega L_2 = 2\pi f L_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 9 \cdot 10^{-3} = \\ &= 314 \cdot 9 \cdot 10^{-3} = 0,314 \cdot 9 = 2,83 \text{ Om} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_2 &= R_2 + j\omega L_2 = R_2 + jx_{L2} = 4 + j2,83 = \\ &= 4,9e^{j35,28^0} = 4,9(\cos 35,28^0 + j \sin 35,28^0) = 4 + j2,83 \text{ Om} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{C3} &= \frac{1}{\omega C_3} = \frac{1}{2\pi f C_3} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 637 \cdot 10^{-6}} = \\ &= \frac{1000000}{314 \cdot 637} = \frac{1000000}{200018} = 4,99955 \approx 5 \text{ Om} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_3 &= R_3 - j\frac{1}{\omega C_3} = R_3 - jx_{C3} = 10 - j5 = 11,18e^{-j26,56^0} = \\ &= 11,18(\cos 26,56^0 - j \sin 26,56^0) = 10 - j4,99897 \approx 10 - j5 \text{ Om} \end{aligned}$$

$$x_{C4} = \frac{1}{\omega C_4} = \frac{1}{2\pi f C_4} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 159 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= \frac{1000000}{314 \cdot 159} = \frac{1000000}{49926} = 20,03 \text{ Om}$$

Əgər $R_4 = 0$ olarsa:

$$\dot{Z}_4 = x_{C4} = 20,03e^{-j90^0} \text{ Om}$$

və $R_4 = 20 \text{ Om}$ olarsa :

$$\dot{Z}_4 = R_4 + jx_{C4} = 20 - j20,03 = 28,3e^{-j45,09^0}$$

3) $\dot{Z}_{ab}$, yəni $\dot{Z}_{2,3}$ kompleks tam müqaviməti hesablayaq:

$$\dot{Z}_{ab} = \dot{Z}_{2,3} = \frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} = \frac{4,9e^{j35,28^0} \cdot 11,18e^{-j26,56^0}}{4 + j2,83 + 10 - j5} =$$

$$= \frac{54,782e^{j8,72^0}}{14 - j2,17} = \frac{54,782e^{j8,72^0}}{14,17e^{-j8,81^0}} = 3,87e^{j17,53^0} =$$

$$= 3,87(\cos 17,53^0 + j\sin 17,53^0) = 3,69 + j1,16 \text{ Om}$$

Onda dövrənin ümumi, yəni ekvivalent kompleks tam müqaviməti

$$\dot{Z}_{um} = \frac{(6 + j7,85 + 3,69 + j1,16) \cdot (R_4 - jx_{C4})}{(6 + j7,85 + 3,69 + j1,16 + 20 - j20,03)} = \frac{(9,69 + j9,01)28,3e^{-j45,04^0}}{29,69 - j11,02} =$$

$$= \frac{13,23e^{j42,92^0} \cdot 28,3e^{-j45,04^0}}{31,67e^{-j20,36^0}} = \frac{374,41e^{-j2,12^0}}{31,67e^{-j20,36^0}} =$$

$$= 11,82e^{j18,24^0} = 11,82(\cos 18,24^0 + j\sin 18,24^0) = 11,23 + j3,7 \text{ Om}$$

4) Dövrənin budaqlanmayan hissəsindən keçən cərəyanı təyin edək

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_{\text{üm}}} = \frac{220}{11,82e^{j18,24^0}} = 18,61e^{-j18,24^0} = \\ &= 18,61(\cos 18,24^0 - j\sin 18,24^0) = 17,67 - j5,82 \text{ A} \end{aligned}$$

Dövrənin ayrı-ayrı qollarından (budaqlarından) keçən kompleks cərəyanları hesablayaq:

$$\begin{aligned} \dot{I}_4 &= \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_4} = \frac{220}{28,3e^{-j45,04^0}} = 7,774e^{j45,04^0} = \\ &= 7,774(\cos 45,04^0 + j\sin 45,04^0) = 5,49 + j5,5 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_{2,3}} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_{ab}} = \frac{220}{6 + j7,85 + 3,69 + j1,16} = \\ &= \frac{220}{9,69 + j9,01} = \frac{220}{13,23e^{j42,92^0}} = 16,63e^{-j42,92^0} = \\ &= 16,63(\cos 42,92^0 - j\sin 42,92^0) = 12,18 - j11,32 \text{ A} \end{aligned}$$

Kirxhofun 1-ci qanununa əsasən

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_4 \\ 17,67 - j5,82 &= 12,18 - j11,32 + 5,49 + j5,5 \\ 17,67 - j5,82 \text{ A} &= 17,67 - j5,82 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{ab}}{\dot{Z}_2}$$

$\dot{U}_{ab}$ gərginliyini təyin edək

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} = \dot{Z}_{ab} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} \dot{I}_1 = 3,87e^{j17,53^0} \cdot 16,63e^{-j42,92^0} = \\ &= 64,36e^{-j25,39^0} = 64,36(\cos 25,39^0 - j\sin 25,39^0) = 58,14 - j27,6V \end{aligned}$$

Onda

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}_{ab}}{\dot{Z}_2} = \frac{64,36e^{-j25,39^0}}{4,9e^{j35,28^0}} = 13,13e^{-j60,67^0} = \\ &= 13,13(\cos 60,67^0 - j\sin 60,67^0) = 6,43 - j11,45 \text{ A} \\ \dot{I}_3 &= \frac{\dot{U}_{ab}}{\dot{Z}_3} = \frac{64,36e^{-j25,39^0}}{11,18e^{-j26,56^0}} = 5,76e^{j1,17^0} = \\ &= 5,76(\cos 1,17^0 + j\sin 1,17^0) = 5,759 + j0,118 \text{ A} \end{aligned}$$

Kirxhofun 1-ci qanunu əsasında $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3$ olduğundan

$$\begin{aligned} (12,18 - j11,32) &= 6,43 - j11,45 + 5,759 + j0,118 \\ (12,18 - j11,32) \text{ A} &\approx (12,189 - j11,332) \text{ A} \\ \dot{U}_1 = \dot{Z}_1 \dot{I}_1 &= 9,88e^{j52,61^0} \cdot 16,63e^{-j42,92^0} = 164,3e^{j9,69^0} = \\ &= 164,3(\cos 9,69^0 + j\sin 9,69^0) = 161,95 + j27,65 \text{ V} \end{aligned}$$

Kirxhofun 2-ci qanunu əsasında

$$\begin{aligned} E &= U_1 + U_{ab} \\ 220 \text{ V} &= 161,95 + j27,65 + 58,14 - j27,6 \\ 220 \text{ V} &\approx 220,09 + j0,06 \\ 220 \text{ V} &\approx 220,15 \text{ V} \end{aligned}$$

5) Dövrənin güclər balansı tənliyini tərtib edək:

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \tilde{E} \tilde{I} = 220 \cdot 18,61 e^{j18,24^0} = 4094,2 e^{j18,24^0} = \\ &= 4094,2 (\cos 18,24^0 + j \sin 18,24^0) = 3888,483 + j12,81476 \text{ VA} \end{aligned}$$

burada $P_{\text{üm}} = 3888,483 \text{ Vt}$; $Q_{\text{üm}} = 12,81,476 \text{ VAr}$ (induktiv xarakterli).

Aktiv və reaktiv gücləri başqa formada da təyin etmək olar:

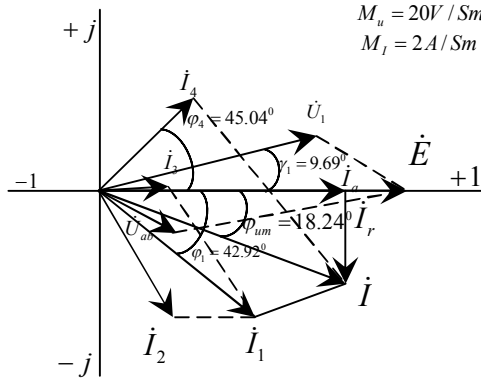
$$\begin{aligned} P_{\text{um}} &= \operatorname{Re} \left[\tilde{E} \tilde{I}^* \right] = \operatorname{Re} \left[220 \cdot 18,61 e^{j18,24^0} \right] = \\ &= 220 \cdot 18,61 \cos 18,24^0 = 3888,463 \text{ Vt} \\ Q_{\text{um}} &= \operatorname{Im} \left[\tilde{E} \tilde{I}^* \right] = \operatorname{Im} \left[220 \cdot 18,61 e^{j18,24^0} \right] = \\ &= 220 \cdot 18,61 \sin 18,24^0 = 1281,476 \text{ VAr} \end{aligned}$$

Yoxlama

$$\begin{aligned} P_{\text{um}} &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 = \\ &= 6(16,63)^2 + 4(13,13)^2 + 10(5,76)^2 + 20(7,774)^2 = \\ &= 1659,341 + 689,588 + 331,776 + 1208,701 = 3889,406 \text{ Vt} \\ &3888,483 \text{ Vt} \approx 3889,406 \text{ Vt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{üm}} &= (Q_1 + Q_2) - (Q_3 + Q_4) = [x_{L1}(I_1)^2 + x_{L2}(I_2)^2] - \\ &- [x_{C3}(I_3)^2 + x_{C4}(I_4)^2] = [7,85(16,63)^2 + 2,83(13,13)^2] - \\ &- [5(5,76)^2 + 20,03(7,774)^2] = (2170,972 + 487,883) - \\ &- (165,888 + 1210,515) = 2658,855 - 1376,404 = 1282,452 \text{ VAr} \\ &1281,476 \text{ VAr} \approx 1282,452 \text{ VAr} \end{aligned}$$

- 6) Hesabatdan alınmış qiymətlər əsasında kompleks müstəvidə miqyasla gərginlik və cərəyana görə dövrənin vektor diaqramını quraq (şəkil 4.15.8.).



Şəkil 4.16.8. Hesablanmış qiymətlərə uyğun qarışıq birləşmiş dəyişən cərəyan dövrəsinin vektor diaqramı

4.16. Birləşmiş dəyişən cərəyan elektrik dövrələrinə aid sərbəst işlər

1. Sinusoidal cərəyanın müsbət istiqaməti anlayışını izah edin
2. Müəyyən zaman anı üçün sinusoidal e.h.q mənbəyinin qütblərini göstərmək olarmı?
3. Sinusoidal cərəyanın hansı üstünlükləri onun geniş yayılmasına səbəb olmuşdur?
4. Başlanğıc faza və faza fərqi anlayışlarını izah edin
5. Dəyişən cərəyanın təsir edici qiymətindən istifadə etməyin hansı üstünlükləri vardır?
6. Vektor diaqramı nədir və ondan istifadə etməyin hansı üstünlükləri vardır?
7. İki sinusoidal kəmiyyəti təsvir edən vektorlar 60° bucaq təşkil edir. Tezliyin iki qiyməti $f_1 = 50$ khc-üçün kəmiyyətlərin maksimal qiymətləri arasındakı zaman fərqi təyin etməli
8. Parametrləri $U_n = 220V$, $I_n = 5A$, $f_n = 50Hz$, $P_n = 400W$ olan dəyişən cərəyan sarğacını $U=200V$ gərginlikli sabit cərəyan şəbəkəsinə qoşmaq lazımdır. Sarğacda cərəyanın nominal qiymətdə olması üçün ($5A$) dövrəyə ardıcıl olaraq reostat qoşulmalıdır. Reostarın müqavimətini sarğacın aktiv müqavimətini və induktivliyini tapmalı
9. Ardıcıl dövrə hissələrində gərginliklərin ani qiymətləri verilmişdir:

$$u_1 = 90 \sin(314t + 30^\circ), u_2 = 40 \sin(314t - 60^\circ)$$

$$u_3 = 60 \sin(314t - 150^\circ) .$$

Vektor diaqramının köməyi ilə ümumi gərginliyin ani qiymətini tapmalı.

10. Kondensatorlu dəyişən cərəyan dövrəsində cərəyanın axması faktını izah edin

11. x_L və x_C hesabi kəmiyyətlərin fiziki mahiyyətini aydınlaşdırın. Nə üçün bu kəmiyyətlərin qiymətdən asılıdır?

12. İnduktivlikli dövrədə gedən enerji dəyişməsi prosesini izah edin

13. Kondensatorlu dövrədə gedən enerji dəyişməsi prosesinin fiziki mahiyyətini aydınlaşdırın.

14. Dövrədə tətbiq edilmiş gərginliyin və dövrədən axan cərəyanın ani qiymətləri verilmişdir: $u=141\sin(314t+60^\circ)$ B, $i=7,07 \sin 314t$ A. Yükün xarakterini və parametrlərini təyin etməli, dövrənin vektor diaqramını qurmalı, paralel və ardıcıl əvəz sxemin çəkməsi.

15. Gərginliyi 100 V olan şəbəkəyə ardıcıl sürətdə 220 mKФ tutumlu kondensator və 5 Om–luq müqavimət qoşulmuşdur. Dövrənin cərəyanını, aktiv, reaktiv və tam güclərini, güc əmsalını təyin etməli. Vektor diaqramını çəkməli.

16. Verilmiş dövrədə (şəkil 4.14) $U=200$ V, $U_L=200$ V, $U_a=120$ V, $r=12$ Om $f=50$ Hz. L induktivliyin və C tutumunun dövrənin verilmiş rejimini təyin edən iki C' və C'' qiymətlərini tapmalı. Dövrənin rezonans tezliyini tapmalı və vektor diaqramını qurmalı.

17. Yükün tələb etdiyi cərəyan $I=10$ A, qoşulduğu cərəyan $U=200$ V, güc əmsalı $\cos\varphi=0,6$. Yüke paralel olaraq hansı C tutumlu kondensatora qoşmaq lazımdır ki, dövrənin güc əmsalı $\cos\varphi=1$ olsun? Dövrə üçün vektor diaqramını qurmalı. Tezlik $f=50$ Hz-dir.

18. r_1 müqaviməti paralel olaraq r_2 müqavimətli və L_2 induktivlikli sarğacla birləşdirilmişdir və $U=220$ V gərginlikli şəbəkəyə qoşulmuşdur. r_1 -dən axan cərəyan $I_1=5$ A, sarğacdən axan cərəyan $I_2=4$ A, şəbəkədən dövrəyə daxil olan cərəyan $I=8$ A. vektor diaqramını qurmalı və r_1, r_2, x_2 kəmiyyətlərini tapmalı.

19. 4.18 –ci şəkildəki dövrə üçün məlumdur ki $U=220$ V, $r_1=9$ Om, $x_{L1}=12$ Om, $x_{C1}=15$ Om, $r_2=16$ Om, $x_{L2}=6$ Om, $x_{C2}=12$ Om. Paralel budaqların və bütün dövrənin cərəyanlarını, aktiv və reaktiv güclərini təyin etməli. Dövrənin ekvivalent sxemini çəkməli və parametrlərini tapmalı.

20. Əvvəlki məsələdə bütün dövrə üçün güc əmsalını tapmalı.

21. Müəssisə elektrik verilmiş xətti ilə qidalandırılır. Müəssisənin tələb etdiyi güc $P=240$ kVt, güc əmsalı $\cos\varphi=0,6$. Xətt məftillərində güc itkisi $\Delta P=30$ kVt. Güc əmsalı $\cos\varphi=0,9$ qiymətinə qədər artırmaq üçün kondensator batareyasının gücünün (Q_c) və kondensator qoşulduqdan sonra xətdə güc itkisini təyin etməli.

22. Sinusoidal cərəyan dövrlərinin hesabında kompleks ədədlərdən istifadə etməyin əhəmiyyəti nədədir?

23. Birmənbəli budaqlanmayan dövrəni hesabladığda kompleks ədədlərdən istifadə etmək əlverişlidirmi?

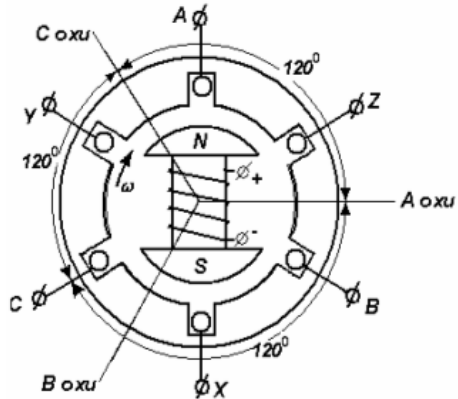
24. Kompleks keçiricilik verilmişdir. $Y = 1,41 + j1,73$ Sim. Müqavimətləri təyin etməli.

25. Dövrə hissəsində gərginlik və cərəyanın kompleks ifadələri verilmişdir: $U = 50 + j50\sqrt{2}$ V, $I = 4\sqrt{3} - j4$ A. Dövrə hissəsinin əvəz sxemini qurmalı. Gücləri tapmalı

4.17. Üçfazlı dəyişən cərəyan elektrik dövrləri

Əsas anlayışlar. Çoxfazlı dövrlərin xüsusi halı olan **üçfazlı dövrlər**, hər birində eyni tezlikli e.h.q. təsir edən üç birləşən dövrənin birliyindən ibarətdir. Çoxfazlıya daxil olan birləşən dövrlərə çoxfazlı dövrənin **fazları** deyilir. Burada biz **faz** anlayışının ikinci mənasından istifadə etdik, bunu onun birinci mənası ilə qarışdırmaq olmaz (e.h.q.-nin, cərəyanın fazı və s.).

Bütün mümkün olan çoxfazlı dövrlərdən ən sadəsi və buna görə də ən geniş yayılanı üçfazlı dövrədir. Fazları elektriki birləşdirilməyibsə, üçfazlı dövrə əlaqəsiz, yox əgər belə birləşmə varsa əlaqəli ola bilər. Üçfazlı dövrənin e.h.q.-lərinin vəhdətinə **üçfazlı e.h.q.-lər sistemi**, onun fazlarındakı cərəyanlara isə **üçfazlı cərəyanlar sistemi** deyilir. Praktikada üçfazlı simmetrik sinusoidal e.h.q. -lər sistemindən istifadə edilir, çünki belə sistem texniki-iqtisadi cəhətdən daha əlverişlidir.



Şəkil 4.34. Üçfazlı generatorun modeli

Elektrik stansiyalarında elektrik enerjisi yalnız üçfazlı sistem üçün istehsal edilir. Şəkil 4.34-də üçfazlı generatorun modeli təsvir edilmişdir, onun statorunun pəzlərində üç eyni cürə dolağın naqilləri yerləşdirilmişdir. Sadə olmaq üçün hər dolaq bir sarğıdan ibarət təsvir edilmişdir. Stator dolaqlarının (fazlarının) oxları fəzada bir-birinə nəzərən 120^0 bucaq qədər sürüşdürülmüşdür. Rotordakı dolaq kənar mənbədən sabit cərəyanla qidalanır.

Rotor ω bucaq sürətilə fırlandıqda onun maqnit sahəsi ardıcıl olaraq faz dolaqlarının naqillərini kəsir və bunlarda faz e.h.q. -lərini induksiyləyir. Bu e.h.q.-lər sinusoidal olub fazca üçdə bir period fərqlənirlər. Şəkildən göründüyü kimi faz dolaqlarının ucları **A-X**, **B-Y**, **C-Z** hərfləri ilə işarə olunmuşdur. Faz dolaqları, yaxud cədcəə olaraq generatorun fazları **A**, **B**, **C** hərfləri ilə işarə olunur. ***Faz ardıcılığının düz istiqaməti*** üçün e.h.q.-lərin ani qiymətlərinin ifadələri belə yazılır:

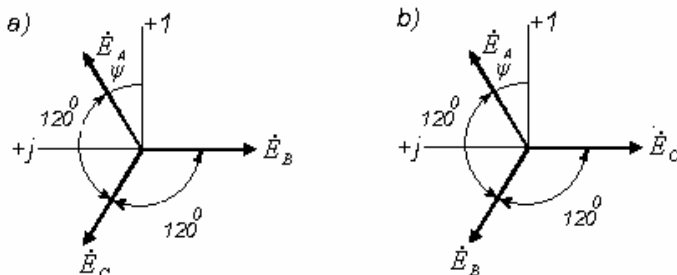
$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\omega t + \psi) , \\ e_B &= E_m \sin(\omega t + \psi - 120^0) , \\ e_C &= E_m \sin(\omega t + \psi - 240^0) , \end{aligned}$$

burada E_m —e.h.q.-nin amplitudu; ψ — A fazının başlanğıc fazıdır.

Faz ardıcılığının tərs istiqamətini də fərqləndirirlər: $A-C-B$. Bu halda e.h.q.-lərin kompleks ifadələri belə şəkildə olar:

$$\dot{E}_A = E e^{j\psi} , \quad \dot{E}_B = E e^{j\psi - 240^0} , \quad \dot{E}_C = E e^{j\psi - 120^0} .$$

Şəkil 4.35-də üçfazlı e.h.q.-lər sisteminin fazların düz və tərs ardıcılıqları üçün vektor diaqramları göstərilmişdir.



Şəkil 4.35. Faz ardıcılığının istiqamətləri üçün vektor diagramı

Baxılan simmetrik sinusoidal e.h.q-lər sisteminin cəmi həmişə sıfırdır:

$$e_A + e_B + e_C = 0,$$

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Generatorun üçfazlı dolaqlarını birləşdirmə üsulları.

Üçfazlı generatorun faz dolaqlarını üç ədəd elektrik enerji qəbuledicisi ilə altı məftillə birləşdirmək olar. Bu halda üç ədəd müstəqil birfazlı dövrə alınır. Praktikada əlaqəsiz üçfazlı dövrlərdən istifadə olunmur. Generatorun faz dolaqları öz aralarında “**ulduz**” (şərti işarəsi Y) və yaxud “**üçbucaq**” (Δ) sxemi üzrə birləşdirilirlər.

4.18. “Ulduz” sxemi üzrə birləşmə

“Ulduz” sxemi üzrə birləşdirdikdə faz dolaqlarının son ucları X, Y, Z ümumi düyündə – 0 birləşdirilir (şəkil 4.36). 0 düyünü *generatorun neytralı və ya sıfır nöqtəsi* adlanır. Bu adlandırma həmişə $e_A + e_B + e_C = 0$ olduğu fakta əsaslanmışdır.

İndi generatoru tələbatçı ilə dörd məftil vasitəsilə birləşdirmək olar. Üç geri qayıdan məftilləri əvəz edən və

generatorun sıfır nöqtəsindən çıxan məftilə *sıfır və ya neytral məftil* deyilir. Yerdə qalan üç məftil *xətt məftilləri* adlanır.

Şəkil 4.36.-də faz e.h.q.-lərinin, faz və xətt cərəyanlarının müsbət istiqamətləri göstərilmişdir.

Generatorun fazlarından axan cərəyanlara *faz*, xətt məftillərindən axan cərəyanlara *xətt cərəyanları* deyilir.

Generatorun ayrı-ayrı faz dolaqlarının uclarındakı gərginliklərə *faz gərginlikləri* deyilir. Xətt məftilləri arasındakı *gərginliklər xətt gərginlikləri* adlanır.

Şəkil 4.36-da faz və xətt gərginliklərinin işarələri və müsbət istiqamətləri göstərilmişdir.

Şəkil 4.37-dən görünür ki, fazları “ulduz” sxemi üzrə birləşdirdikdə xətt cərəyanları faz cərəyanlarına bərabər olur:

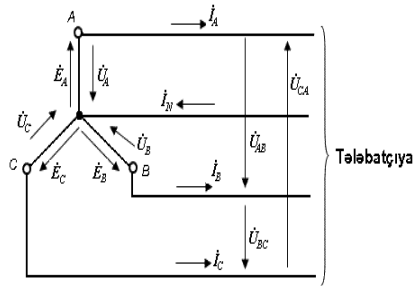
$$I_x = I_f .$$

Xətt və faz gərginlikləri arasında aşağıdakı asılılıq vardır (şəkil 4.37):

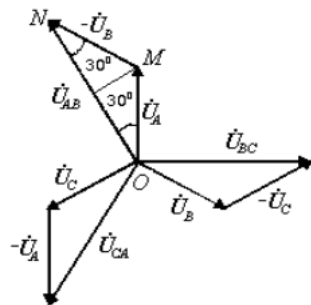
$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B ,$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C ,$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A .$$



Şək. 4.36. Faz e.h.q.-lərinin, faz və xətt cərəyanlarının müsbət istiqamətləri



Şəkil 4.37. Faz və xətt gərginliklərinin vektor diaqramı

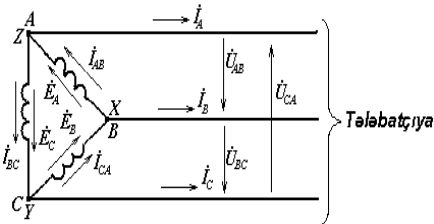
Faz və xətt gərginliklərinin vektor diaqramı şəkil 2.46-də çösterilib. Diaqramdakı *OMN* üçbucağından tapırıq:

$$U_{AB} = 2 \cdot OM \cdot \cos 30^\circ = 2U_A \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_f .$$

Beləliklə, generatorun fazlarını “ulduz” sxemi üzrə birləşdirdikdə xətt gərginliyi faz gərginliyindən $\sqrt{3}$ dəfə böyük olur. Elə buna görədir ki, nöminal dəyişən gərginliklərin bir- biri-nə nisbəti $\sqrt{3}$ - ə bərabərdir: **127, 220, 380, 660V**.

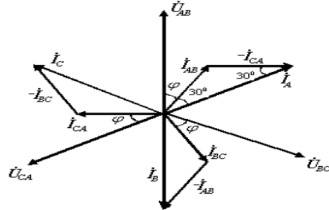
4.19. “Üçbucaq” sxemi üzrə birləşmə

Generatorun faz dolaqlarının “üçbucaq” sxemi üzrə birləşməsinə baxaq. Generatorun faz dolaqlarını “üçbucaq” sxemi üzrə birləşdirmək üçün birinci faz dolağının *X* son ucunu ikinci faz dolağının başlanğıc *B* ucuna, ikincinin *Y* son ucunu üçüncünün başlanğıc *C* ucuna və üçüncünün *Z* son ucunu birinci faz dolağının başlanğıc *A* ucuna birləşdirmək lazımdır (şəkil 4.38).



Şəkil 4.38. Üçbucaq sxemi üzrə birləşmə

Generatorun faz dolaqlarının belə sxem üzrə birləşdirməyin mümkünlüyü o fakta əsaslanır ki, istənilən zaman anında $e_A + e_B + e_C = 0$ və buna görə də generatorun fazlarının yaratdığı üçbucağın daxilində bərabərləşdirici cərəyan yaranmır.



Şəkil 4.39. Üçbucaq birləşmiş simmetrik yük üçün vektor diaqramı

Generatorun faz dolaqlarını “üçbucaq” sxemi üzrə birləşdirdikdə sıfır məftili olmur, təkcə xətt məftilləri olur.

Şəkil 4.39–da e.h.q.-lərin, cərəyanların və gərginliklərin müsbət istiqamətləri göstərilmişdir. Şəkildən görünür ki, faz dolaqlarını “üçbucaq” sxemi üzrə birləşdirdikdə xətt gərginlikləri faz gərginliklərinə bərabər olur:

$$U_x = U_f.$$

Xətt cərəyanları faz cərəyanları vasitəsilə Kirxhofun birinci qanununa əsasən belə ifadə olunur:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$$

Tutaq ki, yük simmetrikdir, onda cərəyanlar modulca bərabər olar:

$$\dot{I}_{AB} = \dot{I}_{BC} = \dot{I}_{CA} \quad \text{və} \quad \dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C.$$

Bunu vektor diaqramı vasitəsilə isbat etmək olar (şəkil 4.39). Faz və xətt cərəyanları vektor diaqramında üç ədəd bərabəryanlı üçbucaq təşkil edir. Bu üçbucaqlardan tapırıq ki:

$$I_x = I_A = 2I_f \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_f$$

Bütün yuxarıda deyilənlərdən aydın olur ki, üçfazlı dövrələr dördməftilli və yaxud üç məftilli ola bilər, yəni generatorun elektrik enerji işlədicilərlə birləşməsi, generatorun faz dolaqlarının birləşmə üsulunla asılı olaraq, dörd və yaxud üç məftillə ola bilər. Generatorun fazlarını “ulduz” sxemilə birləşdirdikdə və yük simmetrik olduqda xətt cərəyanlarının cəmi həmişə sıfır olur. Bunu isbat etmək çətin deyildir. Əgər fazların e.h.q.-ləri simmetrikdirsə, onda generatorun faz gərginlikləri də simmetrikdir:

$$\dot{U}_A = U_f, \quad \dot{U}_B = U_f e^{-j120^\circ}, \quad \dot{U}_C = U_f e^{j120^\circ}.$$

Belə halda yük simmetrik olarsa, xətt (və faz) cərəyanları da simmetrik olar:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{Z_A} = \frac{U_f}{Z_f} e^{j\varphi} = I_f e^{j\varphi}, \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B}{Z_B} = \frac{U_f}{Z_f} e^{-j120^\circ} e^{j\varphi} = I_f e^{j(\varphi-120^\circ)}, \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \frac{U_f}{Z_f} e^{j120^\circ} e^{j\varphi} = I_f e^{j(\varphi+120^\circ)}. \end{aligned}$$

Bu cərəyanların cəmi sıfır məftilindən axır və sıfıra bərabərdir:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = I_f e^{j\varphi} (1 + e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ}) = 0.$$

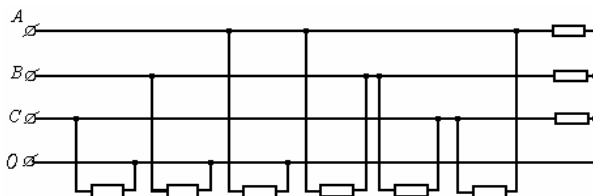
Buna görə də simmetrik yük halında sıfır məftili lazım deyildir.

4.20. Üçfazlı şəbəkəyə birfazlı və üçfazlı işlədicilərin qoşulma üsulları

Bir fazlı işlədiciləri, nominal gərginliyindən asılı olaraq, dördməftilli üçfazlı şəbəkənin faz gərginliklərinə, ya da fazlararası gərginliklərinə qoşmaq olar. Bu zaman bir fazlı işlədicilərin qoşulması bir-birindən asılı olmadan icra edilir. Fazlar arasındakı gərginliyə qoşulduqda birfazlı işlədicilər “üçbucaq” sxemi üzrə birləşmiş olurlar. Faz gərginliyinə qoşulduqda birfazlı işlədicilər öz aralarında “ulduz” sxemi üzrə birləşmiş olurlar (şəkil 4.40).

Şəkil 4.40-da birfazlı işlədicilərin üçfazlı şəbəkəyə qoşulması təsvir edilib. Şəkildə 6 ədəd birfazlı işlədici faz gərginliyinə, 3 ədədi isə fazlararası gərginliyə qoşulmuşdur. Birfazlı işlədiciləri öz aralarında əvvəlcədən “ulduz” və yaxud “üçbucaq” sxemi üzrə birləşdirmək, sonra isə üçfazlı şəbəkəyə qoşmaq olar.

Hər bir halda birfazlı işlədiciləri üçfazlı şəbəkəyə elə hesabla qoşmaq lazımdır ki, faz və xətt cərəyanları mümkün qədər simmetrik olsun. Qeyri-simmetrik yük halında və xətt məftillərindən biri(üçməftilli şəbəkədə), yaxud sıfır məftili qırıldıqda bütün işlədicilərin normal işi pozulur. Bu zaman ayrı-ayrı işlədicilər sıradan çıxır da bilər.



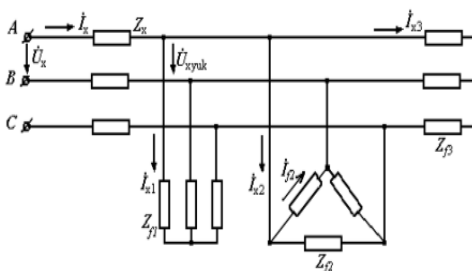
Şəkil 4.40. Birfazlı işlədicilərin üçfazlı şəbəkəyə qoşulması

Üçfazlı işlədicilər şəbəkənin gərginliyindən və özünün nominal gərginliyindən asılı olaraq “ulduz” və yaxud “üçbucaq” sxemi üzrə birləşdirilir və üçfazlı şəbəkəyə qoşulur. Üçfazlı işlədicilər simmetrik yüklərdir, buna görə də onları qidalandırmaq üçün üçməftilli şəbəkə kifayətdir.

4.21. Simmetrik yüklü üçməftilli dövrənin hesabı

Simmetrik yük halında üçfazlı dövrələrin hissələrində cərəyanların və gərginliklərin hesabını bir faz üçün icra edirlər.

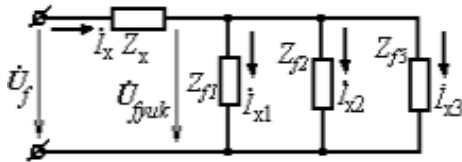
Hesablama bir enerji mənbəsi olan birfazlı dövrələrdə istifadə edilən metodlarla aparıla bilər.



Şəkil 4.41. Üçfazlı dövrəyə işlədicilərin qoşulması

Şəkil 4.41-da göstərilmiş üçfazlı dövrəyə baxaq. Üçfazlı şəbəkəyə üç ədəd simmetrik işlədicilər qrupu qoşulmuşdur. Onlardan ikisi “ulduz”, biri isə “üçbucaq” sxemi üzrə birləşmişdir. Xətt məfəllərinin də Z_x müqavimətləri nəzərə alınmışdır. Bütün sistemin və ayrı - ayrı işlədicilərin xətt cərəyanlarını ($I_x, I_{x1}, I_{x2}, I_{x3}$) tapmaq tələb olunur.

Əgər Z_{f2} müqavimətlərinin “üçbucaq” sxemindən ekvivalent “ulduz” sxeminə keçilərsə, onda verilmiş simmetrik üçfazlı dövrənin bir fəzi üçün şəkil 4.42-də göstərilmiş ekvivalent birfəzli sxemi tərtib etmək olar. Belə bir fəzli dövrəni hesablamaq çətin deyildir. Dövrənin girişində fəz gərginliyi təsir edir:



Şəkil 4.42. Ekvivalent sxemin qurulması

$$U_f = \frac{U_x}{\sqrt{3}}.$$

Fəzin ekvivalent müqavimətini təyin edirik:

$$\dot{Z}_f = \dot{Z}_x + \frac{1}{\frac{1}{Z_{f1}} + \frac{1}{Z_{f2}} + \frac{1}{Z_{f3}}} = r_f + jx_f = Z_f e^{j\varphi}.$$

Xətt cərəyanını tapırıq:

$$I_x = I_f = \frac{U_f}{Z_f}, \quad \varphi = \arctg \frac{x_f}{r_f},$$

yüklərin gərginliyi

$$\dot{U}_{f,y\ddot{b}k} = \dot{U}_f - \dot{I}_x \cdot \dot{Z}_x, \quad U_{x,y\ddot{b}k} = \sqrt{3} U_f,$$

ayrı-ayrı işlədicilər qrupunun cərəyanları:

$$\begin{aligned} I_{f1} = I_{x1} &= \frac{U_{fyuk}}{Z_{f1}}, & I_{f2} &= \frac{U_{fyuk}}{Z_{f2}}, \\ I_{x2} &= \sqrt{3} I_{f2}, & I_{f3} = I_{x3} &= \frac{U_{f,yuk}}{Z_{f3}}, \\ \varphi_1 &= \arctg \frac{X_{f1}}{r_{f1}}, & \varphi_2 &= \arctg \frac{X_{f2}}{r_{f2}}, & \varphi_3 &= \arctg \frac{X_{f3}}{r_{f3}}. \end{aligned}$$

Xəttin müqavimətində gərginlik düşgüsünü də tapmaq olar:

$$\Delta U_x = \sqrt{3} I_x Z_x.$$

4.22. Qeyri-simmetrik yüklü üsfazlı dövrənin hesabı

A. “Üçbucaq” sxemi üzrə birləşmiş qeyri-simmetrik yüklü üçfazlı dövrənin hesabı fazların cərəyanlarının Om qanununa görə hesablanmasına gətirir. Bütün normal hallarda mənbənin xətt gərginlikləri simmetrikdir; bu gərginliklərin komplekslərini belə şəkildə yazmaq lazımdır:

$$\dot{U}_{AB} = U_x, \quad \dot{U}_{BC} = U_x e^{-j120^\circ}, \quad \dot{U}_{CA} = U_x e^{j120^\circ}.$$

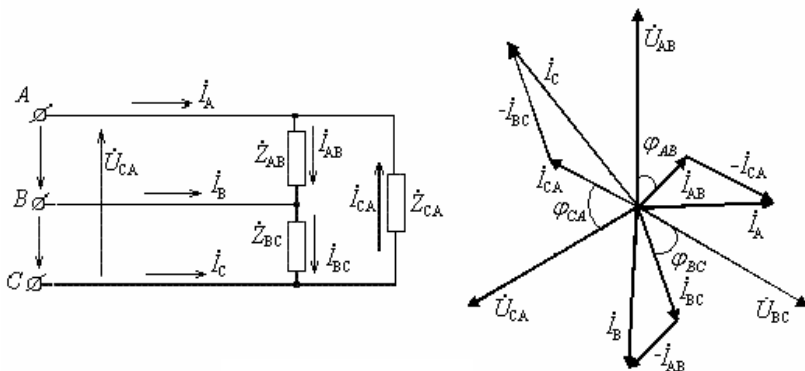
İşlədicinin faz cərəyanları (şəkil 4.43) Om qanununa görə təyin edilir:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{AB} &= \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{Z}_{AB}} = \frac{U_x}{Z_{AB} e^{j\varphi_{AB}}} = I_{AB} e^{-j\varphi_{AB}}, \\ \dot{I}_{BC} &= \frac{\dot{U}_{BC}}{\dot{Z}_{BC}} = \frac{U_x e^{-j120^\circ}}{Z_{BC} e^{j\varphi_{BC}}} = I_{BC} e^{-j(120^\circ + \varphi_{BC})}, \\ \dot{I}_{CA} &= \frac{\dot{U}_{CA}}{\dot{Z}_{CA}} = \frac{U_x e^{j120^\circ}}{Z_{CA} e^{j\varphi_{CA}}} = I_{CA} e^{j(120^\circ - \varphi_{CA})}. \end{aligned}$$

Sonra xətt cərəyanları hesablanır:

$$\dot{\mathbf{I}}_A = \dot{\mathbf{I}}_{AB} - \dot{\mathbf{I}}_{CA}, \quad \dot{\mathbf{I}}_B = \dot{\mathbf{I}}_{BC} - \dot{\mathbf{I}}_{AB}, \quad \dot{\mathbf{I}}_C = \dot{\mathbf{I}}_{CA} - \dot{\mathbf{I}}_{BC}.$$

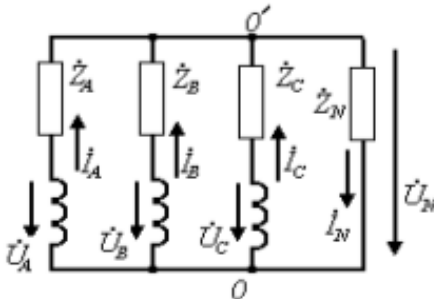
Baxılan hal üçün cərəyan və gərginliklərin vektor diaqramı şəkil 4.43,b-də göstərilmişdir



Şəkil 4.53 Qeyri simmetrik yüklü üçfazlı dövrə (a), cərəyanların və gərginliklərin vektor diaqramları (b)

“Üldüz” sxemi üzrə, sıfır məftilsiz, yaxud sıfır məftilli, birləşmiş qeyri-simmetrik yüklü üçfazlı dövrənin hesabı birfazlı mürəkkəb dövrlərin hesablama metodları ilə aparılır. İki düyün arasında gərginlik metodundan istifadə etdikdə ən sadə ifadələr alınır. Bundan ötrü üçfazlı dövrə, “ulduz” sxemi üzrə birləşmiş təsəvvür edilən enerji mənbəsi ilə təsvir edilməlidir (şəkil 4.44). Bu halda O və O' düyünləri arasında gərginlik belə düsturla hesablanır:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \dot{Y}_A + \dot{U}_B \dot{Y}_B + \dot{U}_C \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_N}.$$



Şəkil 4.44. Ulduz sxemli qeyri-simmetrik dövrə

burada $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ - təsəvvür edilən üçfazlı generatorun faz gərginlikləridir; $\dot{Y}_A \dot{Y}_B \dot{Y}_C$ - ayrı - ayrı fazların tam kompleks keçiricilikləridir; $\dot{Y}_N$ - sıfır məftilinin keçiriciliyidir.

Generatorun faz gərginlikləri simmetrik olduğu üçün verilmiş xətt gərginliklərinə görə faz gərginliklərini tapmaq olar:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= U_f, \dot{U}_B = U_f e^{-j120^\circ} = a^2 U_f = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) U_f, \\ \dot{U}_C &= U_f e^{j120^\circ} = a U_f = \\ &= \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) U_f.\end{aligned}$$

burada $U_f = U_x / \sqrt{3}$ - generatorun faz gərginliyinin moduludur; $a = e^{j120^\circ}$ - döndərici operatorudur.

Beləliklə, generatorun və yükün sıfır nöqtələri arasındakı gərginlik üçün alırıq:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{Y}_A + a^2 \dot{Y}_B + a \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_N} U_f.$$

Bu gərginliyə, çox vaxt, *neytralın yerdəyişmə gərginliyi* deyilir. İndi yükün fazlarında gərginlikləri təyin etmək olar:

$$\dot{U}_{Ayuk} = \dot{U}_A - \dot{U}_N, \quad \dot{U}_{Byuk} = \dot{U}_B - \dot{U}_N, \quad \dot{U}_{Cyuk} = \dot{U}_C - \dot{U}_N.$$

Om qanununa əsasən faz cərəyanlarını tapırıq:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_{Ayuk} \dot{Y}_A, \quad \dot{I}_B = \dot{U}_{Byuk} \dot{Y}_B, \quad \dot{I}_C = \dot{U}_{Cyuk} \dot{Y}_C.$$

Sıfır məftilinin cərəyanı:

$$\dot{I}_N = \dot{U}_N \dot{Y}_N.$$

Daha mürəkkəb qeyri-simmetrik üçfazlı sxemləri hesabladıqda onları çevirmələr yolu ilə ekvivalent “ulduz” sxeminə gətirirlər.

4.23. Üçfazlı dövrənin gücü

Üçfazlı dövrənin aktiv gücü ayrı-ayrı fazların aktiv güclərinin cəminə bərabərdir:

$$P = P_A + P_B + P_C = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA},$$

burada $P_A, P_B, P_C, P_{AB}, P_{BC}, P_{CA}$ – işlədiciləri “ulduz” və ya “üçbucaq” birləşməsinə uyğun olaraq fazların aktiv gücləridir.

Simmetrik yük zamanı fazların gücləri eyni olur, buna görə də $P = 3P_f$.

Hər bir faz üçün dəyişən cərəyanın gücünün ümumi ifadəsi doğrudur:

$$P_f = U_f I_f \cos \varphi,$$

burada φ – faz gərginliyi ilə cərəyanı arasındakı faz fərqi bucağıdır.

İşlədiciləri “ulduz” sxemi üzrə birləşdirdikdə $U_f = U_x / \sqrt{3}$, $I_f = I_x$, “üçbucaq” sxemi üzrə birləşdirdikdə isə $U_f = U_x$, $I_f = I_x / \sqrt{3}$. Buna görə də, birləşmə sxemindən asılı olmayaraq, aktiv güc xətt kəmiyyətləri vasitəsi ilə eyni cür ifadə olunur:

$$P = 3 U_f I_f \cos \varphi = \sqrt{3} U_x I_x \cos \varphi.$$

Analoji olaraq üçfazlı dövrənin reaktiv gücünün ifadəsini tapırıq:

$$Q = 3 U_f I_f \sin \varphi = \sqrt{3} U_x I_x \sin \varphi.$$

Üçfazlı dövrənin tam gücü üçün yazmaq olar:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_x I_x.$$

Güclər üçün alınmış ifadələr yalnız simmetrik dövrə üçün doğrudur. Qeyri-simmetrik üçfazlı dövrə üçün ayrı-ayrı fazların gücləri bir-birinə bərabər deyil. Buna görə də bütün dövrənin gücünü, sıfır məftilindəki yük daxil olmaqla, bütün fazların güclərini toplamaqla təyin edirlər. “Ulduz” sxemi üzrə birləşmiş sıfır məftilli üçfazlı dövrənin gücü kompleks şəkildə aşağıdakı kimi yazılır:

$$\tilde{S} = \dot{U}_{Ayuk} \tilde{I}_A + \dot{U}_{Byuk} \tilde{I}_B + \dot{U}_{Cyuk} \tilde{I}_C + \dot{U}_N \tilde{I}_N.$$

$$\tilde{I}_N = \tilde{I}_A + \tilde{I}_B + \tilde{I}_C$$

olduğu nəzərə alınsa, belə yazmaq olar:

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= (\dot{U}_{Ayuk} + \dot{U}_N) \tilde{I}_A + (\dot{U}_{Byuk} + \dot{U}_N) \tilde{I}_B + (\dot{U}_{Cyuk} + \dot{U}_N) \tilde{I}_C = \\ &= \dot{U}_A \tilde{I}_A + \dot{U}_B \tilde{I}_B + \dot{U}_C \tilde{I}_C. \end{aligned}$$

Bu ifadədə həqiqi və xəyali hissələri ayırıb aktiv, reaktiv və tam güclərin ifadələrini alırıq:

$$P = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C,$$

$$Q = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C,$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

burada $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ - generatorun (enerji mənbəsinin) müvafiq fazlarının gərginlik və cərəyanı arasında fazalar fərqidir.

“Uçbucaq” sxemi üzrə birləşmiş üçfazlı dövrənin tam gücü kompleks şəkildə aşağıdakı kimi yazılır:

$$\tilde{S} = \dot{U}_{AB} \tilde{I}_{AB} + \dot{U}_{BC} \tilde{I}_{BC} + \dot{U}_{CA} \tilde{I}_{CA}.$$

Nəzərə alınsa ki,

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B, \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A,$$

onda

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= (\dot{U}_A - \dot{U}_B) \tilde{I}_{AB} + (\dot{U}_B - \dot{U}_C) \tilde{I}_{BC} + (\dot{U}_C - \dot{U}_A) \tilde{I}_{CA} = \\ &= \dot{U}_A (\tilde{I}_{AB} - \tilde{I}_{CA}) + \dot{U}_B (\tilde{I}_{BC} - \tilde{I}_{AB}) + \dot{U}_C (\tilde{I}_{CA} - \tilde{I}_{BC}) = \\ &= \dot{U}_A \tilde{I}_A + \dot{U}_B \tilde{I}_B + \dot{U}_C \tilde{I}_C. \end{aligned}$$

Beləliklə alırıq ki, tam gücün kompleksi, generatorun faz kəmiyyətləri vasitəsilə, işlədiciyə birləşmə sxemindən asılı olmayaraq eyni cürə ifadə edilir.

4.24. Üçfazlı dəyişən cərəyan dövrəsinə aid sərbəst işlər üçün məsələlərin həlli metodikası

Məsələ 4.24.1

Şəkil 4.24.1-də göstərilmiş «ulduz» sxemi üzrə birləşmiş üçfazlı dövrədə məlum qiymətlər əsasında fazalardan və neytral məfildən keçən cərəyanları, aktiv, reaktiv, tam gücləri təyin etməli. Kompleks müstəvidə cərəyan və gərginliklərin vektor diaqramını qurmalı.

Verilir: $U_x = 220 \text{ V}$,

$R_A = 8 \text{ Om}$, $R_B = 4 \text{ Om}$,

$R_S = 6 \text{ Om}$, $x_A = 4 \text{ Om}$, $x_B = 3 \text{ Om}$, $x_S = 8 \text{ Om}$.

Həlli.

1) Fərz edək ki, faza gərginliyi $\dot{U}_A$ vektoru kompleks müstəvidə həqiqi ox üzrə istiqamətlənmişdir. Onda

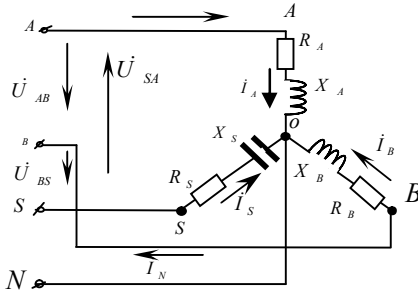
$$\dot{U}_f = \dot{U}_A = \frac{\dot{U}_x}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}; \quad \dot{U}_B = 127e^{-j120^\circ} \text{ V}; \quad \dot{U}_S = 127e^{j120^\circ} \text{ V};$$

olur.

2) Fazaların kompleks tam müqavimətlərini təyin edək:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_A &= R_A + jx_A = 8 + j4 = 8,94e^{j26,56^\circ} = 8,94(\cos 26,56^\circ + j \sin 26,56^\circ) = \\ &= 7,996 + j3,977 \text{ Om} \approx 8 + j4 \text{ Om} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_B &= R_B + jx_B = 4 + j3 = 5e^{j36,87^\circ} = 5(\cos 36,87^\circ + j \sin 36,87^\circ) = \\ &= 5 \cdot 0,8 + j5 \cdot 0,6 \text{ Om} = 4 + j3 \text{ Om} \end{aligned}$$



Şəkil 4.24.1 “Ulduz”sxemi üzrə birləşmiş üçfazlı dövrə

$$\begin{aligned} Z_S = R_S + jx_S = 6 - j8 &= 10e^{j53,13^0} = 10(\cos 53,13^0 + j \sin 53,13^0) = \\ &= 10 \cdot 0,6 - j10 \cdot 0,8 \text{ Om} = 6 - j8 \text{ Om} \end{aligned}$$

3) Faza xəttlərindən keçən cərəyanları təyin edək:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{Z_A} = \frac{127}{8,94e^{j26,56^0}} = 14,21e^{-j26,56^0} = \\ &= 14,21(\cos 26,56^0 - j \sin 26,56^0) = 12,71 - j6,35 \text{ A} \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B}{Z_B} = \frac{127e^{-j120^0}}{5e^{j36,87^0}} = 25,4e^{-j156,87^0} = \\ &= 25,4(\cos 156,87^0 - j \sin 156,87^0) = -23,36 - j9,98 \text{ A} \\ \dot{I}_S &= \frac{\dot{U}_S}{Z_S} = \frac{127e^{-j240^0}}{10e^{j53,13^0}} = 12,7e^{-j186,87^0} = \\ &= 12,7(\cos 186,87^0 - j \sin 186,87^0) = -12,61 + j1,52 \text{ A} \end{aligned}$$

və yaxud

$$\dot{I}_S = \frac{127e^{j120^0}}{10e^{-j53,13^0}} = 12,7e^{-j173,13^0}$$

4) Neytral məftildən keçən cərəyanı, Kirxhofun birinci qanununu «0» düyün nöqtəsinə tətbiq edərək hesablayaq:

$$\begin{aligned} \dot{I}_N &= \dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 12,71 - j6,35 - 23,36 - j9,98 - \\ &- 12,61 + j1,52 = -23,26 - j14,81 = 27,575e^{j32,49^0} = \\ &= 27,575(\cos 32,49^0 - j \sin 32,49^0) = -23,26 - j14,81 \text{ A} \end{aligned}$$

5) Fazaların tələb etdiyi tam, aktiv və reaktiv gücləri hesablayaq:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_A &= \dot{U}_A \dot{I}_A^* = 127 \cdot 14,21e^{j26,56^0} = 1804,67e^{j26,56^0} = \\ &= 1804,67(\cos 26,56^0 + j \sin 26,56^0) = 1614,22 + j806,98 \text{ VA} \end{aligned}$$

burada $P_A = 1614,22 \text{ Vt}$; $Q_A = 806,93 \text{ VAr}$ (induktiv xarakterli) və ya

$$P_A = R_A I_A^2 = 8(14,21)^2 = 1615,39$$

$$1614,22 \text{ Vt} \approx 1615,39 \text{ Vt}$$

$$Q_A = x_A I_A^2 = 4(14,21)^2 = 807,7$$

$$806,93 \text{ VAr} \approx 807,7 \text{ VAr}$$

$$\sim \bullet *$$

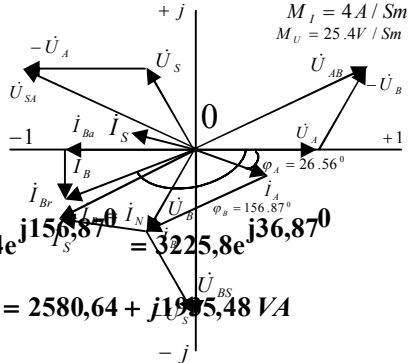
$$S_B = U_B I_B = 127e^{-j120^0} \cdot 25,4e^{j156,87^0} = 3225,8e^{j36,87^0}$$

$$= 3225,8(\cos 36,87^0 + j \sin 36,87^0) = 2580,64 + j1935,48 \text{ VA}$$

burada

$$P_B = 2580,64 \text{ Vt}, Q_B = 1935,48 \text{ VAr}$$

və ya



Şəkil 4.24.2 Hesabat əsasında alınmış qiymətlərə uyğun kompleks müstəvidə gərginlik və cərəyanların vektor diaqramı

$$P_B = R_B I_B^2 = 4(25,4)^2 = 2580,64 \text{ Vt}$$

$$2580,64 \text{ Vt} \approx 2680,64 \text{ Vt}$$

$$Q_B = x_B I_B^2 = 3(25,4)^2 = 1935,48 \text{ VAr}$$

$$1935,48 \text{ VAr} = 1935,48 \text{ VAr}$$

$$S_B = \sqrt{P_B^2 + Q_B^2} = \sqrt{(2580,64)^2 + (1935,48)^2}$$

$$= 3225,8 \text{ VA}$$

$$3225,8 \text{ VA} = 3225,8 \text{ VA}$$

$$\sim \bullet *$$

$$S_S = U_C I_C = 127e^{j120^0} \cdot 12,7e^{-j173,13^0} = 1612,9e^{-j53,13^0} =$$

$$= 1612,9(\cos 53,13^0 - j \sin 53,13^0) = 967,74 - j1290,32 \text{ VA}$$

burada $P_C = 967,74 \text{ Vt}$; $Q_C = 1290,32 \text{ VA.r}$ (mənfi işarə ilə alındığı üçün reaktiv güc tutum xarakterlidir) və ya

$$P_S = R_S I_S^2 = 6(12,7)^2 = 967,74 \text{ Vt}$$

$$967,74 \text{ Vt} = 967,74 \text{ Vt}$$

$$Q_S = x_S I_S^2 = 8(12,7)^2 = 1290,32 \text{ VAr}$$

$$1290,32 \text{ VAr} = 1290,32 \text{ VAr}$$

Miqyasla kompleks müstəvidə gərginlik və cərəyanların vektor diaqramını quraq (şəkil 4.24.2).

Məsələ 4.24.2

Şəkil 4.24.3-də göstərilmiş «üçbucaq» sxemi üzrə birləşmiş üçfazlı dövrdə məlum qiymətlər əsasında faza və xətlərdən keçən cərəyanları, aktiv, reaktiv, tam gücləri təyin etməli. Kompleks müstəvidə cərəyanlar və gərginliklər üçün vektor diaqramını qurmalı.

Verilir: $U_x = 380 \text{ Om}$, $R_{AB} = 8 \text{ Om}$, $R_{BS} = 4 \text{ Om}$, $R_{SA} = 6 \text{ Om}$, $x_{AB} = 4 \text{ Om}$, $x_{BS} = 3 \text{ Om}$, $x_{SA} = 8 \text{ Om}$.

Həlli.

1) $\dot{U}_{AB}$ xətt gərginliyinin həqiqi ox istiqamətində yönəldiyini nəzərə alaraq, onda

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_x = \dot{U}_f = 380 \text{ V}$$

$$\dot{U}_{BS} = 380e^{-j120^\circ} \text{ V}$$

$$\dot{U}_{SA} = 380e^{-j240^\circ} = 380e^{j120^\circ}$$

burada

$$\dot{U}_{AB} = 380 \text{ V}$$

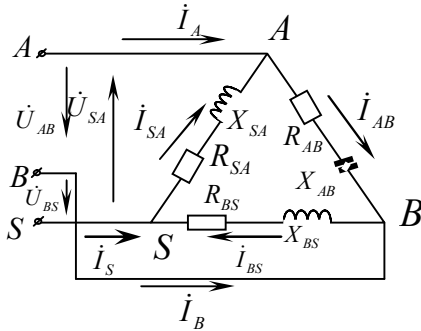
$$\dot{U}_{BS} = 380(\cos 120^\circ - j\sin 120^\circ) = -190 - j329,09 \text{ V}$$

$$\dot{U}_{SA} = 380(\cos 240^\circ - j\sin 240^\circ) = -190 + j329,09 \text{ V}$$

və ya

$$\dot{U}_{SA} = 380(\cos 120^\circ + j\sin 120^\circ) = -190 + j329,09 \text{ V}$$

2) Ayrı-ayrı fazaların kompleks tam müqavimətlərini təyin edək:



Şəkil 4.24.3. «Üçbucaq» sxemi üzrə birləşmiş üçfazlı dövrə

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{AB} &= R_{AB} - jx_{AB} = 8 - j4 = 8,94e^{-j26,56^0} = \\ &= 8,94(\cos 26,56^0 - j\sin 26,56^0) = 8 - j4 \text{ Om}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{BS} &= R_{BS} + jx_{BS} = 4 + j3 = 5e^{j36,87^0} = \\ &= 5(\cos 36,87^0 + j\sin 36,87^0) = 4 + j3 \text{ Om}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{SA} &= R_{SA} - jx_{SA} = 6 + j8 = 10e^{j53,13^0} = \\ &= 10(\cos 53,13^0 + j\sin 53,13^0) = 6 + j8 \text{ Om}\end{aligned}$$

3) «Üçbucaq» birləşmiş üçfazlı dövrədə ayrı-ayrı fazalardan keçən cərəyanları hesablayaq:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{AB} &= \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{Z}_{AB}} = \frac{380}{8,94e^{-j26,56^0}} = 42,5e^{j26,56^0} = \\ &= 42,5(\cos 26,56^0 + j\sin 26,56^0) = 38,01 + j19 \text{ A} \\ \dot{I}_{BS} &= \frac{\dot{U}_{BS}}{\dot{Z}_{BS}} = \frac{380e^{-j120^0}}{5e^{j36,87^0}} = 76e^{-j156,87^0} = \\ &= 76(\cos 156,87^0 - j\sin 156,87^0) = -69,83 - j29,85 \text{ A} \\ \dot{I}_{SA} &= \frac{\dot{U}_{SA}}{\dot{Z}_{SA}} = \frac{380e^{j120^0}}{10e^{j53,13^0}} = 38e^{j66,87^0} = \\ &= 38(\cos 66,87^0 + j\sin 66,87^0) = 14,93 + j34,9 \text{ A}\end{aligned}$$

4) Kirxhofun birinci qanununu A, B, C düyün nöq-tələrinə tətbiq edərək, xətlərdən keçən $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_S$ cərə-yanlarını hesablayaq:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_{SA} - \dot{I}_{AB} = 0$$

buradan

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{SA} = 38,01 + j19 - 14,93 - j34,94 = \\ &= 23,08 - j15,94 = 28,05e^{-j34,63^0} = \\ &= 28,05(\cos 34,63^0 - j\sin 34,63^0) = 23,08 - j15,94 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= \dot{I}_{BS} - \dot{I}_{AB} = -69,83 - j29,85 - 38,01 - j19 = -107,84 - j48,85 = \\ &= 118,39e^{j24,37^0} = 118,39(\cos 24,37^0 - j\sin 24,37^0) = 107,84 - j48,85 \text{ A} \end{aligned}$$

(mənfi işarəsini nəzərə aldıqda $\text{tg}(180^0+24,37^0)$ qəbul edilir.

$$\begin{aligned} \dot{I}_S &= \dot{I}_{SA} - \dot{I}_{BS} = 14,93 + j34,94 + 69,83 + j29,85 = \\ &= 84,76 + j64,79 = 106,69e^{j37,39^0} = \\ &= 106,69(\cos 37,39^0 + j\sin 37,39^0) = 84,77 + j64,79 \text{ A} \end{aligned}$$

5) Fazaların tələb etdiyi aktiv, reaktiv və tam gücləri hesablayaq:

$$\begin{aligned} \sim \\ S_{AB} &= \dot{U}_{AB} \dot{I}_{AB}^* = 380 \cdot 42,5e^{-j26,56^0} = 16150e^{j26,56^0} = 16150 \\ &(\cos 26,56^0 - j\sin 26,56^0) = 14445,64 - j7221,23 \text{ VA} \end{aligned}$$

burada $P_{AB} = 14445,64 \text{ Vt}$; $Q_A = 7221,23 \text{ VA}$.r (mənfi işarəsi reaktiv gücün tutum xarakterli olduğunu göstərir)

$$\begin{aligned} \sim \\ S_{BS} &= \dot{U}_{BS} \dot{I}_{BS}^* = 380e^{-j120^0} \cdot 76e^{j156,87^0} = 28880e^{j36,87^0} = \\ &= 28880(\cos 36,87^0 + j\sin 36,87^0) = 23103,97 + j17328,03 \text{ VA} \end{aligned}$$

burada $P_{BS} = 23103,97 \text{ Vt}$; $Q_{BS} = 17328,03 \text{ VA}$.r (müsbət işarəsi reaktiv gücün induktiv xarakterli olduğunu göstərir).

Yoxlama:

$$\begin{aligned} P_{BS} &= R_{BS} I_{BS}^2 = 4(76)^2 = 23104 \text{ Vt} \\ 23103,97 \text{ Vt} &\approx 23104 \text{ Vt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{BS} &= x_{BS} I_{BS}^2 = 3(76)^2 = 17328 \text{ VAr} \\ 17328,03 \text{ VAr} &\approx 17328 \text{ VAr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{SA} &= U_{SA} \cdot I_{SA}^* = 380e^{j120^0} \cdot 38e^{-j66,87^0} = 14440e^{j53,13^0} = \\ &= 14440(\cos 53,13^0 + j \sin 53,13^0) = (8664,03 Vt + j11522 VAr) VA \end{aligned}$$

Burada

$$P_{SA} = 8664,03 \text{ Vt}; Q_{SA} = 11552 \text{ VAr}$$

və ya

$$\begin{aligned} P_{SA} &= R_{SA} I_{SA}^2 = 6(38)^2 = 8664 \text{ Vt} \\ 8664,03 \text{ Vt} &\approx 8664 \text{ Vt} \\ Q_{SA} &= x_{SA} I_{SA}^2 = 8(38)^2 = 11552 \text{ VAr} \\ 11552 \text{ VAr} &= 11552 \text{ VAr} \end{aligned}$$

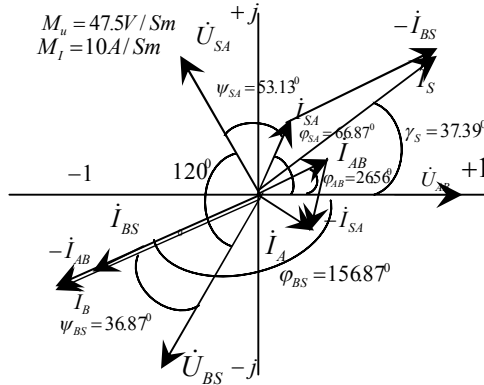
6) Ayrı-ayrı fazaların tələb etdiyi aktiv və reaktiv gücləri nəzərə alıb, işlədiciyə «üçbucaq» birləşdirilmiş üçfazlı sistemin tələb etdiyi tam gücü hesablanır. Sistem qeyri-simmetrik olduğu üçün ümumi aktiv və reaktiv güclər, fazaların tələb etdiyi güclər vasitəsi ilə təyin edilir:

$$\begin{aligned} P_{\text{üm}} &= P_{AB} + P_{BC} + P_{CA} = 14445,64 + 23103,97 + \\ &+ 8664,03 = 46213,64 \text{ Vt} \approx 46,214 \text{ K Vt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{üm}} &= (Q_{BS} + Q_{SA}) - Q_{AB} = (17328,03 + 11552) - \\ &- 7221,23 = 28880,03 - 7221,23 = 21658,80 \text{ VAr} = \\ &= 21.659 \text{ kVAr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{\text{üm}} &= \sqrt{P_{\text{üm}}^2 + Q_{\text{üm}}^2} = \sqrt{(46,214)^2 + (21,659)^2} = \\ &= \sqrt{2135,7337 + 469,1123} = \sqrt{2604,8460} = \\ &= 51,03769 \text{ kVA} = 51037,69 \text{ VA} \end{aligned}$$

7) Hesabat əsasında alınmış qiymətlərə uyğun miqyasla kompleks müstəvidə gərginliklər və cərəyanlar üçün vektor diaqramını quraq (şəkil 4.24.4).



Şəkil 4.24.4. Hesabat əsasında alınmış qiymətlərə uyğun miqiyasla kompleks müstəvidə gərginliklər və cərəyanlar üçün vektor diaqramı

4.25. Üçfazlı dəyişən cərəyan elektrik dövrələrinə aid sərbəst işlər

1. Generator dolaqlarının ulduz və ya üçbucaq sxemi ilə birləşdirilməsinin mümkünlüyü nədən irəli gəlir?

2. Faza nə deməkdir?

3. Hansı hallarda təcrübədə üçməftilli və dörd məftilli üçfazlı cərəyanlar sistemindən istifadə edirlər? Misal göstərməli?

4. Üç eyni müqavimətli işlədicilərin ulduz birləşməsindən üçbucaq birləşməsinə keçdikdə faza və xətt cərəyanları necə dəyişirlər?

5. Üçfazlı cərəyanlar sisteminin tarazlaşmış sistem olduğunu isbat edin.

6. Üçfazlı yükün tələb etdiyi aktiv güc $P=290$ Vt, güc əmsalı $\cos\varphi=0,6$ şəbəkənin xətt gərginliyi $U=220$ V. Yükün ulduz birləşdiyi məlumdursa cərəyanları və yükün faza müqavimətlərini tapamalı

7. Simmetrik üçfazlı dövrədə $A=6+j8$ Om qiymətli üç müqavimət üçbucaq sxem ilə qoşulmuşdur. Qidalandırıcı şəbəkənin xətt gərginliyi 220 V-dur. Faza və xətt cərəyanlarını, yükün aktiv və reaktiv güclərini tapmalı

8. Simmetrik üçfazlı sistemin faza ardıcılığını təyin etmək üçün faza göstəricisindən istifadə edilir. Ən sadə faza göstəricisi müqavimətləri eyni olan iki közərmə lampasından və bir kondensatordan ibarətdir: $r_1=r_2=x_c=r$. Bu üç müqavimət şəbəkəyə ulduz sxemi ilə qoşulur. Belə quruluşa faza ardıcılığını təyin edilməsinin mümkünlüyünü isbat etməli. Hesablamanı əvvəlcə ümumi şəkildə, sonra isə $r=484$ Om, $U_x=220$ V ədədi qiymətləri üçün aparmalı.

9. Xətt gərginliyi 220V olan şəbəkəyə ulduz sxemi ilə üç qrup közərmə lampası qoşulmuşdur. Hər lampanın müqaviməti 161 Om-dur. A fazasına 120, B fazasına 75 və C fazasına 100 lampə birləşdirilmişdir. Sıfır məftil müqavimətinin iki halı: 1) $r_N=10\text{Om}$; 2) $r_N=0,25\text{ Om}$ üçün lampalardakı gərginlikləri və neytralin yerdəyişmə gərginliyini tapmalı. Xətt məftillərinin müqavimətlərini nəzərə alınmır.

10. Sıfır məftilinin üçfazlı ümumi şəbəkəyə belə işlədicilər qoşulmuşdur: 1) dolaqları üçbucaq birləşdirilmiş, ümumi gücü $P=150\text{ kVt}$ və güc əmsalı $\cos\varphi=0,6$ olan mühərriklər; 2) dörd məftili ulduz semi ilə, parametrləri $P_A=20\text{ kVt}$, $P_B=15\text{ kVt}$, $P_C=10\text{ kVt}$, $\cos\varphi''=1$ olan üç ədəd birfazlı elektrik peçisi; 3) üçbucaq sxemi ilə $Q_C=60\text{ kVar}$ güclü kondensator batareyası xətt gərginliyi 380 V-dur. Cərəyanları tapmalı

4.26. Qeyri-sinusoidal dəyişən cərəyan elektrik dövrləri

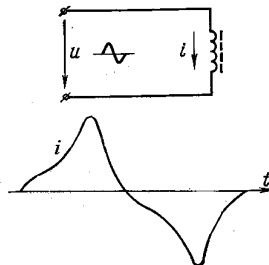
Qeyri-sinusoidal e.h.q.-nin və cərəyanın yaranma səbəbləri. Əvvəlki fəsillərdə sinusoidal cərəyan dövrlərini öyrəndik. Lakin çox vaxt elə hallara rast gəlmək olur ki, elektrik dövrlərində qeyri-sinusoidal periodik dəyişən cərəyan və gərginliklər yaranır. Bu hadisələrin əsas səbəblərini göstərək.

Sinusoidal gərginlik tətbiq edilmiş dövrdə qeyri-sinusoidal cərəyanın yaranmasına səbəb dövrdə qeyri-xətti elementlərin olmasıdır.

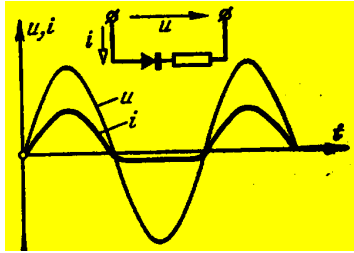
Səkil 4.45-də sinusoidal gərginlik tətbiq edilmiş polad nüvəli sarğac və onun cərəyanının əyrisi göstərilmişdir. Cərəyanın əyrisinin sinusoiddən fərqlənməsi düzləndirici elementləri olan dövrlərdə özünü daha aşkar göstərir (şəkil 4.46).

Məlumdur ki, düzləndirici cərəyanı bir istiqamətdə buraxır.

Xətti elektrik dövrlərində, tətbiq edilmiş gərginlik qeyri-sinusoidalırsa, qeyri-sinusoidal cərəyanlar yaranır.



Şəkil 4.45. Polad nüvəli dövrə və onun cərəyanı



Şəkil 4.46. Düzləndiricili dövradə qeyri-sinusoidal cərəyan

Qeyri-sinusoidal kəmiyyətin triqonometrik sıraya ayrılması. Furiye teoreminə görə zamanın hər hansı periodik $F(\omega t)$ funksiyasını ümumi halda sabit toplanan A_0 və artan tezlikli sinusoidal funksiyaların cəmi kimi göstərmək olar:

$$F(\omega t) = A_0 + A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + \\ + A_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + A_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots$$

Tezliyi tədqiq olunan kəmiyyətin tezliyinə ω bərabər olan $A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$ sinusoidinə əsas harmonika deyilir. Yerdə qalan sinusoidlər ikinci, üçüncü, ..., k -cı tərtibli və yaxud **yüksək harmonikalar** adlanır.

Elektrik dövrlərini analiz etdikdə çox vaxt elə qeyri-sinusoidal kəmiyyətlərə rast gəlinir ki, onların harmonikalarının başlanğıc fazaları $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots$ sıfırdır. Onda

$$F(\omega t) = A_0 + A_{1m} \sin \omega t + A_{2m} \sin 2\omega t + \dots$$

Bəzi hallarda sabit toplanan sıfır olur. Məsələn, polad nüvəli sarğac cərəyanının sırası yalnız tək harmonikaları cəmləyir:

$$F(\omega t) = A_{1m} \sin \omega t + A_{3m} \sin 3\omega t + \dots$$

4.27. Qeyri-sinusoidal kəmiyyətin təsiredici və orta qiymətləri

Qeyri-sinusoidal kəmiyyətin orta kvadratik qiymətinə onun təsiredici qiyməti deyilir:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

Cərəyanı harmonik sıraya ayırısaq, alırıq:

$$i = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots$$

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots]^2 dt.$$

Inteqrallanma nəticəsində alırıq:

$$I^2 = I_0^2 + \frac{I_{1m}^2}{2} + \frac{I_{2m}^2}{2} + \dots = I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}$$

Analoji olaraq gərginlik və e.h.q üçün

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots}, \quad E = \sqrt{E_0^2 + E_1^2 + E_2^2 + \dots}$$

Bəzi qeyri-sinusoidal kəmiyyətin mütləq ölçüdə götürülmüş orta qiymətini bilmək lazım gəlir.

$u=f(t)$ gərginlik əyrisi üçün otra qiymət

$$U_{or} = \frac{1}{T} \int_0^T |u| dt$$

$F(\omega t)$ periodik funksiyasının sinusoiddən fərqlənmə dərəcəsini forma əmsalı (K_f) və amplituda əmsalı (K_a) ilə qiymətləndirilir.

Təsiredici qiymətin otra qiymətə olan nisbəti

$$K_f = \frac{U}{U_{or}}$$

forma əmsalı, maksimal qiymətin təsiredici qiymətə olan nisbəti

$$K_a = \frac{U_{\max}}{U}$$

isə *amplituda əmsalı* adlanır.

Əyrilər nə qədər dikdirsə, K_f və K_a bir o qədər böyük olur. Yadıma salaq ki, sinusoid üçün $K_f = 1,11$ və $K_a = \sqrt{2}$.

Qeyri-sinusoidal cərəyanın gücü. Sinusoidal cərəyanda olduğu kimi qeyri-sinusoidal cərəyanın aktiv gücü period ərzində gücün orta qiymətinə deyilir:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i dt$$

Əgər gərginlik və cərəyanın Furye sıraları verilmişsə, onda integrallama nəticəsində alarıq:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_k I_k \cos \varphi_k$$

Analizi və hesabatı asanlaşdırmaq üçün bir çox hallarda qeyri-sinusoidal gərginlik və cərəyanı ekvivalent sinusoidlərlə əvəz edirlər. Əvəzləməni elə etmək lazımdır ki, əvəz edilən qeyri-sinusoidal kəmiyyətin təsiredici qiyməti ekvivalent sinusoidin təsiredici qiymətinə bərabər olsun. Bu

halda $\dot{U}$ və $\dot{I}$ vektorları φ bucağı qədər faza fərqinə malik olmalıdır, belə ki, $P = UI \cos \varphi$ düsturu ilə hesablanmış güc dövrünün tələb etdiyi həqiqi aktiv gücə bərabər olsun. Bu zaman $\cos \varphi$ yalnız hesabat kəmiyyəti olur.

4.28. Qeyri-sinusoidal cərəyan dövrlərinin analizi və hesabi

Qeyri-sinusoidal gərginlik tətbiq edilmiş xətti dövrlərin hesabi. Belə dövrləri hesab etmək üçün superpozisiya metodundan istifadə edib, cərəyanı i , gərginlik harmonikalarının ayrılıqda yaratdıqları qismi cərəyanların cəmi kimi göstəririlər.

Tutaq ki, ardıcıl birləşmiş müqavimət r , induktivlik L və tutumdan C ibarət dövrəyə

$$u = U_0 + U_{1m} \sin \omega t + U_{3m} \sin 3\omega t$$

qeyri-sinusoidal gərginlik tətbiq edilmişdir.

Baxdığımız dövrədə kondensator olduğu üçün gərginliyin sabit toplananı U_0 cərəyan yaratmayacaqdır. Sinusoidal toplananlar isə cərəyan yaradacaqlar.

Birinci harmonika

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1)$$

$$I_{1m} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}, \quad \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}$$

Üçüncü harmonika

$$i_3 = I_{3m} \sin(3\omega t + \varphi_3)$$

$$I_{3m} = \frac{U_{3m}}{\sqrt{r^2 + \left(3\omega L - \frac{1}{3\omega C} \right)^2}}, \quad \operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{3\omega L - \frac{1}{3\omega C}}{r}$$

Reaktiv müqavimətləri hesabladıqda induktiv müqavimətin tezliklə düz, tutum müqavimətinin isə tərs mütənasib olduğunu yadda saxlamaq lazımdır.

Dövrədə həqiqi cərəyan, superpozisiya metoduna görə belə olar: $i = i_1 + i_3$.

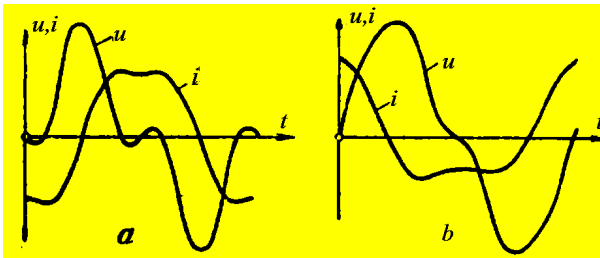
L və C elementlərinin cərəyan əyrisinin formasına təsiri. Yalnız aktiv müqavimətə malik dövrədə bütün harmonikalar üçün tam müqavimət eynidir və cərəyan əyrisi $i(t)$ gərginlik əyrisinə $u(t)$ oxşar olur.

Dövrə yalnız induktivliyə malikdirsə, dövrənin induktiv müqaviməti harmonikanın tərtibinə mütənasib olaraq artır ($x_L = k\omega L$). Ona görə cərəyan əyrisində yüksək harmonikalar tez zəiflənir və cərəyan əyrisi gərginliyə nisbətən sinusoidə daha yaxın olur (şəkil 4.47).

Yalnız tutuma (C) malik dövrədə dövrənin tutum müqaviməti harmonikanın tərtibinə mütənasib olaraq azalır

$$\left(X_c = \frac{1}{k\omega C} \right). \text{ Buradan dövrənin yüksək harmonikanın}$$

kiçik müqavimət göstərdiyini və yüksək harmonikanın cərəyan əyrisində daha aydın seçildiyini görürük. Ona görə cərəyan əyrisi gərginliyə nisbətən sinusoiddən daha çox fərqlənir (şəkil 4.47).



Şəkil 4.47. L və C parametrlinin cərəyan əyrisinin formasına təsiri: a- induktivlikli dövrədə; b- tutumlu dövrədə.

Rezonans hadisələri. Budaqlanmayan qeyri-sinusoidal cərəyan dövrəsində aktiv müqavimətdən əlavə induktivlik və tutum da varsa, L və C parametrlərinin elə qiymətləri ola bilər ki, bu zaman $\left(k\omega L = \frac{1}{k\omega C} \right)$ olar. Bu

halda k -cı harmonika üçün gərginliklər rezonansı baş verər və bu harmonikanın cərəyanı çox böyük qiymət ala bilər. İnduktivlik və tutumda gərginliklər çox böyük, hətta tətbiq edilmiş gərginlikdən də çox ola bilər.

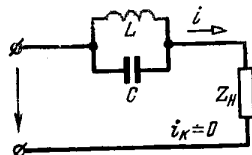
İnduktivlikli və tutumlu budaqları paralel birləşdirdikdə bu budaqların reaktiv keçiricilikləri hər hansı

harmonika üçün bir-birinə bərabər ola bilər. Bu halda dövrədə həmin harmonika üçün cərəyanlar rezonansı yaranar.

Elektrik süzgəcləri haqqında anlayış. İnduktivlik və tutumun cərəyan ayrısı formasına təsir göstərməsi onlardan elektrik süzgəclərində istifadə etməyə imkan vermişdir. Elektrik süzgəci, mənbə gərginliyi ayrısının verilmiş formada işlədiciyə cərəyan ayrısını dəyişmək lazım gəldikdə, mənbə ilə işlədici arasına qoşulur.

Tutaq ki, mənbənin gərginlik ayrısı k -cı harmonikaya malikdir və cərəyan ayrısında bu harmonikanın olması lazım deyildir. Bu məqsədə nail olmaq üçün mənbə ilə yük arasına L və C konturundan ibarət süzgəc qoşuruq (şəkil 4.48).

Konturu k -cı harmonika üçün rezonansa köklədikdə onun bu harmonikaya görə keçiricilik sıfıra bərabər olur (aktiv keçiricilik nəzərə alınmır). Belə süzgəc k -cı harmonikanı işlədiciyə buraxmır. Bu süzgəcdən əlavə elektrotexnika-da başqa süzgəclərdən, məsələn, düzləndirici sxemlərində hamarlayıcı süzgəclərdən də istifadə olunur.



Şəkil 4.48. Sadə elektrik süzgəcinin sxemi

4.29. Qeyri-sinusoidal dəyişən cərəyan dövrlərinə aid sərbəst işlər üçün məsələ həlli metodikası

Məsələ 4.29.1.

Aktiv müqavimətdən, induktivlikdən və tutumdan ibarət ardıcıl dövrənin girişinə

$$u=141\sin\omega t+70,5\sin(3\omega t+30^\circ) \text{ V}$$

qeyri-sinusoidal gərginlik tətbiq edilmişdir. Gərginlik və cərəyanın təsiredici qiymətlərini, dövrənin gücünü və $\cos\varphi$ -sini təyin etməli. Dövrənin parametrləri birinci harmonika üçün verilmişdir: $r=8 \text{ Om}$, $x_{L1}=30 \text{ Om}$, $x_{C1}=9 \text{ Om}$.

Həlli.

3ω tezliyi üçün reaktiv müqavimətlərini tapırıq:

$$x_{L3} = 3x_{L1} = 3 \cdot 3 = 9 \text{ Om}$$

$$x_{C3} = \frac{1}{3\omega C} = \frac{x_{C1}}{3} = \frac{9}{3} = 3 \text{ Om}$$

Hər bir harmonika üçün tam müqavimətlərin modulu:

$$z_1 = \sqrt{r^2 + (x_{L1} - x_{C1})^2} = \sqrt{8^2 + (9 - 3)^2} = 10 \text{ Om}$$

$$z_2 = \sqrt{r^2 + (x_{L3} - x_{C3})^2} = \sqrt{8^2 + (3 - 9)^2} = 10 \text{ Om}$$

Cərəyanın harmonikalarının amplituda qiymətləri:

$$I_{1m} = \frac{U_{1m}}{z_1} = \frac{141}{10} = 14,1 \text{ A}, \quad I_{3m} = \frac{U_{3m}}{z_3} = \frac{70,5}{10} = 7,05 \text{ A}$$

Cərəyan və gərginliyin təsiredici qiymətləri:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_3^2} = \sqrt{\left(\frac{141}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{70,5}{\sqrt{2}}\right)^2} = 111,6 \text{ V}$$

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{\left(\frac{141}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{7,05}{\sqrt{2}}\right)^2} = 11,16 \text{ V}$$

Dövrənin aktiv gücü və $\cos\varphi$ -ci:

$$P = U_1 I_1 \cos\varphi_1 + U_3 I_3 \cos\varphi_3 = \\ = \frac{141}{\sqrt{2}} \cdot \frac{14,1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{8}{10} + \frac{70,5}{\sqrt{2}} \cdot \frac{7,05}{\sqrt{2}} \cdot \frac{8}{10} = 1000 \text{ Vt}$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI} = \frac{1000}{111,6 \cdot 11,16} = 0,8$$

4.30. Qeyri-sinusoidal dəyişən cərəyan dövrlərinə aid sərbəst işlər

1. Girişinə qeyri-sinusoidal gərginlik tətbiq edilmiş xətti elektrik dövrlərinin hesablanma ardıcılığını izah edin.

2. Qeyri-sinusoidal kəmiyyətin təsiredici qiyməti onun harmonikalarının tezliyindən asılıdır mı?

3. Tərkibində r , L , C elementləri daxil olan və qeyri-sinusoidal gərginliyə qoşulmuş dövrədə rezonans hadisələrinin mahiyyətini izah edin.

4. Ardıcıl birləşmiş $r = 10$ Om müqavimətindən və $C = 96,5$ μF tutumlu kondensatordan ibarət dövrə

$$u = 141 \sin(\omega t - 43^\circ) + 31 \sin(3\omega t + 12^\circ) \text{ V}$$

gərginliyinə qoşulmuşdur. Cərəyanın ani qiymətinin ifadəsini yazmalı. Gərginlik və cərəyanın təsiredici qiymətlərini və aktiv gücü təyin etməli.

5. Qeyri-sinusoidal cərəyan dövrəsi üçün şərti $\cos\phi$ kəmiyyətinin mahiyyətinin aydınlaşdırılması.

5-ci fəsil

XƏTTİ ELEKTRİK DÖVRƏLƏRİNDƏ KEÇİD PROSESLƏRİ

5.1. Ümumi anlayışlar

Elektrik dövrlərinin bir iş rejimindən (adətən, periodik) digər iş rejiminə (yenə də periodik) keçməsi prosesinə *keçid prosesi* deyilir. Bu iki iş rejimi bir-birindən müxtəlif cür fərqlənə bilər, məsələn, sxemdə təsir edən e.h.q. amplitudasının qiyməti, fazası, forması və ya tezliyi, sxemin parametrlərinin qiyməti və eləcə də dövrənin konfigurasiyası ilə.

Periodik rejimə, adətən, sinusoidal cərəyan rejimi, sabit cərəyan rejimi və dövrənin budaqlarında cərəyanın olması rejimi aiddir. Bu rejimlərin analizi və hesabı ilə əvvəlki fəsilərdə tanış olmuşuq.

Keçid prosesinin yaranmasına səbəb olan hadisələrə elektrik dövrlərində *kommütasiya* deyilir. Elektrik dövrlərində keçid prosesləri çox tez gedən proseslərdir; bu proseslərin getmə müddəti saniyənin hissələri ilə ölçülür.

Kommütasiya qanunları. İnduktivlikdə cərəyanın i_L və tutumda gərginliyin u_c sıçrayışla dəyişə bilməsi komutasiya qanunlarının mahiyyətini təşkil edir. Bunu enerji nöqtəyindən nəzərdən isbat edək.

Dövrənin hər bir vəziyyətinə (L və C -yə malik dövrə)

maqnit sahəsində $W_M = \frac{Li_L^2}{2}$ və elektrik sahəsində

$W_C = \frac{Cu_c^2}{2}$ toplanmış müəyyən enerji ehtiyatları uyğun gəlir.

Enerjinin sonlu miqdarda dəyişməsi üçün müəyyən müddət

lazımdır. Enerjinin qəflətən sıçrayışla artması mənbənin sonsuz gücə malik olması deməkdir:

$$P = \frac{dw}{dt} = \infty$$

Bu isə fiziki mənası olmayan bir haldır. Bununlada aşağıda ifadələri verilmiş kommutasiya qanunlarının isbatını aldıq.

İnduktivlikdə cərəyanın sıçrayışla dəyişə bilməsi və keçid prosesinin başlanğıc anında ($t=0$) əvvəlki qiymətini saxlaması prinsipinə ***kommutasiyanın birinci qanunu*** deyilir. Tutumda gərginliyin sıçrayışla dəyişə bilməsi və keçid prosesinin başlanğıcında ($t=0$) əvvəlki qiymətini saxlaması prinsipinə ***kommutasiyanın ikinci qanunu*** deyilir.

Keçid prosesləri analizinin ümumi prinsipləri. Elektrik dövrlərində keçid proseslərinin riyazi analizi Kırxhof qanunlarının bütün rejimlərə tətbiq olunmasının mümkünlüyünə əsaslanmışdır. Kırxof qanunlarından istifadə edib keçid prosesi üçün xətti diferensial tənliklər sistemi alırlar. Həmin tənlikləri bir yerdə həll edib cərəyanların və gərginliklərin ifadələrini təyin edirlər. İnteqrallama sabitlərini kommutasiya qanunlarına əsaslanmış sərhəd şərtlərindən təyin edirlər.

Məlum olduğu kimi sağtərəfli xətti diferensial tənliyin inteqralı verilmiş tənliyin xüsusi həlli ilə uyğun sağ tərəfsiz (bircinsli) tənliyin ümumi həllinin cəminə bərabərdir. Xüsusi həll keçid prosesinin qurtardığı zaman anı (nəzəri olaraq $t=\infty$) üçün götürülür. Bu zaman qərarlaşmış rejim yaranır, cərəyan və gərginliklər dövrəyə təsir edən mənbələrin gərginliyindən asılı olur. Ona görə bu cərəyan və gərginliklərə məcburi cərəyan və gərginliklər deyilir ($i_{m\acute{e}c}$, $u_{m\acute{e}c}$).

Sağ tərəfsiz diferensial tənliyin ümumi həlli maqnit və elektrik sahələrinin dəyişməsi nəticəsində dövrənin hissələrində yaranan cərəyan və gərginlikləri təyin etməyə imkan verir. Bu zaman mənbələrin təsiri nəzərə alınmır. Bu cərəyan və gərginliklər sərbəst cərəyan və gərginlik adlanır ($i_{s\acute{a}r}$, $u_{s\acute{a}r}$).

Cərəyan və gərginliklərin keçid prosesi zamanı həqiqi qiymətlərini tapmaq üçün sərbəst və məcburu toplananlarını cəbri toplayırlar:

$$i=i_{m\acute{a}c}+i_{s\acute{a}r}, \quad u=u_{m\acute{a}c}+u_{s\acute{a}r} \quad (5.1)$$

5.2. Tutumlu sadə dövrələrdə keçid prosesləri

rC dövrəsinin sabit gərginliyə qoşulması. Şəkil 5.1-də göstərilmiş dövrəyə Kirxhofun ikinci qanununu tətbiq etsək, alarıq:

$$ir + u_c = U \quad (5.2)$$

$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}$ olduğunu nəzərə alsaq, tənlik belə şəkllə düşər:

$$ir \frac{du_c}{dt} + u_c = U \quad (5.3)$$

Bu xətti sağtərəfli diferensial tənliyin xüsusi həlli $t = \infty$ anı üçün (yəni kondensatorun dolub qurtardığı qərarlaşmış rejim üçün) olaçaqdır:

$$u_{c(t=\infty)} = u_{c\text{m}ec} = U \quad (5.4)$$

Sağ tərəfsiz tənlikdə sərbəst gərginlik yazılmalıdır:

$$rC \frac{du_{C.\text{ser}}}{dt} + U_{C.\text{ser}} = 0 \quad (5.5)$$

Tənliyin ümumi həlli belədir:

$$u_{C\text{ser}} = Ae^{pt} \quad (5.6)$$

A integrallama sabitinin sərhəd şərtlərindən $u_{c(t=0)}=0$ (komutasiyanın ikinci qanunu) təyin edirik:

$$\mathbf{u}_{C(t=0)} = (\mathbf{u}_{Cmec} + \mathbf{u}_{Cser})_{(t=0)} = 0$$

buradan

$$\mathbf{u}_{C(t=0)} = -\mathbf{u}_{Cmec} = -U$$

(5.6) ifadəsində $t=0$ yazmaqla alarıq

$$U_{Cser(t=0)} - U = A e^{p \cdot 0} = A$$

P kəmiyyəti $p r C + 1 = 0$ xarakteristika tənliyindən təyin edirik:

$$p = -\frac{1}{rC} \quad (5.7)$$

Beləliklə,

$$\mathbf{u}_{Cser} = U e^{-\frac{t}{rC}} = U e^{-\frac{t}{\Phi}}$$

Keçid prosesinin axma sürəti

$$\Phi = rC = -\frac{1}{p} \quad (5.8)$$

kəmiyyəti ilə təyin edilir. Bu kəmiyyət zaman ölçüsünə malikdir (san) və dövrənin *zaman sabiti* adlanır. Dolma prosesi zamanı kondensatorun gərginliyi belə ifadə olunacaq:

$$\mathbf{u}_C = \mathbf{u}_{Cmec} + \mathbf{u}_C = U \left(1 - e^{-\frac{t}{\Phi}} \right)$$

Cərəyanın ifadəsi

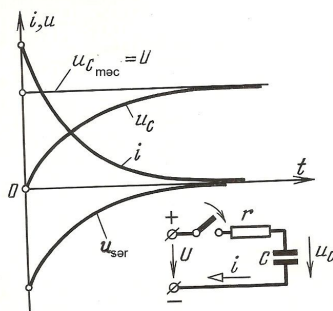
$$\mathbf{i} = C \frac{d\mathbf{u}_C}{dt} = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{\Phi}} \quad (5.10)$$

Şəkil 5.1-də $u_{cm\acute{a}c}(t)$, $u_{Cs\acute{o}r}(t)$, $u_C(t)$ və $i(t)$ ayrılırları göstərilmişdir.

Keçid prosesi nəzəri olaraq sonsuz zaman davam edir. Təcrübədə isə cərəyan öz qərarlaşmış qiymətinin 99%-ni aldıqda, keçid prosesinin qurtardığı qəbul edilir. Bu $t \approx 4,6 \phi$ olduqda baş verir.

Kondensatorun müqavimətə boşalması. Əgər U gərginliyinə qədər dolmuş

kondensatoru müqavimətə qoşsaq (şəkil 5.2), kondensatorun boşalma prosesi başlayacaqdır. Bu zaman dövrənin elektrik müvazinət tənliyi belə şəkildə olar:



Şəkil 5.1. Tutumlu dövrənin sabit gərginliyə qoşulması

$$ir+u_C=0 \quad (5.11)$$

$$i = C \frac{du_c}{dt} \text{ нәзәрә аһһақ}$$

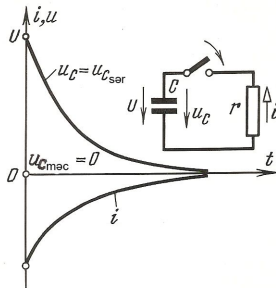
$$\mathbf{rC} \frac{d\mathbf{u}_c}{dt} + \mathbf{u}_c = \mathbf{0} \quad (5.12)$$

Boşalma prosesinin sonunda kondensatorun gərginliyi sıfır olacaq. Ona görə $u_{Cm\acute{a}c}=0$ və $u_{Cs\grave{a}r}=u_C$ yazmaq olar. Bu halda tənliyin həlli belə ifadə olunur:

$$\mathbf{u}_C = \mathbf{u}_{C_{\text{sar}}} = \mathbf{A} \mathbf{e}^{\text{pt}}$$

A-nın qiymətini başlanğıc şərtədən təyin edirik.

$$\mathbf{u}_{C(t=0)} = \mathbf{A} \mathbf{e}^{p-0} = \mathbf{A} = \mathbf{U}$$



Şəkil 5.2. Kondensatorun r müqavimətinə qoşulması

p-nin qiymətini xarakteristika tənliyindən tapırıq:

$$p = -\frac{1}{rC}$$

Beləliklə,

$$u_C = u_{C_{ser}} = Ue^{-\frac{t}{rC}} = -Ue^{-\frac{t}{\Phi}} \quad (5.14)$$

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{\Phi}} \quad (5.15)$$

u_c və i –nin dəyişmə əyriləri şəkil 5.2-də göstərilmişdir.

5.3. İnduktivli sadə dövrələrdə keçid prosesləri

rL dövrəsinin sabit gərginliyə qoşulması. Belə dövrə üçün (şəkil 5.3) yazmaq olar ki,

$$L \frac{di}{dt} + ir = U \quad (5.16)$$

Məcburi cərəyanı dövrənin qərarlaşmış rejimi üçün ($t = \infty$) təyin edirik. Sabit cərəyan dövrəsi olduğu üçün məcburi cərəyan sabit və bərabərdir:

$$i_{m\acute{a}c} = \frac{U}{r},$$

çünki

$$L = \frac{di_{mac}}{dt} = 0$$

Sağ tərəfsiz diferensial tənliyin həlli sərbəst cərəyanı verəcəkdir. Bu tənliyin ifadəsi belədir.

$$L \frac{di_{sar}}{dt} + i_{sar} \cdot r = 0 \quad (5.17)$$

Tənliyin həlli bildiyimiz kimi

$$i_{sar} A e^{pt} \quad (5.18)$$

olar.

İnteqrallama sabitini A , başlanğıc şərtindən $i_{(t=0)}=0$ (komutasiyanın birinci qanunu) təyin edirik:

$$i_{(t=0)} = (i_{mer} + i_{ser})_{(t=0)} = 0$$

buradan

$$i_{ser(t=0)} = -i_{mer(t=0)} = -\frac{U}{p}$$

Beləliklə, (5.18) $t=0$ anı üçün yazıb bilirik.

$$i_{ser(t=0)} = -\frac{U}{r} = A e^{p \cdot 0} = A$$

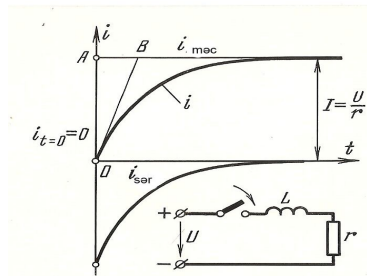
p -nin qiymətini xarakterik tənliyindən $pL+r=0$ təyindir.

$$p = -\frac{r}{L} \quad (5.19)$$

Sərbəst cərəyan

$$i_{ser} = -\frac{U}{r} e^{-\frac{r}{L}t} = -\frac{U}{r} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.20)$$

Dövrədə həqiqi cərəyan



Şəkil 5.3. Sərgəcin sabit gərginliyə qoşulması

$$i = i_{mec} + i_{ser} = \frac{U}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (5.21)$$

$\Phi = \frac{L}{r}$ - induktivlikli dövrənin zaman sabitidir.

Şəkil 5.3-də dövrənin məcburi, sərbəst və həqiqi cərəyanlarının ayrılırları göstərilmişdir.

Dövrənin rL hissəsinin qısa qapanması. Tutaq ki, şəkil 5.4,a-da verilmiş dövrədə P açarının açıq vəziyyətində qərarlaşmış rejim yaranmışdır. Bu zaman dövrədən axan

cərəyan belə ifadə olunur: $I_1 = \frac{U}{r_1 + r_2}$. Açarın vurulduğu anda

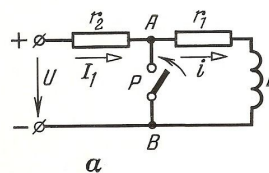
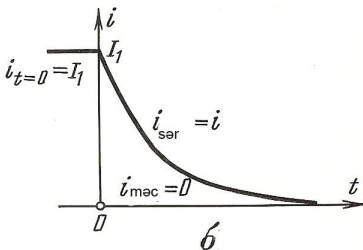
($t=0$) dövrənin AB hissəsində gərginlik sıfır olur. Maqnit sahəsində enerji ehtiyatının ($\frac{LI_i^2}{2}$) varlığı sayəsində dövrənin

ALB hissəsində cərəyan sıçrayışla yox, tədricən sıfıra qədər azalacaqdır. Özünəinduksiya e.h.q. həmin hissədə cərəyanın müəyyən müddət axmasını təmin edəcəkdir. Dövrənin $ALBA$ qapalı konturu üçün elektrik müvazinət tənliyi

$$L \frac{di}{dt} + ir_1 = 0 \quad (5.22)$$

Qərarlaşmış rejimdə ALB hissədə cərəyan sıfırdır ($i_{m\acute{e}c}=0$). Deməli, $i=i_{m\acute{e}c}+i_{s\acute{e}r}=i_{s\acute{e}r}$ və s.

$$L \frac{di_{sar}}{dt} + i_{sar}r_1 = 0$$



Şəkil 5.4. Sarğaçlı dövrədə qısaqapanma

şəklində yazılır. Bu tənliyin həlli belə ifadəyə malikdir:

$$I_{sar} = Ae^{pt} = Ae^{\frac{r_1}{L}t} \quad (5.23)$$

A-nın qiymətini başlanğıc şərtədən təyin edirik.:

$$i_{sar(t=0)} = i_{(t=0)} = I_1 = \frac{U}{r_1 + r_2} = Ae^{p \cdot 0} = A$$

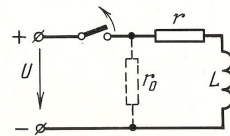
Beləliklə,

$$i = i_{sar} = \frac{U}{r_1 + r_2} e^{-\frac{t}{\Phi}} = I_1 e^{-\frac{t}{\Phi}} \quad (5.24)$$

$$\Phi = \frac{L}{r_1} = -\frac{1}{p}$$

Şəkil 5.4,b-də i cərəyanının sönmə əyrisi göstərilmişdir.

İnduktivlikli dövrənin qırılması. rL dövrəsini bəsləyici mənbədən açdıqda (şəkil 5.5) cərəyanın birdən kəsilməsinə əngəl törədən özünəinduksiya e.h.q. yaranır. Dövrənin qırıldığı anda açıcı quruluşun kontaktları arasında elektrik qövsü yaranır. Buna səbəb maqnit sahəsində toplanmış enerjidir. Kontaktların və qövsün keçid müqaviməti cərəyanın sönmə sürətini təyin edir.



Şəkil 5.5. Sargachlı dövrənin qırılması

Əgər dövrənin induktivliyi L böyükdürsə və cərəyanın

sönməsi tez gedirsə, onda özünəinduksiya e.h.q $e_L = -L \frac{di}{dt}$

tədbiq edilmiş gərginlikdən dəfələrlə böyük ola bilər. Belə ifrat gərginlik təhlükəlidir, çünki izolyasiyanın deşilməsinə səbəb ola bilər. Ona görə ifrat gərginliyi məhdudlaşdırmaq lazımdır. Bundan ötrü dövrə qırılan zaman induktivlikli dövrə hissəsinə

paralel olaraq müqavimət qoşurlar. Buna boşaldıcı müqavimət deyilir. Maqnit sahəsində toplanmış enerji tədricən bu müqavimətdə istiliyə çevrilir.

rL dövrəsinin sinusoidal gərginliyə qoşulması. *rL* dövrəsini $u=U_m \sin(\omega t + \psi)$ sinusoidal gərginliyinə qoşsaq, dövrədə qərarlaşmış cərəyan bildiyimiz kimi belə təyin edilir:

$$\begin{aligned} i_{\text{sem}} &= \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) = \\ &- \frac{U_m}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \psi - \varphi) t \end{aligned} \quad (5.25)$$

Keçid prosesi zamanı dövrədən üstlü qanunla dəyişən sərbəst cərəyan da axacaqdır:

$$I_{s\partial r} = A e^{pt} = A e^{-\frac{r}{L}t} \quad (5.26)$$

Başlangıç şərtədən

$$i_{(t=0)} = (i_{m\partial c} + i_{s\partial r})_{(t=0)} = 0$$

təyin edirik ki,

$$I_{s\partial r(t=0)} = A = -i_{m\partial c(t=0)} = -\frac{U_m}{Z} \sin(\psi - \varphi)$$

beləliklə

$$i_{s\partial r} = -\frac{U_m}{Z} \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.27)$$

Dövrədən axan cərəyanın ifadəsi isə belə olar:

$$\begin{aligned} i &= i_{m\partial c} + i_{s\partial r} = \\ &= -\frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{U_m}{Z} \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned} \quad (5.28)$$

Məcburi, sərbəst və həqiqi cərəyanların qrafikləri şəkil 5.6-da göstərilmişdir.

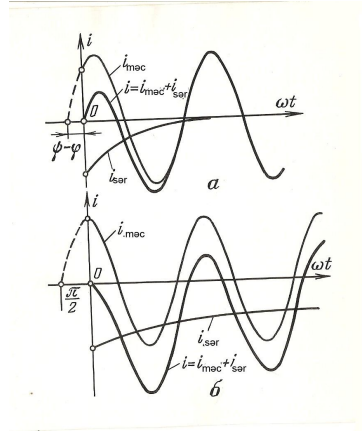
Əgər dövrənin qoşulması cərəyan sıfırdan keçən anda ($\varphi - \varphi = 0$) baş verirsə, onda sərbəst cərəyan yaranmayacaq və dövrdə qərarlaşmış rejim yaranacaqdır.

Dövrənin qoşulması $i_{m\text{ac}}$ cərəyanının maksimumdan keçməsi anında ($\varphi - \varphi = 90^\circ$) baş verirsə, onda yarım perioddan

sonra ümumi cərəyan $i = \frac{L}{r}$ kifayət qədər böyük olduqda qərarlaşmış rejimdəki qiymətin iki mislinə bərabər olacaq:

$$i_{\text{mak}} \approx 2 \frac{U_m}{Z} \quad (\text{şəkil 5.6,b}).$$

Belə xoşagəlməz faktı elektrotexniki qurğuları hesabladıqda nəzərə almaq lazımdır.



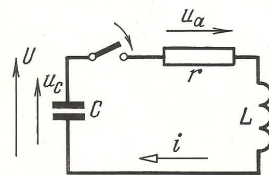
Şəkil 5.6. Sargacın sinusoidal gərginliyə qoşulması

5.4. Kondensatorun induktivliyə və müqavimətə boşalması

U gərginliyinə qədər dolmuş C kondensatorunun rL dövrəsinə qoşulduğuna (şəkil 5.7) baxaq. Bu konturda elektrik müvazinət tənliyi.

$$u_L + u_a + u_c = 0$$

$$L \frac{di}{dt} + ir + \frac{q}{C} = 0 \quad (5.29)$$



Şəkil 5.7. Kondensatorun induktivliyə və müqavimətə boşalması

(5.29) tənliyini bir dəfə differensiallasaq, alarıq:

$$L \frac{d^2 \mathbf{i}}{dt^2} + r \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \frac{1}{C} \mathbf{i} = 0 \quad (5.30)$$

Bu tənliyin həlli aşağıdakı kimidir:

$$\mathbf{i} = \mathbf{A}_1 e^{p_1 t} + \mathbf{A}_2 e^{p_2 t} \quad (5.31)$$

Bu ifadədə $\mathbf{p}_1$ və $\mathbf{p}_2$, $Lp^2 + rp + \frac{1}{C} = 0$ xarakteristika tənliyinin kökləridir. Burada

$$\mathbf{p}_{1,2} = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (5.32)$$

$$\frac{r}{2L} = \beta, \quad \frac{1}{LC} = \omega_0^2 \text{ işarə edək onda}$$

$$\mathbf{p}_{1,2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} = -\beta \pm \gamma$$

İnteqrallama sabitlərini $\mathbf{A}_1$ və $\mathbf{A}_2$ başlanğıc şərtlərindən təyin edirik: $\mathbf{i}_{(t=0)} = \mathbf{0}$, $\mathbf{u}_{c(t=0)} = \mathbf{U}$ (kommutasiyanın I və II qanunu):

$$\mathbf{i}_{(t=0)} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 = \mathbf{0} \quad (5.31, a)$$

$$\mathbf{u}_{L(t=0)} + \mathbf{u}_{a(t \neq 0)} + \mathbf{u}_{c(t=0)} = L \left(\frac{d\mathbf{i}}{dt} \right)_{(t=0)} + \mathbf{U} = \mathbf{0} \quad (5.29, a)$$

buradan

$$L \left(\frac{d\mathbf{i}}{dt} \right)_{(t=0)} + \mathbf{U} = \mathbf{0}$$

$$(5.31) \text{ ifadəsini diferensiallamaqla və } \left(\frac{d\mathbf{i}}{dt} \right)_{(t=0)} = -\frac{\mathbf{U}}{L}$$

olduğunu nəzərə almaqla $t=0$ anı üçün tapırıq:

$$-\frac{U}{L} = A_1 p_1 + A_2 p_2 \quad (5.34)$$

(5.31,a) və (5.34) tənliklərini bir yerdə həll etsək inteqrallanma sabitlərini təyin edərək.

$$A_1 = -\frac{U}{2rL}, \quad A_2 = \frac{U}{2rL}$$

Keçid prosesinin xarakteri burada dövrənin r, L və C parametirlərinin nisbətindən asılıdır və xarakteristik tənliyin kökləri ilə (p_1, p_2) təyin edilir.

Kondensatorun aperiodik boşalması. Xarakteristik tənliyin kökləri həqiqi və mənfi alındıqda kondensatorun aperiodik boşalması baş verir. Bu halda $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 > \frac{1}{LC}$, (yəni

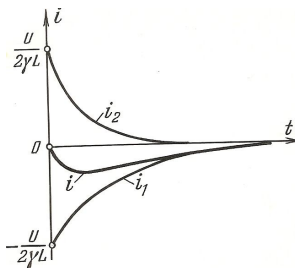
$r > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$) olur. Həqiqi cərəyanı i üstlü funksiya qanunu ilə sö-nən iki cərəyanın i_1 və i_2 cəmi kimi göstərə bilərik (şəkil 5.8).

$$i = i_1 + i_2 = Ae^{p_1 t} + Ae^{p_2 t}$$

Bu cərəyanların başlanğıc qiymətləri

$$i_{1(t=0)} = A_1 = -\frac{U}{2rL} \quad (5.36)$$

$$i_{2(t=0)} = A_2 = \frac{U}{2rL}$$



Şəkil 5.8. Kondensatorun aperiodik boşalması

kəmiyyətə bərabər işarəcə isə

əksdir. $|p_2| > |p_1|$ olduğuna görə i_2

tez sö-nəcəkdir. Ümumi cərəyan əvvəlcə müəyyən maksimal qiymətə qədər artacaq, sonra isə istiqamətini dəyişmədən sıfıra qədər azalacaq.

Kondensatorun belə boşalmasına **aperiodik boşalma deyilir**.

Kondensatorun periodik boşalması. Xarakteristik tənliyin kökləri $r < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ olduqda qoşma kompleks ədədlər olur.

(5.32) ifadəsindən:

$$\beta = \frac{r}{2L}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2}$$

işarə etsək

$$\begin{aligned} p_1 &= -\beta + j\omega, & p_2 &= -\beta - j\omega \\ A_1 &= -\frac{U}{2j\omega L}, & A_2 &= -\frac{U}{2j\omega L} \end{aligned} \quad (5.35, a)$$

Bu qiymətləri (5.31) ifadəsində nəzərə alsaq cərəyan üçün alarıq,

$$\begin{aligned} i &= -\frac{U}{2j\omega L} [e^{(-\beta+j\omega)t} - e^{(-\beta-j\omega)t}] = \\ &= -\frac{U}{2j\omega L} (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}) e^{-\beta t} = \\ &= -\frac{U}{2j\omega L} e^{-\beta t} \cdot 2j \sin \omega t = -\frac{U}{\omega L} e^{-\beta t} \cdot \sin \omega t \end{aligned} \quad (5.37)$$

Şəkil 5.9-da $i(t)$ qrafiki göstərilmişdir. Cərəyan sinus qanunu ilə dəyişir, belə ki, bu zaman onun amplitudası üstlü qanunla azalır. Kondensatorun belə boşalmasına sönən rəqsi boşalma deyilir.

İdeal kontur halında ($r=0$)
 $\beta = 0$, $\omega = \omega_0$ və cərəyanın ifadəsi aşağıdakı şəkildə düşür;

$$i = -\frac{U}{\omega_0 L} \sin \omega_0 t$$



Şəkil 5.9. Kondensatorun rəqsi boşalması

Bu halda dövrədən sinusoidal cərəyan axır. Bu cərəyanın tezliyi konturun xüsusi tezliyinə bərabərdir.

5.5. Xətti elektrik dövrələrində keçid proseslərinə aid sərbəst işlər

1. Kommutasiya qanunlarının fiziki mahiyyətini aydın-laşdırın.
2. Zaman sabitinin (Φ) dövrə parametrlərindən asılılığının fiziki mahiyyətini izah edin.
3. Tutum $C = 1500 \text{ mkF}$ olan, $U_0 = 100 \text{ V}$ gərginliyə qədər doldurulmuş kondensator $r = 2 \text{ Om}$ müqavimətinə bəşəlir. Kondensator gərginliyinin zamandan asılılıq qrafikini qurmalı.
4. Müqaviməti $r = 4 \text{ Om}$ olan sarğac $U = 24 \text{ V}$ gərginlikli sabit cərəyan şəbəkəsinə qoşulur. Əğər qoşulmadan **2,5** saniyə sonra dövrədə cərəyan özünün qərarlaşmış qiymətinin 95%-ni alırsa, sarğacın induktivliyini tapmalı.
5. Sabit cərəyan şəbəkəsinə aktiv müqaviməti $r = 400 \text{ Om}$ olan böyük induktivlikli sarğac qoşulmuşdur. Sarğaca paralel, daxili müqaviməti $r = 4000 \text{ Om}$ olan voltmetr birləşdrilmişdir. Sarğacı voltmetirlə birlikdə şəbəkədən açıqda başlanğıc anda voltmetrin göstəricisinin neçə dəfə artdığını təyin etməli. Voltmetrin İnduktivliyini nəzərə almalı.
6. Müqaviməti $r = 10 \text{ Om}$ induktivliyi $L = 31,4 \text{ mHn}$ olan sarğac $U=120 \text{ V}$ gərginlikli sinusoidal cərəyan şəbəkəsinə qoşulur. Qoşulmuş gərginliyin ani qiyməti maksimal qiymətinin yarısına bərabər olduqda baş verir. Şəbəkənin tezliyi $f = 50 \text{ Hz}$. Sarğacda cərəyanın ən böyük ani qiymətini tapmalı.

TRANSFORMATORLAR

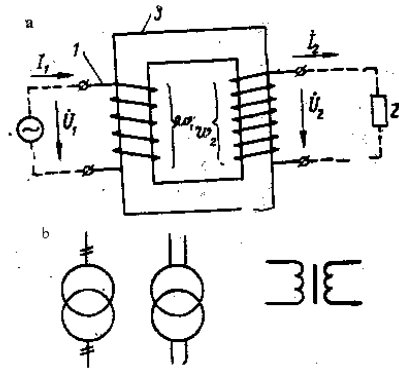
6.1. Əsas anlayışlar

Eyni tezlikdə bir gərginlikli dəyişən cərəyanı başqa gərginlikli dəyişən cərəyanı çevirən statik elektromaqnit aparatına transformator deyilir. Elektrik təchizat sistemlərində istifadə olunan transformatorlara güc transformatorları deyilir. Transformatorlardan elektrik ölçü quruluşlarında, elektrotermik qurğularda, radiotexnikada, elektronikada, avtomatik idarə quruluşlarında və texnikanın başqa sahələrində də istifadə olunur.

Transformatorun prinsipial quruluş sxemi şəkil 6.1,a-da göstərilmişdir. Transformator qapalı maqnit keçiricisindən (3) və onun çubuqlarında yerləşdirilmiş iki ədəd dolaqdan (1 və 2) ibarətdir. Dolaqlar izolyasiyalı mis və ya alüminium məftillərdən hər iki çubuqda konsentrik surətdə yığılır. Aydın olmaq üçün şəkildə dolaqlar ayrılıqda göstərilmişdir. Maqnit keçiricisi isə maqnit itgilərini azaltmaq üçün elektrotexniki polad vərəqələrdən hazırlanır (adətən qalınlığı 0,35 mm).

Şəkil 6.1,b-də birfazlı transformatorun şərti işarələri göstərilmişdir.

Transformatorun dolaqlarından biri elektrik enerji mənbəyinə qoşulur; bu dolağa birinci dolaq deyilir. Transformatorun ikinci dolağı adlanan o biri dolağından enerji işlədicilərə ötürülür. Bu dolaqlara aid kəmiyyətlər uyğun olaraq 1 və 2 indeksi ilə ni-



Şəkil 6.1. Transformatorun sxemi (a) və şərti işarələri (b)

şanlanır (məsələn, E_1 , U_1 , I_1 , w_1 və E_2 , U_2 , I_2 , w_2 və s.). Bundan başqa, transformatorun alçaq və yüksək gərginlikli dolaqlarını fərqləndirmək lazımdır.

Birinci dolağa tətbiq edilmiş gərginliyin təsirindən həmin dolaqla i_1 cərəyanı axır və transformatorun nüvəsində Φ maqnit seli yaranır. Bu maqnit seli hər iki dolağı kəsir və onlarda e.h.q.-ni induksiylayır:

$$\begin{aligned} e_1 &= -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_2 &= -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{aligned} \quad (6.1)$$

Əgər ikinci dolağın dövrəsi qapalıdırsa, onda e_2 e.h.q.-nin təsiri altında həmin dövrdə i_2 cərəyanı axacaqdır.

Dolaqlarda induksiyanmış e.h.q.-lərin təsiredici qiymətləri

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 4,44jw_1\Phi_m \\ E_2 &= 4,44jw_2\Phi_m \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

Bu e.h.q.-lərin nisbətinə transformasiya əmsalı deyilir:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

(6.3) Dolaqların e.h.q.-lərini gərginliklərə təxminən bərabər götürmək olar, onda:

$$k = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad (6.4)$$

Əgər $k > 1$ isə, transformator alçaldıcı, $k < 1$ isə yüksəldici olur.

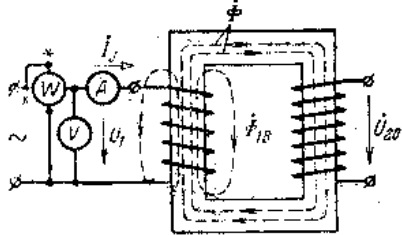
6.2. Transformatorun yüksüz işləmə rejimi

Transformatorun ikinci dolağının ucları açıq olduqda və birinci dolağı mənbəyə qoşulan haldakı rejiminə

yüksüz işləmə rejimi deyilir (şəkil 6.2). Bu rejimdə transformator mahiyətcə polad nüvəli induktiv sargıdan fərqlənir.

Yüksüz işləmə rejimində birinci dolaqdan axan cərəyana transformatorun yüksüz işləmə cərəyanı deyilir.

Ferromaqnit nüvə lazımı maqnit seli yaratmaq üçün kiçik maqnitləşdirici qüvvə tələb edir. Odur ki, transformatorun yüksüz işləmə cərəyanı I_0 birinci tərəf I_{1n} nominal cərəyanının **2,5 – 10%**-ini təşkil edir.



Şəkil 6.2. Transformatorun yüksüz işləmə sxemi

Birinci dolağın maqnitləşdirici qüvvəsinin

$F_0 = I_0 w_1$ təsiri altında yaranan maqnit selini iki hissədən ibarət götürmək məqsədəuyğundur:

- 1) maqnit keçiricisindən qapanan əsas maqnit seli Φ ;
- 2) havada qapanan və yalnız birinci dolağı kəsən səpələnmə maqnit seli $\Phi_{1\sigma}$.

Əsas maqnit seli dolaqlarda E_1 və E_2 e.h.q.-lərini yaradır. E_1 və E_2 isə Φ selindən fazaca dördüdə bir period geri qalır.

Əsas maqnit seli fazaca, maqnit itgilərinin mövcud olmasına görə I_0 cərəyandan σ bucağı qədər geri qalır.

Səpələnmə maqnit seli havadan qapandığına görə çox zəifdir və I_0 cərəyanı ilə eyni fazada olur. Bu sel birinci dolağda

$$E_{1\sigma} = 4,44 f w_1 \Phi_{1\sigma} \sin \sigma m \quad (6.5)$$

səpələnmə e.h.q. yaradır və $\Phi_{1\sigma}$ maqnit selindən fazaca dördüdə bir period geri qalır.

Bir işçi dolağa tətbiq edilmiş gərginlik, $\dot{U}_1$ əsas maqnit selinin yaratdığı e.h.q.-ni $\dot{E}_1$ səpələnmə e.h.q.-ni $E_{1\sigma}$ və birinci dolağın aktiv müqavimətindəki r_1 gərginlik düşgüsünü müvazinətdə saxlayır:

$$U_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1y} + I_0 r_1 \quad (6.6)$$

Səpələnmə maqnit seli $\Phi_{1\sigma}$ və onun induksiya etdiyi e.h.q. $E_{1\sigma}$ birinci dolağın cərəyanına mütənəsibdir. Odur ki, induktiv müqavimət anlayışından istifadə edib, $\dot{E}_{1y} = -jI_0 x_1$ qəbul etmək olar. Onda elektrik müvazinət tənliyi birinci dolaq üçün

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_0 r_1 + jI_0 x_1 \quad (6.7)$$

kimi yazılar.

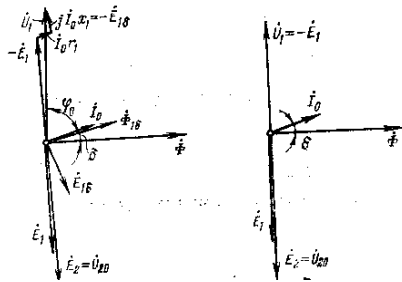
Yuxarıda deyilənlərə görə transformatorun yüksüz işləmə rejimi üçün vektor diaqramı şəkil 6.3-dəki kimi olar. Burada

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1.$$

Yüksüz işləmə rejimində

$$U_{20} = E_2$$

olur.

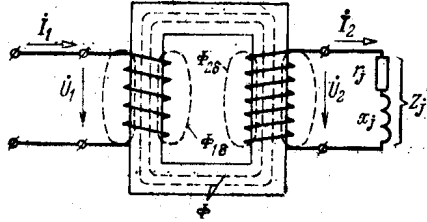


Şəkil 6.3. Yüksüz işləmə rejimində transformatorun dəqiq (a) və təxmini (b) vektor diaqramları

6.3. Transformatorun yüklü rejimi

Transformatorun maqnitləşdirici qüvvələr tənliyi

Transformatorun ikinci dolağına yük müqaviməti $\dot{\mathbf{Z}}_y = \mathbf{r}_y + \mathbf{j}x_y$ qoşsaq, $\mathbf{E}_2$ e.h.q.-nin təsiri ilə ikinci dövrədə $\mathbf{I}_2$ cərəyanı yaranacaqdır (şəkil 6.4). Enerjinin saxlanması qanununa görə, birinci dolaqdakı cərəyan da $\mathbf{I}_1$ artacaqdır.



Şəkil 6.4. Transformatorun yüklü iş rejimi

Birinci və ikinci dolağın cərəyanları arasında asılılıq yaradaq. $\mathbf{U}_1 \approx \mathbf{E}_1$ olduğuna görə transformatorun əsas maqnit seli Φ bütün rejimlərdə öz qiymətini təxmini saxlayacaqdır. Yüklü halda transformatorunda əsas maqnit selinin hər iki dolaqdakı maqnitləşdirici qüvvələrin birgə təsirindən yarandığını nəzərə alsaq, yazı bilərik:

$$\dot{\mathbf{I}} = \dot{\mathbf{I}}_1 \mathbf{w}_1 + \dot{\mathbf{I}}_2 \mathbf{w}_2 \approx \dot{\mathbf{I}}_0 \mathbf{w}_1 \quad (6.8)$$

Bu tənliyə transformatorun maqnitləşdirici qüvvələr tənliyi deyilir. Tənlikdən göründüyü kimi $\mathbf{I}_2$ cərəyanı maqnitləşdirici təsir göstərir (Lents prinsipinə görə) və bununla da $\mathbf{I}_1$ cərəyanının özünün səpəlmə maqnit selini $\Phi_{1\sigma}$ yaradır. Bu selin induksiyladığı

$$\mathbf{E}_{2\sigma} = 4,44f\mathbf{w}_2 \Phi_{2\sigma m} \quad (6.9)$$

səpəlmə e.h.q.-nin təsirini ikinci dolağın intuktiv müqavimətindəki (x_2) gərginlik düşügsü kimi nəzərə alırlar:

$$\dot{\mathbf{E}}_{2y} = -\mathbf{j} \dot{\mathbf{I}}_2 x_2 \quad (6.10)$$

Yüklü transformatorun vektor diaqramı

Yüklü transformatorun vektor diaqramını ikinci dolağın sıxaclarındakı gərginlikdən $\dot{U}_2$ başlayaraq qurmaq yaxşıdır (şəkil 6.5).

Dolaqların parametrləri ($w_1, w_2, r_1, r_2, x_1, x_2$), yüksüz işləmə verilənləri (I_0, σ), yük müqavimətinin qiymət və xarakteri ($Z_y, \cos\varphi_y$) məlum qəbul edilir.

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_y} \quad (6.11)$$

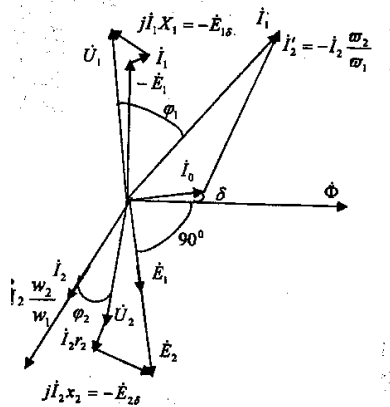
vektoru $\dot{U}_2$ vektoruna nəzərən $\varphi_2 = \varphi_y$ bucağı altında çəkilir.

İkinci dolaqdan əsas maqnit seli $\dot{E}_2$ e.h.q.-ni, səpələnmə seli isə $\dot{E}_{2y}$ e.h.q.-ni yaradır. $\dot{U}_2$ gərginliyi üçün yaza bilərik:

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 + \dot{E}_{2y} - \dot{I}_2 r_2 &= \\ &= \dot{U}_2 = \dot{I}_2 \dot{Z}_y \end{aligned} \quad (6.12)$$

$\dot{E}_{2y} = -j\dot{I}_2 x_2$ nəzərə alsaq, onda ikinci dolağın elektrik müvazinət tənliyini belə yazmaq olar:

$$\dot{E}_2 = -\dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2 + j\dot{I}_2 x_2 \quad (6.13)$$



Şəkil 6.5. Yüklü transformatorun vektor diaqramı

Bu tənlikdən istifadə edib, E_2 vektorunu qururuq. Sonra $E_1 = kE_2 = E_2 \frac{w_1}{w_2}$ təyin edib, E_1 vektorunu E_2 vektoru istifadəmətində qeyd edirik.

(6.2) tənliyindən əsas maqnit selinin amplitudasını Φ_m təyin edilir, Φ_m vektorunu E_1 və E_2 e.h.q.-lərindən dördüdə bir period irəli çəkirik. Φ_m vektoruna nəzərən σ bucağı altında yüksüz işləmə cərəyanı vektorunu I_0 qeyd edirik. Birinci dolağın I_1 maqnitləşdirici qüvvələr tənliyindən (6.8) istifadə edərək tapırıq:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_0 - \frac{1}{k} \dot{I}_2 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2' \quad (6.14)$$

Birinci dolağa tətbiq edilmiş gərginliyi $\dot{U}_1$ belə təyin edirik

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1 \quad (6.15)$$

Göründüyü kimi birinci dolağın cərəyanı I_1 , iki toplanana malikdir: bunlardan biri I_0 yüksüz işləmə rejimində olduğu kimi əsas maqnit selini yaratmaq, digəri isə I_2 ikinci dolağın cərəyanının maqnitləşdirici təsirini kompensasiya etmək, yəni əsas maqnit selinin dəyişməz qalmasını təmin etmək üçündür.

Əvəz sxemi

Transformatorun iş rejimlərini tədqiq etmək üçün dolaqlar arasındakı maqnit rabitəsini elektrik rabitəsi ilə əvəz etmək məqsədəuyğundur. Belə etdikdə transformatorun daxil olduğu elektrik şəbəkələrinin hesabi xeyli sadələşir və asanlaşır.

Birinci və ikinci dolağın dövrlərini bir başa bir-birinə birləşdirməklə əvəz sxemini almaq olmaz. Əvvəlcə dolaqları ümumi gərginliyə gətirmək lazımdır. Çünki

transformatorun əvəz elektrik sxemi elə olmalıdır ki, onlar arasında ekvivalentlik pozulmasın.

Transformatorun ikinci tərəfini birinci tərəfə gətirmək daha əlverişlidir. Bu çevirmənin mahiyyəti ondan ibarətdir ki, həqiqi transformator, transformasiya əmsalı vahid olan ($k = 1$) transformatorla əvəz edilir. Belə ki,

$$E'_2 = E_1 = kE_2 \quad (6.16)$$

Çevirmənin energetik ekvivalentliyi şərtlərindən transformatorun ikinci tərəf dövrəsinin çevrilmiş kəmiyyətlərini təyin edirik:

$$\begin{aligned} S_2 &= S'_2; & E_2 I_2 &= E'_2 I'_2 \\ P_2 &= P'_2; & I_2^2 r_2 &= I_2'^2 r'_2 \\ Q_2 &= Q'_2; & I_2^2 x_2 &= I_2'^2 x'_2 \\ S_y &= S'_y; & I_2 U_2 &= I'_2 U'_2 \end{aligned}$$

buradan

$$I'_2 = I_2 \frac{E_2}{E'_2} = I_2 \frac{E_2}{kE_2} = \frac{1}{k} I_2 \quad (6.17)$$

$$U'_2 = U_2 \frac{I_2}{I'_2} = U_2 \frac{I_2}{\frac{1}{k} I'_2} = kU_2 \quad (6.18)$$

$$r'_2 = r_2 \frac{I_2^2}{I_2'^2} = k^2 r_2 \quad (6.19)$$

$$x'_2 = x_2 \frac{I_2^2}{I_2'^2} = k^2 x_2 \quad (6.20)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{z}'_2 &= \sqrt{\mathbf{r}'_2{}^2 + \mathbf{x}'_2{}^2} = \\ &= k^2 \mathbf{z}_2 \\ \mathbf{z}'_y &= k^2 \mathbf{z}_y \end{aligned} \right\} \quad (6.21)$$

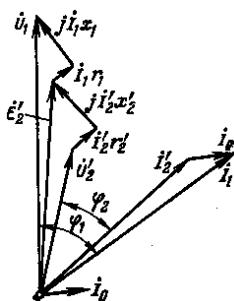
Şəkil 6.6-da transformatorun vektor diaqramı çevrilmiş kəmiyyətlər üçün qurulmuşdur.

Transformatorun çevril-

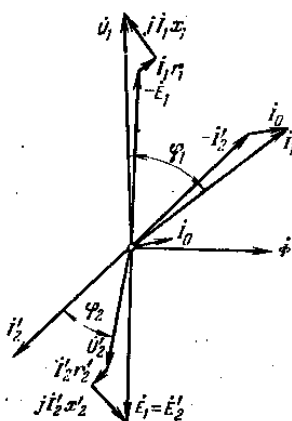
miş vektor diaqramı $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$ olduğunu nəzərə alıb, diaqramın aşağı hissəsini 180° döndərüb yuxarı hissəsinin üzərinə salmaq olar. Beləliklə, alınmış diaqramma transformatorun birləşdirilmiş vektor diaqramı deyilir (şəkil 6.7.)

Transformatorun tam əvəz sxemi şəkil 6.8-də göstərilmişdir.

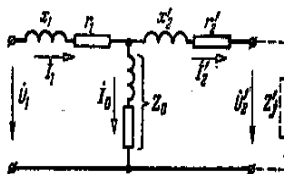
$\dot{\mathbf{U}}_1$ gərginliyi əvəz sxemindən və ya birləşmiş vektor diaqramından təyin edilir:



Şekil 6.7. Transformatorun
birlleşmiş vektor diaqramı



Şekil 6.6. Tranesformatorun çevrilmiş vektor diagramı



Şəkil 6.8. Transformatorun tam əvəz sxemi

$$\begin{aligned}
\dot{U}_1 &= \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 r'_2 + j \dot{I}'_2 x'_2 + \left(\dot{I}'_2 + \dot{I}_0 \right) r_1 + \\
&\quad + j \left(\dot{I}'_2 + \dot{I}_0 \right) x_1 = \\
&= \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 r'_2 + j \dot{I}'_2 x'_2 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1
\end{aligned} \tag{6.22}$$

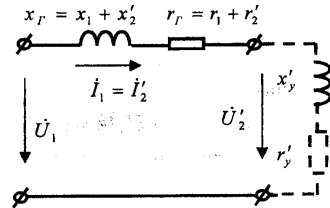
Bir çox praktik hesablamalarda transformatorun sadələşmiş əvəz sxemindən istifadə etmək məqsədəuyğundur (şəkil 6.9).

Bu sxem tam əvəz sxemindən $\dot{I}_0 = 0$ qəbul etməklə alınır. Sadələşmiş əvəz sxeminin müqavimətləri

$$r_{q,q} = r_1 + r'_2 \tag{6.23}$$

$$x_{q,q} = x_1 + x'_2 \tag{6.24}$$

$$z_{q,q} = \sqrt{r_{q,q}^2 + x_{q,q}^2} \tag{6.25}$$



Şəkil 6.9. Transformatorun sadələşmiş əvəz sxemi

transformatorun aktiv, induktiv və tam qısaqapanma müqavimətləri adlanır.

Transformatorun ikinci tərəf gərginliyinin dəyişməsi

Transformatorun yükü dəyişdikdə onun ikinci dolağının uclarındakı gərginlik U_2 -də dəyişir.

Transformatorun ikinci dolağının uclarındakı yüksüz və yüklü rejimlər üçün gərginliklərin hesabi fərqi ΔU_2 işarə edək:

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 \tag{6.26}$$

Əgər ΔU_2 məlumdursa, ikinci dolağın uclarındakı gərginlik belə təyin edilə bilər:

$$U_2 = U_{20} - \Delta U_2 \tag{6.27}$$

$\Delta U_2' = k \Delta U_2$ çevrilmiş qiymətini əvvəlcə təyin edək

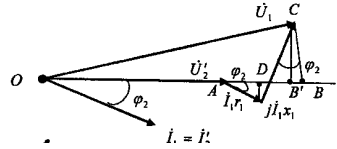
$$k \approx \frac{U_1}{U_{20}}$$

olduğunu nəzərə alsaq

$$\Delta U_2' = \Delta U_2 k = (U_{20} - U_2) k = U_1 - U_2' \quad (6.28)$$

Transformatorun sadələşmiş vektor diaqramından (şəkil 6.10) tapırıq:

$$\begin{aligned} \Delta U_2' &= OC - OA = \\ &= AB \approx AB' = AD + DB' = \\ &= I_1 r_{qq} \cos \varphi_2 + I_1 x_{qq} \sin \varphi_2 \end{aligned}$$



Şəkil 6.10. Transformatorun ikinci gərginliyinin dəyişməsinin təyini

$$\Delta U_2' = I_1 (r_{qq} \cos \varphi_2 + x_{qq} \sin \varphi_2) \quad (6.29)$$

Transformatorun yüklənmə əmsalı anlayışından istifadə edib:

$$B = \frac{I_2}{I_{2n}} \approx \frac{I_1}{I_{1n}} \quad (6.30)$$

$$\Delta U_2' = \beta I_{1n} (r_{qq} \cos \varphi_2 + x_{qq} \sin \varphi_2) \quad (6.31)$$

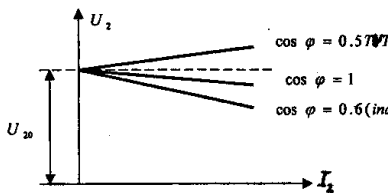
yaza bilərik. Transformatorun ikinci dolağının uclarındakı gərginliyin həqiqi qiyməti:

$$U_2 = U_{20} - \frac{\Delta U_2'}{k} \quad (6.32)$$

U_2 gərginliyinin I_2 cərəyanından asılılıq qrafikinə transformatorun xarici xarakteristikası deyilir.

Şəkil 6.11-də yükün $\cos\varphi$ -nin üç müxtəlif qiyməti üçün transformatorun xarici xarakteristikaları göstərilmişdir.

Tutum karakterli yük transformatorunun U_2 gərginliyi yüksüz işləmə U_{20} gərginliyindən böyük ola bilər.



Şəkil 6.11. Transformatorun xarici xarakteristikası

6.4. Üçfazlı transformatorlar

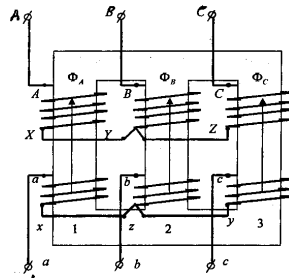
Üçfazlı transformatorlar üçfazlı cərəyanın enerjisini transformasiya etmək üçün üç ədəd birfazlı və yaxud xüsusi üçfazlı transformatordan istifadə edilir. Çox hallarda üçfazlı transformatorlardan istifadə edilir, çünki onlar ucuz başa gəlir və yığcamdır. Olduqca böyük gücləri ötürmək üçün birfazlı transformatorlar işlədilir. Bu onunla əsaslandırılır ki, böyük güclü üçfazlı transformatorların hazırlanması texnologiyası və nəql edilməsi çox çətindir.

Üçfazlı transformatorun quruluşu

Üçfazlı transformatorun maqnit keçiricisi üççubuqlu götürülür (şəkil 6.12). Hər çubuqda bir fazanın yüksək və alçaq gərginlik dolaqları yerləşdirilir. Şəkildə transformatorun həm yüksək, həm də alçaq gərginlik dolaqları ulduz birləşmişdir. Təcrübədə başqa birləşmə sxemlərində də, məsələn, yüksək gərginlik dolaqları ulduz, alçaq gərginlik dolaqları isə üçbucaq birləşmiş sxemdən də geniş istifadə edilir. Transformator dolaqlarının birləşmə sxemi kəsir şəklində işarə olunur: Y/Δ və yaxud Y/Y (surətdə yüksək gərginlik dolaqlarının birləşmə sxemi,

məxrəcdə isə alçaq gərginlik dolaqlarının birləşmə sxemi göstərilir).

Üçfazlı transformatorun 1, 2, 3 çubuqlarında (şəkil 6.12) birinci dolaqlara tətbiq edilmiş faza gərginliklərinə U_A , U_B , U_C mütənasib Φ_A , Φ_B , Φ_C maqnit selləri yaranır. Dolaqlar fazalarda simmetrik olduğuna görə maqnit sellərinin Φ_{Am} , Φ_{Bm} , Φ_{Cm} amplituda qiymətləri bir-birinə bərabər olacaq. Bu sellərin istənilən anda cəmi sifıra bərabərdir. Odur ki, üçfazlı transformatorun maqnit keçiricisini üççubuqlu hazırlamaq mümkün olur.

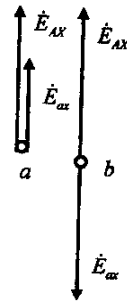


Şəkil 6.12. Üçfazlı transformatorun quruluş sxemi

Üçfazlı transformatorun dolaqlarını ulduz və ya üçbucaq sxemi ilə birləşdirmək üçün dolaqların başlanğıc və son uclarını bilmək vacib məsələdir.

Yüksək gərginlik dolaqlarının başlanğıc ucları A, B, C, bunlara uyğun son ucları isə X, Y, Z ilə işarə edilir. Alçaq gərginlik dolaqlarının ucları isə analogi olaraq a, b, c və X, Y, Z ilə işarə edilir.

Eyni bir çubuqda yerləşdirilmiş dolaq sıxaclarının nişanlanması elə olmalıdır ki, maqnit selinin induksiya etdiyi e.h.q.-lər, məsələn, $\dot{E}_{AX}$ və $\dot{E}_{ax}$ fazaca eyni olsun (şəkil 6.13a).



Şəkil 6.13. Sıxacların düzgün (a) və səhv (b) nişanlanması zamanı transformatorun faza e.h.q.-lərinin faktorları

Nişanlanma düz olmadıqda $\dot{E}_{AX}$ və $\dot{E}_{ax}$ e.h.q.-ləri fazaca yarım period fərqlənəcəkdir (şəkil 6.13b).

Müxtəlif çubuqlarda yerləşdirilmiş dolaqların sıxaclarının nişanlanması bir-biri ilə ələ əlaqələndirilməli və icra edilməlidir ki, hər üç çubuqda maqnit selləri eyni istiqamətdə olsun. Maqnit sellərinin müsbət istiqamətləri, cərəyanların dolaqların sonundan əvvəlinə doğru qəbul olunmuş müsbət istiqamətinə görə təyin edilir.

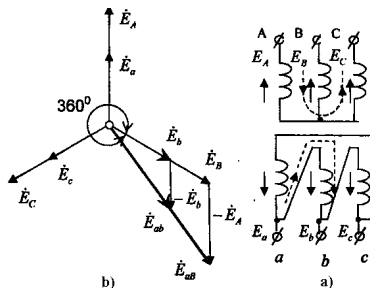
Üçfazlı transformatorların birləşmə qrupları

Maqnit keçiricisinin eyni çubuğunda oturdulmuş yüksək və alçaq gərginlik dolaqlarında fazaca eyni olan e.h.q.-lər induksiyanılır. Yüksək və alçaq gərginlik tərəfdə eyni adlı sıxaclar arasında təsir edən elektrik hərəkət qüvvələri (xətt e.h.q.-ləri), məsələn, $\dot{E}_{AB}$ və $\dot{E}_{ab}$ ya fazaca eyni olur, ya da 30° -li bucağın misli qədər fərqlənir.

Bu müddəanı izah etmək üçün Y/Δ sxemi üzrə birləşmiş (şəkil 6.14a) üçfazlı transformatora baxaq. Oxlarla faza e.h.q.-lərinin qəbul edilmiş müsbət istiqamətləri göstərilmişdir. Transformator dolaqlarının faza e.h.q.-lərinin vektor diaqramı şəkil 6.14,b-də təsvir edilmişdir.

E_{AB} xətt e.h.q.-nin vektorunu A sıxacından B sıxacına doğru hərəkət yolunda rast gələn faza e.h.q.-lərinin həndəsi cəmi kimi qurmaq olar (hərəkət yolu şəkil 6.14a-da qırıq xətlə göstərilmişdir).

Bu yolda iki $\dot{E}_A$ və $\dot{E}_B$ e.h.q.-nə rast gəlir, belə ki, $\dot{E}_B$ -ni müsbət işarə ilə (çünki istiqaməti hərəkət istiqaməti ilə eynidir), $\dot{E}_A$ -nı isə mənfi işarə ilə götürürük.



Şəkil 6.14. Transformator dolaqlarının Y/Δ birləşmə sxemi (a) və uyğun vektor diaqramı (b)

Analoji olaraq $\dot{E}_{ab}$ e.h.q. vektorunu qururuq.

Vektor diaqramından görürük ki, eyni adlı e.h.q.-lər

$\dot{E}_{AB}$ və $\dot{E}_{ab}$ arasındakı bucaq 330° təşkil edir.

Şəkil 6.15-də transformator dolaqlarının birləşmə sxemi **Y/Y**-dir; eyni adlı

e.h.q.-lər $\dot{E}_{AB}$ və $\dot{E}_{ab}$ arasında bucaq 0° -dir (e.h.q.-lər eyni fazadadır).

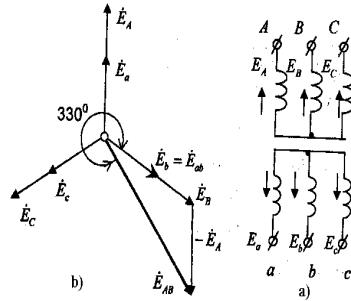
Eyni adlı xətt e.h.q.-i arasındakı faza fərqi bucağı transformatorun birləşmə qrupunu müəyyən edir. Bu bucağın qiymətini şərti olaraq hər vahidinə 30° uyğun gələn ədədlə göstərmə qəbul edilmişdir.

Beləliklə, şəkil 6.14-dəki sxem üzrə birləşmiş transformatorun qrupu **11** ($330:30=11$), şəkil 6.15-dəki sxem üçün isə **0** ($0:30=0$) olur.

Dolaqları müxtəlif sxem üzrə birləşdirməklə müxtəlif birləşmə qrupu alırıq. Birləşmə qruplarının çox müxtəlif olması transformatorların istismarı üçün rahat deyildir. Odur ki, **DUİST** birləşmə sxem və qrupların sayının üçü ilə məhdudlaşdırılmışdır:

$$\mathbf{Y/Y_0 - 0, Y/\Delta - 11 \text{ və } Y_0/\Delta - 11}$$

0 və **11** ədədləri birləşmə qrupunu, **0** indeksi isə transformator qapağının üstünə sıfır nöqtəsinin çıxarılmasını göstərir.



Şəkil 6.14. Transformator dolaqlarının Y/Y birləşmə sxemi (a) və uyğun vektor diaqramı (b)

6.5. Transformatorun parametrlərinin və faydalı iş əmsalının təyini

Transformatorun nominal parametrləri

Transformatorun işi zamanı onun dolaqlarında və maqnit keçiricisində istilik şəklində ayrılan enerji itkiləri yaranır. Transformatorun dolaqlarındakı güc itkiləri (elektrik itkiləri) ΔP_e cərəyanının kvadratı ilə mütənasibdir. Üçfazlı transformator üçün

$$\Delta P_e = 3(I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2) = 3(I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2') \approx 3I_1^2 r_q \quad (6.33)$$

Bu itkilər transformator yükünün qiymətindən asılıdır. Buna dəyişən itkilər deyilir.

Transformatorun maqnit keçiricisinin poladındakı güc itkiləri ΔP_m (maqnit itkiləri) maqnit selinin kvadratı, yəni gərginliyin kvadratı ilə U_1^2 mütənasibdir, çünki

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m$$

Bu itkilər transformatorun yükündən asılı olmadığına görə sabit itkilər də adlanır.

Transformatorada itkilər onun qızmasına səbəb olur və temperaturunu artırır. İtkilərin müəyyən qiymətində temperatur buraxıla bilən qiymətə çatır. İtkilərin qiyməti ilə transformatorun buraxıla bilən, uzunmüddətli maksimal yükü, yəni nominal gücü təyin edilir:

$$S_n = \sqrt{3} U_{2n} I_{2n} \quad (6.34)$$

Transformatorun nominal gücü kilovoltamperlərlə (kV.A) göstərilir. Transformatorun gücünü kilovatlarla göstərmək mümkün deyildir, çünki transformatorun verdiyi aktiv güc yükün $\cos\varphi$ -dən də asılıdır və $\cos\varphi$ istismar zamanı dəyişə bilər.

Nominal gərginliklər U_{1n} , U_{2n} və nominal cərəyanlar I_{1n} , I_{2n} , nominal güc S_n transformatorun üzərində xüsusi lövhədə göstərilir.

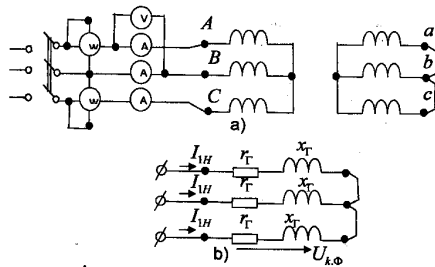
Qısaqapanma təcrübəsi

Transformatorun əvəz sxeminin parametrlərini təcrübə yolu ilə tapmaq üçün transformatorun qısaqapanma və yüksüz işləmə təcrübələrini aparırlar. Transformatorun nominal yükünə uyğun elektrik itkilərini qısaqapanma təcrübəsindən tapıb (şəkil 6.16a), qısaqapanma müqavimətlərini təyin etmək olar. Bu təcrübədə transformatorun ikinci dolağı qısa qapanır və birinci dolağına elə azaldılmış qiymətdə gərginlik U_{qq} verilir ki, dolaqlarda cərəyanlar nominal qiymətə bərabər olsun. U_{qq} kəmiyyətinə transformatorun qısaqapanma gərginliyi deyilir. Bu gərginliyi, adətən, nominala görə faizlə ifadə edirlər:

$$u_{qq} = \frac{U_{qq}}{U_{1n}} 100\% \quad (6.35)$$

Standart güc transformatorları üçün $u_{qq} = 5,5\%$ olur.

Transformatorun qısaqapanma təcrübəsində vattmetrlərin göstərişləri transformatorun nominal yük rejimindəki elektrik itkilərinə bərabərdir:



Şəkil 6.16. Transformatorun qısaqapanma təcrübəsi:
a – həqiqi sxemi; b – əvəz sxemi

$$P_{qq} = \Delta P_{en} = 3I_{1n}^2 r_{qq} \quad (6.36)$$

Bu təcrübə zamanı maqnit itkiləri çox kiçikdir (çünki U_{qq} kiçikdir) və onu nəzərdən atmaq olar.

Qısaqapanma təcrübəsinə əsasən ölçülmüş kəmiyyətlərə (U_{qq} , I_{1n} və P_{qq}) görə transformatorun əvəz sxeminin parametrlərini təyin edirik:

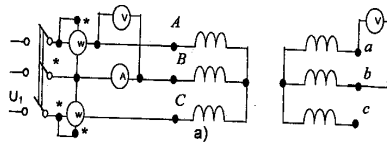
$$\left. \begin{aligned} z_{qq} &= \frac{U_{qqf}}{I_{1n}} \\ r_{qq} &= \frac{P_{qq}}{3I_{1n}^2} \\ x_{qq} &= \sqrt{z_{qq}^2 - r_{qq}^2} \end{aligned} \right\} \quad (6.37)$$

Yüksüz işləmə təcrübəsi

Transformatorun maqnit keçiricisində histerezis və dövrü cərəyanlarla əlaqədar maqnit itkilərini itkisüz işləmə təcrübəsindən təyin edirlər (şəkil 6.17). Transformatorun yüksüz işləmə təcrübəsində tələb etdiyi güc P_0 maqnit itkilərinə bərabər götürülür:

$$P_0 = \Delta P_m \quad (6.38)$$

Elektrik itkiləri bu təcrübə zamanı çox kiçikdir (çünki $I_0 = (0,025 - 0,1) \cdot I_{1n}$ və $I_2 = 0$) və onları nəzərə almamaq olar.



Şəkil 6.17. Transformatorun yüksüz işləmə təcrübəsinin sxemi

Transformatorun f.i.ə.

Transformatorun f.i.ə. η transformatorun verdiyi faydalı gücün P_2 onun bəsləyici şəbəkədən tələb etdiyi gücə P_1 olan nisbətinə bərabərdir:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (6.39)$$

Güc transformatorlarının f.i.ə.-ları **95-99%** qiymətində olur. Təcrübədə transformatorun f.i.ə.-nı hesablamaq üçün aşağıdakı düsturdan istifadə edilir:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_m + \Delta P_e} \quad (6.40)$$

Transformatorun yüklənmə əmsalından istifadə etsək:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2n}} \approx \frac{\sqrt{3}U_2 I_2}{\sqrt{3}U_{2n} I_{2n}} = \frac{S_{yuk}}{S_n}$$

və nəzərə alsaq ki, $P_2 = \sqrt{3}U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_n \cos \varphi_2$

$$\Delta P_m = P_0 \quad \Delta P_e = 3I_1^2 r_{q1} \approx 3\beta^2 I_{1n}^2 r_{q1} = \beta^2 P_{q1}$$

onda **6.40** düsturunu belə yazı bilərik:

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{q1}} \quad (6.41)$$

Bu düsturdan birfazlı transformatorun f.i.ə.-nin təyini üçün istifadə etmək olar.

6.6. Transformatorlara aid sərbəst işlər

1. Gərginliyin artırılması (yüksəldilməsi) və azaldılması (alçaldılması) lüzumu nə ilə əlaqədardır?
2. Transformatorun yüksək və alçaq gərginlik dolaqlarını hansı xarici əlamətlərlə fərqləndirmək olar?
3. Əgər transformator dövrəyə qoşulmayıbsa, onun yüksəldici olduğunu demək olarmı?

4. Transformatorun hansı dolağı birinci və hansı dolağı ikinci adlanır?
5. Transformatoru iş prinsipini izah edin. İkinci tərəf cərəyanı dəyişdikdə birinci tərəf cərəyanının dəyişməsi necə izah olunur?
6. Qısaqapanma təcrübəsi ilə yarı nominal cərəyanda transformator üçün ΔP_e elektrik itkiləri ölçülmüşdür. Nominal yükə elektrik itkilərini necə tapmaq olar?
7. Eyni nominal güclü iki transformatorun f.i.ə. $\eta_1=0,98$ və $\eta_2=0,96$. Nominal yükə hansı transformator daha çox və neçə dəfə çox istilik ayrılır?
8. Transformator dolaqların səpələnmə e.h.q.-ləri necə ifadə edilir?
9. Tətbiq edilmiş gərginliyin iki dəfə azaldıqda transformatorun yüksüz işləmə cərəyanı necə dəyişər?
10. Transformatorun əvəz sxemini çəkin.
11. Parametrləri $S_n=100$ kVA, $P_0=1,8$ kVt, $P_{qk}=2,4$ kVt, $\cos\varphi_{yük}=0,75$, $\beta=0,65$ olan birfazlı transformatorun f.i.ə.-ni tapmalı.
12. Üçfazlı transformatorun maqnit keçiricisinin üçbucaqlı hazırlanmasının mümkünlüyünü aydınlaşdırın.
13. Avtotransformatorların üstün və nöqsan cəhətlərini göstərin.
14. Ölçü transformatorların vəzifələrini izah edin.

7-ci fəsil

ASİNXRON MAŞINLAR

7.1. Asinxron mühərrikin vəzifəsi və iş prinsipi

Fırlanan maqnit sahəsi vasitəsilə elektrik və mexaniki enerjiləri qarşılıqlı surətdə bir-birinə çevirən dəyişən cərəyan elektrik maşınına asinxron maşın deyilir. Maqnit sahəsini şəbəkədən daxil olan dəyişən cərəyan yaradır. Asinxron maşının mühüm xüsusiyyəti ondan ibarətdir ki, iş zamanı onun fırlanan maqnit sahəsi və rotoru müxtəlif sürətlərlə fırlanır. Elektrik mühərriki rejimində rotorun sürəti maqnit sahəsinin sürətindən kiçik, generator rejimində isə böyük olur. Odur ki, belə maşınlara asinxron maşınlar adı verilmişdir. İstər generator və istərsə də mühərrik rejimində rotorun (maşının hərəkət edən hissəsi) sürəti yükdən asılı olaraq dəyişir.

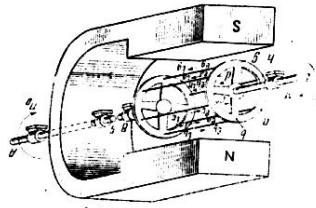
Konstruksiyasının sadəliyinə, ucuz olmasına və istismarda etibarlılığına görə asinxron maşınlar elektrik mühərriki vəzifəsində müxtəlif sənaye və kənd təsərrüfatı qurğularında geniş yayılmışdır.

Asinxron mühərriklərin konstruksiyası əsasən 1889-1891-ci illərdə rus mühəndisi M.O.Dolivo-Dobrovolski tərəfindən işlənmişdir.

Asinxron mühərrikin iş prinsipi şəkil 7.1-də təsvir edilmiş elektromaqnit mexanizminin misalında izah edilir.

İkiqütblü nal şəkilli sabit maqnit $A - A$ oxu ətrafında sabit n_0 sürəti ilə fırlanır.

Maqnitin qütbləri arasında, $B - B$ oxunda naqıl çubuqlardan «dələ qəfəsi» şəklində icra edilmiş baraban –



Şəkil 7.1. Asinxron elektromaqnit mexanizm

rotor yerləşdirilmişdir. Maqnit sahəsinin fırlanması zamanı maqnit xətləri rotorun **a, b, c, ..., h** çubuqlarını kəsib, onlarda e.h.q.-lər **e_a, e_b, e_c, ..., e_h** induksiyalayır. E.h.q.-lərinin təsiri nəticəsində qapalı dövrə olduğuna görə çubuqlarda **i_a, i_b, i_c, ..., i_h** cərəyanları yaranır. Çubuqların induktivliyini nəzərə almasaq, bu cərəyanlar fazaca fiziki e.h.q.-ləri ilə eyni götürülə bilər.

Çubuqlardakı cərəyanlarla maqnit sahəsinin qarşılıqlı təsirindən elektromaqnit qüvvələr **F_{em}** yaranır və bu qüvvələr öz növbəsində fırlandırıcı elektromaqnit momenti **M** doğurur. Bu momentin təsirindən rotor maqnit sahəsinin istiqamətində fırlanmağa başlayır. Rotorun fırlanma sürəti artdıqca çubuqların maqnit sahəsinə nəzərən nisbi sürəti və bunun nəticəsində çubuqlardakı e.h.q.-ləri tədricən azalır. Bununla əlaqədar olaraq rotorun çubuqlarında cərəyanlar və fırlandırıcı moment **M** azalır. Rotorun müəyyən sürətində (**n < n₀**) fırlandırıcı momentlə (**M**) müqavimət momenti (**M_{müq}**) arasında müqavimət yaranır. Müqavimət momenti **M_{müq}** rotor oxunun yastıqlara və rotor çubuqlarının havaya sürtüşməsi ilə əlaqədardır. Müqavimət halında rotor sabit sürətlə fırlanır.

Sabit sürətlə fırlanan rotorun oxuna xaricdən müqavimət momenti əlavə etsək, müqavimət pozular, müqavimət momenti fırlandırıcı momentdən artıq olar. Onda rotor sürətinin azaltmağa başlar və fırlandırıcı moment artır. Sürətin müəyyən təzə qiymətində (**n' < n**) yenidən müqavimət yaranar. Buradan belə çıxır ki, müqavimət momentinin hər bir qiymətində rotorun fırlanma sürətinin müəyyən qiyməti uyğun gəlir. Rotorun sürəti **n** maqnit sürətinin sahəsinə **n₀** çata bilməz, çünki yalnız bu halda rotor çubuqlarında cərəyanlar induksiyalana bilər və fırlandırıcı moment yaranar. Rotorun fırlanma sürətinin maqnit sahəsinin fırlanma sürətindən geri qalmaq dərəcəsi sürüşmə adlanan kəmiyyətlə qiymətləndirilir:

$$\mathbf{s} = \frac{\mathbf{n}_0 - \mathbf{n}}{\mathbf{n}_0} \quad (7.1)$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_0(1 - \mathbf{s}) = \mathbf{n}_0 - \mathbf{s}\mathbf{n}_0 \quad (7.2)$$

Rotorun sürəti $\mathbf{n} = 0$ -dan $\mathbf{n} = \mathbf{n}_0 - \mathbf{a}$ qədər dəyişdikdə sürüşmə $\mathbf{s} = 1$ -dən $\mathbf{s} = 0$ -a qədər dəyişir.

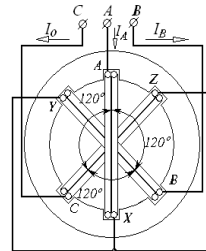
Baxılan mexanizmə elektrik mühərriki deyilir. Burada elektrik enerjisinin mexaniki enerjiyə çevrilməsi getmir, mexaniki enerjinin elektromaqnit üsulla bir oxdan digər oxa ötürülməsi baş verir. Asinxron mühərrikdə isə fırlanan maqnit sahəsi elektrik üsulu ilə yaradılır.

7.2. Fırlanan maqnit sahəsinin alınması

Fırlanan maqnit sahəsinin alınmasını izah etmək üçün şəkil 7.2-də göstərilən vərəqə poladdan yığılmış və içərisində yuvalar açılmış içiboş silindrə müraciət edək.

Silindrin diametral əks yuvalarında A və X , B və Y , C və Z sarğılar sayı eyni olan üç sarğac yerləşdirilmişdir. Bu sarğacların müstəviləri öz aralarında 120° bucaq təşkil edir.

Sarğacla «ulduz» sxemi üzrə birləşdirilib üçfazlı şəbəkəyə qoşulmuşdur. Sarğacın dolaqlarından fazaca üçdə bir period fərqlənən sinusoidal cərəyanlar I_A , I_B , I_C axır. Hər bir sarğac ayrılıqda döyünən maqnit seli yaradır. Bu sellərin oxları uyğun sarğacın oxu ilə bir olur.



Şəkil 7.2. Asinxron mühərrikin üçfazlı dolağı

Döyünən bu üç maqnit selinin birlikdə qiymətcə sabit, istiqamətcə isə sabit bucaq sürəti ilə fırlanan ümumi maqnit seli yaratmasını göstərək.

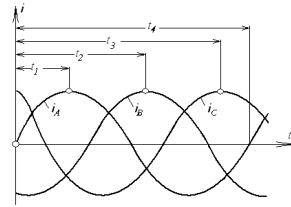
Zamanın bir neçə ardıcıl t_1 , t_2 və t_3 anları üçün (şəkil 7.3) sarğaclarda cərəyanların qiymət və istiqamətini təyin edək.

Cərəyanlar üçün müsbət istiqamət kimi sarğacın əvvəlindən sonuna doğru istiqaməti qəbul edirik.

t_1 anında (şəkil. 7.3 və 7.4,a) i_A cərəyanını və F_A maqnitləşdirici qüvvəsi ($\mathbf{m.q}$) müsbət və maksimal qiymətə malikdir ($I_{\text{mak}}, I_{\text{mak}}\omega$).

i_B və i_C cərəyanları və uyğun olaraq F_B və F_C maqnitləşdirici qüvvələri mənfidir və amplituda qiymətinin yaranmasına bərabərdir $\left(-\frac{1}{2}I_{\text{mak}}, -\frac{1}{2}I_{\text{mak}}\omega\right)$.

$\dot{F}_A, \dot{F}_B, \dot{F}_C$ m.q. vektorlarını toplasaq, nəticəvi m.q. vektorunu $\dot{F}_{\text{net}}$ alarıq. Onun qiyməti $\frac{3}{2}I_{\text{mak}}\omega$ -ə bərabərdir, nəticəvi isə baxılan t_1 anında AX sarğacının oxu istiqamətindədir. $t_2 = t_1 + \frac{T}{3}$ anında (şəkil 7.3, 7.4,b) i_B cərəyanını, F_B m.q. müsbət və maksimal qiymətə malikdir. i_B və i_C cərəyanları, F_A və F_C m.q.-ləri isə mənfidir və amplituda qiymətinin yarısına bərabərdir. Nəticəvi $\dot{F}_{\text{net}}$ m.q. vektoru, quraşdırmadan görüldüyü kimi, öz qiymətini $\frac{3}{2}I_{\text{mak}}\omega$ saxlamış, lakin əvvəlki vəziyyətinə görə 120° dönmüşdür və o, bu halda BY sarğacının oxu istiqamətindədir.



Şəkil 7.3. Üçfazlı cərəyanın qrafiki

$$t_2 = t_1 + \frac{T}{3} \quad \text{anında}$$

cərəyanların və m.q.-lərin paylanması şəkil 7.4,c şəklində təsvir edilmişdir. Burada da

$$F_{\text{net}} = \frac{3}{2} I_{\text{mak}} \omega.$$

Beləliklə sübut etmək olar ki, istənilən anda nəticəvi m.q. qiymətə sabit qalır və $\frac{3}{2} I_{\text{mak}} \omega$ -ə bərabərdir.

Şəkil 7.4,q-də t_A anı üçün də ($i_A = 0$ olduqda) bu müddəə təsvir edilmişdir.

Şəkil 7.4-dəki quraşdırmalardan görünür ki, nəticəvi fırlanan maqnit sahəsi ikiqütblü alınmışdır. Silindrin daxili səthinin maqnit xətləri çıxan hissəsinə şimal qütbü, maqnit xətləri daxil olan hissəsinə isə cənub qütbü kimi baxmaq olar.

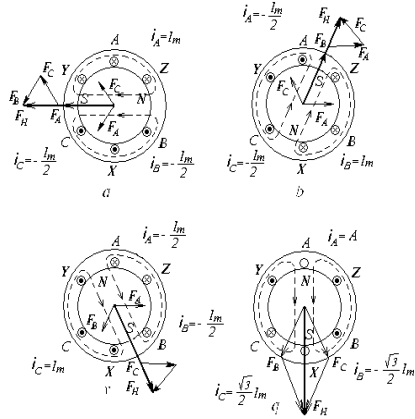
Baxılan şəkillərin müqayisəsindən belə nəticəyə gəlirik:

1. Nəticəvi ikiqütblü maqnit sahəsi bir period ərzində bir dövr edir; fırlanma sürəti

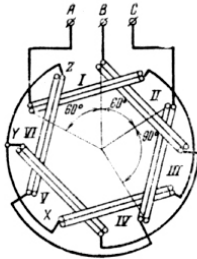
$$n_0 = 60 \cdot f = 60 \cdot 50 = 3000 \text{ dövr/dəq}$$

2. Maqnit sahəsinin fırlanma istiqaməti qidalandırıcı şəbəkənin faza ardıcılığı ilə ($A \rightarrow B \rightarrow C$) eynidir.

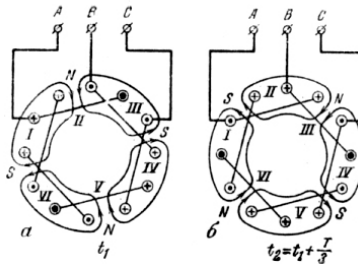
Kiçik fırlanma sürəti almaq üçün sarğacaların sayını 3-dən 6, 9, 12 və s. qədər artırmaq lazımdır. Məsələn, əgər 6 sarğac götürsək, I sarğacının IV sarğacı ilə, II sarğacının V sarğacı ilə və III sarğacını VI sarğacı ilə ardıcıl birləşdirsək



Şəkil 7.4. Üçqütblü fırlanan maqnit sahəsinin alınması



Şəkil 7.5. Dördqütblü
mühərrikin üçfazlı
dolağı



Şəkil 7.6. Dördqütblü mühərrikin
maqnit sahəsi

üçün şəkil 7.6-a baxmaq kifayətdir. Şəkil 7.6,a və b t₁ və

$\mathbf{t}_2 = \mathbf{t}_1 + \frac{\mathbf{T}}{3}$ anları için kurulmuştur. Bu şekillerin

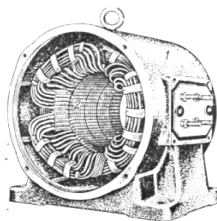
müqayisəsindən görünür ki, üçdə bir period ərzində maqnit sahəsi 60^0 dönmüşdür, yəni dördqütblü maqnit sahəsinin sürəti ikiqütblü maqnit sahəsinin sürətindən iki dəfə kiçik alınır. Sargəcların sayını döqquz götursək, fırlanan maqnit sahəsi altıqütblü alınar və fırlanma sürəti üç dəfə azalar. Beləliklə cüt qütblərin sayı p və şəbəkənin tezliyi f_1 olarsa, fırlanan maqnit sahəsinin sürəti belə təyin edilir:

$$\mathbf{n}_0 = \frac{60\mathbf{f}_1}{\mathbf{p}} \quad (7.3)$$

7.3. Asinxron mühərrikin quruluşu

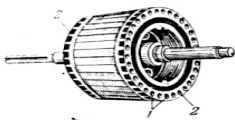
Asinxron mühərrik iki əsas hissədən ibarətdir: tərpənməz stator və fırlanan rotor.

Stator (şəkil 7.7) çuqun və yaxud polad gövdədən (1) və bunun içərisində yerləşdirilmiş elektrotexniki polad vərəqlərdən yığılmış içiboş silindrdən (2) ibarətdir. Silindrin daxili səthində açılmış yuvalarda üçfazlı cərəyan şəbəkəsindən bəslənən və fırlanan maqnit sahəsi yaradan dolaq (3) yığılmışdır.

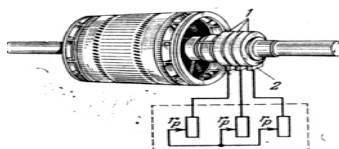


Şəkil 7.7. Asinxron mühərrikin statoru

Rotor (şəkil 7.8 və 7.9) elektrotexniki polad vərəqlərdən yığılmış silindrdən ibarətdir. Rotorun səthində olan yuvalarda rotor dolağı yığılmışdır. Bu dolaq bəsləyici şəbəkə ilə elektrik rabitəsinə malik deyildir. Rotor dolağında axan cərəyan fırlanan maqnit sahəsi vasitəsilə induksiyanır. Rotor dolağının tipindən asılı olaraq, asinxron mühərriklər *qısaqapanmış rotorlu* və *faza rotorlu* mühərriklərə ayrılır.



Şəkil 7.8. Qısaqapanmış dolaqlı rotor



Şəkil 7.9. Faza rotoru

7.4. Asinxron mühərrikin yüksüz işləmə rejimi

Statorun və tərpənməz rotorun elektrik hərəkət qüvvələri

Rotor dolağının açıq halında faza rotorlu asinxron mühərrikdə baş verən hadisələrə baxaq. Stator dolağını üçfazlı cərəyan şəbəkəsinə qoşsaq, bu dolaqdan axan faza

cərəyanları fırlanan maqnit sahəsi yaradacaqdır. Bu maqnit sahəsi n_0 sürəti ilə fırlanacaqdır. Fırlanan maqnit sahəsi stator və rotor dolaqlarını kəsib onlarda elektrik hərəkət qüvvələri induksiylayacaq. Rotor dolağının dövrəsi açıq olduğuna görə ondan cərəyan axmayacaq və fırlandırıcı moment sıfır olacaqdır. Tərpənməz dolaqlarda induksiylanan e.h.q.-lərinin tezliyi

$$f = \frac{pn_0}{60} = \frac{p}{60} \cdot \frac{60f_1}{p} = f_1 \quad (7.4)$$

qidalandırıcı şəbəkənin tezliyinə (f_1) bərabər olacaqdır.

Real maşınlarda stator dolaqları (və faza rotorun) sarğaclarının hər tərəfi bir yuvada deyil, bir neçə qonşu yuvalarda yerləşdirilir. Bununla nəinki stator və rotorun silindrik səth-lərindən yaxşı istifadə edilməsi, həm də maqnit induksiyaının sinusoidal paylanması əldə edilir. Ona görə də sarğacın hər sarğısını kəsən maqnit seli sinus qanunu ilə dəyişir:

$$\Phi = \Phi_{\text{mak}} \sin \omega t$$

Transformatorlarda olduğu kimi, stator və rotor dolağının hər sarğacında induksiya e.h.q.-nin effektiv qiyməti belə təyin olunur:

$$E = 4,44f_1 \omega_1 \Phi_m \quad (7.5)$$

Stator və tərpənməz rotorun hər faza dolağında induksiylanmış e.h.q.-lər belə ifadə edilir:

$$E_1 = E \omega_1 k_1 = 4,44f_1 \omega_1 k_1 \Phi_m \approx 4,44 \omega_1 f_1 \Phi_m \quad (7.6)$$

$$E_2 = E \omega_2 k_2 = 4,44f_1 \omega_2 k_2 \Phi_m \approx 4,44 \omega_2 f_1 \Phi_m \quad (7.7)$$

burada w_1 və w_2 – stator və rotor dolaqlarının sarğılar sayı; k_1 və k_2 – stator və rotor dolaqlarının dolaq əmsallarıdır, bu əmsallar dolağın qonşu sarğılarında e.h.q.-lərinin faza fərqiə malik olmasını nəzərə alır (k_1 və k_2 qiymətləri vahidə yaxındır).

Transformatorla analoji olaraq

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{1f}}{U_{2f}} = k \quad (7.8)$$

nisbətində transformasiya əmsalı deyilir (U_{1f} və U_{2f} – stator və tərpənməz rotor dolaqlarının faza gərginlikləridir).

Asinxron mühərrikin yüksüz işləməsi

Rotor dolağının açıq halında asinxron mühərriki şəbəkəyə qoşduqda rotor tərpənməz qalır. Stator dolağından I_0 cərəyanı axır, rotor dolağında isə cərəyan axmır. Rotorun dolağı qapalı olduqda ondan axan cərəyan sıfır olmaq üçün rotorun sürəti n fırlanan maqnit sahəsinin sürətinə n_0 bərabər olmalıdır. Belə rejimə ideal yüksüz işləmə deyilir, çünki real şəraitdə, yük olmadıqda belə $n < n_0$ olur (mexaniki itkilərə görə). Yüksüz işləmə rejimində də stator dolağından I_0 cərəyanı axacaqdır.

Asinxron mühərrikin yüksüz işləmə cərəyanı statorun nominal cərəyanının **20 – 40%**-ni təşkil edir ($I_0 = \mathbf{0,2 - 0,4 \cdot I_{1n}}$). Asinxron mühərrikin yüksüz işləmə cərəyanının belə böyük olmasına səbəb onun maqnit dövrəsində hava aralığının olmasıdır. Hava aralığı maqnit dövrəsinin müqavimətini artırır və lazımi maqnit selini Φ yaratmaq üçün daha böyük maqnitləşdirici qüvvə $I_0 w_1$ tələb olunur.

7.5. Asinxron mühərrikin dövrələrində gedən elektromaqnit proseslər

Fırlanan rotorun elektrik hərəkət qüvvəsi

Rotor dolağını qısa və ya hər hansı müqavimətlə qapasaq, ondan I_2 cərəyanı axar. Rotor cərəyanı və fırlanan maqnit sahəsinin qarşılıqlı təsirindən yaranan elektromaqnit fırlandırıcı moment rotoru $n < n_0$ sürəti ilə fırlatmağa başlayar.

Sürüşmənin qiyməti $s = \frac{n_0 - n}{n_0}$ mühərrikin

valındakı müqavimət momentinin $M_{müq}$ qiymətindən asılıdır. Mühərrikin tam (nominal) yükündə sürüşmə **2 – 8%** təşkil edir (kiçik qiymətlər daha güclü mühərriklərə aiddir).

n sürəti ilə fırlanan rotor dolağında induksiyaalanmış e.h.q.-nin qiymətini E_{2s} və tezliyini f_2 təyin edək.

Maqnit sahəsinin rotora nisbətən fırlanma sürətinin $(n_0 - n)$ olduğunu nəzərə alsaq, f_2 tezliyini belə taparıq:

$$f_2 = \frac{p(n_0 - n)}{60} = \frac{pn_0}{60} \cdot \frac{n_0 - n}{n_0} = f_1 s \quad (7.9)$$

$f_1 = 50$ Hs olduqda $s = 0,02 - 0,08$ nominal sürüşmələrdə $f_2 = 1 - 4$ Hs olur.

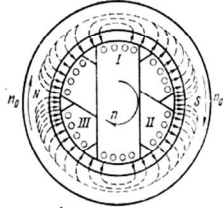
Fırlanan rotor dolağında induksiyaalanmış e.h.q., $f_2 = f_1 s$ olduğunu nəzərə alsaq

$$E_{2s} = 4,44 w_2 f_2 \Phi_m = E_2 s \quad (7.10)$$

olar. E_{2s} e.h.q. tərpənməz rotorda yaranan E_2 e.h.q.-dən dəfələrlə kiçik olur. Məsələn, $s = 0,02 - 0,08$ olduqda, E_{2s} e.h.q. E_2 -nin **2 – 8%**-ni təşkil edir.

Rotor maqnit sahəsi

Rotorun maqnit sahəsinin fırlanan olması onun dolağının üçfazlı olub, bir-birilə 120° bucaq təşkil edən üç sarğacdən ibarət olmasından (şəkil 7.10) irəli gəlir. Maqnit sahəsinin rotora nəzərən nisbi sürəti



$$\frac{60f_2}{p} = \frac{60f_1}{p} s = n_0 s \quad (7.11)$$

Şəkil 7.10. Rotorun fırlanan maqnit sahəsi

Rotorun maqnit sahəsi rotorun fırlanma istiqamətində fırlanır. Rotor maqnit sahəsinin fəzada fırlanma sürəti iki sürətin cəmindən ibarətdir: rotorun özünün mexaniki fırlanma sürəti $n = n_0(1 - s)$ və maqnit sahəsinin rotora nəzərən fırlanma sürəti n_0s :

$$n_0(1 - s) + n_0s = n_0 \quad (7.12)$$

Bu ifadədən görünür ki, istənilən sürüşmədə rotorun maqnit sahəsinin sürəti statorun maqnit sahəsinin sürətinə bərabərdir.

Fırlanan rotorun cərəyanı

Rotor cərəyanı ümumi fırlanan maqnit selinin yaradılmasında iştirak etməkdən başqa, səpələnmə seli də yaradır: $\Phi_{2\sigma}$. Bu sel I_2 cərəyanına mütənasib olub, rotor dolağının hər fazasında səpələnmə e.h.q. yaradır:

$$E_{2\sigma} = 4,44w_2f_2\Phi_{2\sigma} \quad (7.13)$$

Səpələnmə e.h.q.-nin təsirini rotorun induktiv müqavimətində gərginlik düşgüsü ilə nəzərə alırlar:

$\dot{\mathbf{E}}_{2y} = -\mathbf{j}_2 \dot{\mathbf{I}} \mathbf{x}_{2y}$. İnduktiv müqavimətin $\mathbf{x}_{2\sigma}$ qiyməti sürüşmədən asılıdır:

$$\mathbf{x}_{2y} = 2 \mathbf{p} \mathbf{f}_2 \mathbf{L}_2 = 2 \mathbf{p} \mathbf{f}_1 \mathbf{L}_2 \mathbf{s} = \mathbf{x}_2 \mathbf{s} \quad (7.14)$$

burada $\mathbf{L}_2$ – rotor dolağının induktivliyi; $\mathbf{x}_2 = 2\pi f_1 \mathbf{L}_2$ – tərpənməz rotor dolağının induktiv müqavimətidir.

Rotorun dolağından axan cərəyan belə təyin edilir:

$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{E}_{2s}}{\mathbf{z}_2} = \frac{\mathbf{E}_2 \mathbf{s}}{\sqrt{\mathbf{r}_2^2 + (\mathbf{x}_2 \mathbf{s})^2}} \quad (7.15)$$

burada $\mathbf{r}_2$ – rotor dolağının aktiv müqavimətidir.

Rotorun dolağında ən böyük cərəyan işə düşmə halında, $\mathbf{s} = 1$ olduqda yaranır.

Asinxron mühərrikin dolaqlarının maqnitləşdirici qüvvələri

Yüksüz işləmədə rotorun cərəyanı $\mathbf{I}_2 = 0$ olur və mühərrikin maqnit seli stator dolağının maqnitləşdirici qüvvəsi tərəfindən yaradılır:

$$\mathbf{F}_0 = \frac{3}{2} \mathbf{I}_{om} \omega_1$$

Yüklü rejimdə ($\mathbf{I}_2 \neq 0$) ümumi maqnit seli stator və rotorun m.q.-lərinin birgə təsirindən yaranır:

$$\dot{\mathbf{F}}_{net} = \dot{\mathbf{F}}_1 + \dot{\mathbf{F}}_2 = \frac{3}{2} \dot{\mathbf{I}}_{1m} \omega_1 + \frac{3}{2} \dot{\mathbf{I}}_{2m} \omega_2$$

Stator dolağına tətbiq edilmiş gərginliyin amplituda qiyməti sabit qalır və bu gərginlik stator dolağında e.h.q.-ni müvazinətdə saxlayır (stator dolağında gərginlik düşgüsü çox kiçikdir). $\mathbf{E}_1 \approx \mathbf{U}_1 = \text{const}$ bərabərliyi o deməkdir ki,

mühərrikin istənilən iş rejimində ümumi maqnit seli (Φ) təxminən sabit qalır. Buradan mühərrikin maqnitləşdirici qüvvələr tənliyi alınır:

$$\frac{3}{2} \dot{\mathbf{I}}_{1m} \mathbf{w}_1 + \frac{3}{2} \dot{\mathbf{I}}_{2m} \mathbf{w}_2 \approx \frac{3}{2} \dot{\mathbf{I}}_{0m} \mathbf{w}_1 \quad (7.16)$$

Stator cərəyanının ifadəsi üçün alırıq:

$$\dot{\mathbf{I}}_1 = \dot{\mathbf{I}}_0 - \dot{\mathbf{I}}_2 \frac{\mathbf{w}_2}{\mathbf{w}_1} = \dot{\mathbf{I}}_0 + \dot{\mathbf{I}}_2$$

burada $\dot{\mathbf{I}}_2 = -\dot{\mathbf{I}}_2 \frac{\mathbf{w}_2}{\mathbf{w}_1}$ - rotorun çevrilmiş cərəyanıdır.

Stator cərəyanına ($\mathbf{I}_1$) maqnitləşdirici cərəyan ($\mathbf{I}_0$) və rotor cərəyanının maqnitləşdirici təsirini kompensasiya edən çevrilmiş $\dot{\mathbf{I}}_2$ cərəyanının cəmi kimi baxmaq olar.

Asinxron mühərrikin energetik diaqramı

Asinxron mühərrikin aktiv güclər balansını aşağıdakı tənliklə göstərmək olar:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_e = \Delta \mathbf{P}_{1e} + \Delta \mathbf{P}_m + \Delta \mathbf{P}_{2e} + \Delta \mathbf{P}_{mex} - \Delta \mathbf{P}_{1e} + \\ + \Delta \mathbf{P}_m + \Delta \mathbf{P}_{2e} + \Delta \mathbf{P}_{mex} + \mathbf{P} \end{aligned} \quad (7.17)$$

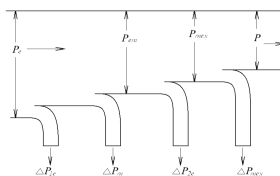
burada $\mathbf{P}_e = 3\mathbf{U}_1 \mathbf{I}_1 \cos \varphi_1$ - mühərrikin şəbəkədən tələb etdiyi güc; $\Delta \mathbf{P}_{1e} = 3\mathbf{I}_1^2 \mathbf{r}_1$ - stator dolağında elektrik itkiləri; $\Delta \mathbf{P}_m$ - stator dolağında maqnit itkiləri (rotorda maqnit itkiləri çox kiçikdir); $\Delta \mathbf{P}_{2e} = 3\mathbf{I}_2^2 \mathbf{r}_2$ - rotor dolağında elektrik itkiləri; $\mathbf{P}_{mex}$ - mühərrikin yaratdığı tam mexaniki güc; $\Delta \mathbf{P}_{mex}$ - mühərrikdə mexaniki itkilər; $\mathbf{P}$ - mühərrikin valında faydalı mexaniki gücdür.

Asinxron mühərrikin aktiv güclər balansını əyani olaraq şəkil 7.11-də energetik diaqramda təsvir edilmişdir.

$$P_{em} = P_e - \Delta P_{1e} - \Delta P_m$$

kəmiyyətində mühərrikin **elektromaqnit gücü** deyilir. Bu güc fırlanan maqnit sahəsi vasitəsilə statordan rotora ötürülür.

Mühərrikin zavod pasportunda nominal rejimdəki faydalı mexaniki güc P göstərilir. Faydalı güc mexaniki gücdən mexaniki itkilər qədər kiçik olur:



Şəkil 7.11. Asinxron mühərrikin energetik diaqramı

$$P = P_{mex} - \Delta P_{mex} \quad (7.18)$$

7.6. Yüklü asinxron mühərrikin əvəz sxemi

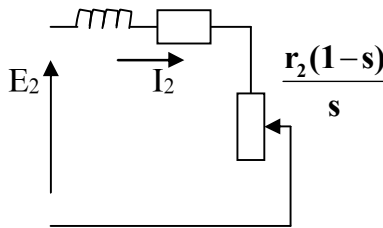
Asinxron mühərrikin stator və rotor dolaqlarının dövrələrindən axan cərəyanlar müxtəlif tezlikli olduğundan (f_1 və f_2) asinxron mühərrik üçün ümumi vektor diaqramı qurmaq olmaz, çünki vektor diaqramında bütün sinusoidal elektrik kəmiyyətləri eyni tezlikli olmalıdır. Lakin fırlanan rotorun həqiqi dövrəsini $f_{\text{tar}} = f_1$ tezlikli tərpənməz rotorun ekvivalent dövrəsi ilə əvəz etsək, onda yüklü asinxron mühərrikin vektor diaqramını və buna uyğun əvəz sxemini çəkə bilərik.

Rotorun ekvivalent dövrəsi elə seçilməlidir ki, mühərrikin şəbəkədən aldığı cərəyan və güc, habelə rotora ötürülən elektromaqnit güc dəyişməz qalsın. Bundan ötrü rotorun cərəyanı I_2 və rotorun cərəyanı ilə e.h.q. arasındakı faza fərqi bucağı ψ_2 həqiqi və ekvivalent dövrələr üçün eyni olmalıdır.

Tərpənməz rotor dövrəsində induksiyaalanan e.h.q. (E_2) fırlanan rotorun e.h.q.-indən $(E_{2s}) \frac{1}{s}$ dəfə böyükdür

[bax: düstur (7.10)]. Ekvivalent tərpənməz rotorda cərəyanın qiymət və fazasını saxlamaq üçün rotor dövrəsinin müqavimətləri də $1/s$ dəfə artırılmalıdır. Deyilənlərin əvəzinə rotor cərəyanının (7.15) düsturunda aşağıdakı çevirməni aparıb, ekvivalent əvəzetmə almaq olar:

$$I_2 = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}} \quad (7.19)$$



Şəkil 7.12. Ekvivalent tərpənməz rotorun əvəz sxem i

Bu ifadədən görürük ki, rotorun aktiv müqavimətini r_2/s -ə bərabər götürməklə fırlanan rotor dövrəsini ekvivalent tərpənməz rotorun dövrəsi ilə əvəz edə bilərik.

Şəkil 7.12-də ekvivalent tərpənməz rotorun əvəz sxemi göstərilmişdir.

Dövrənin aktiv müqaviməti r_2/s iki müqaviməti cəmi kimi götürülmüşdür:

$$r_2 + r_2 \frac{1-s}{s} = \frac{r_2}{s}.$$

Ekvivalent tərpənməz rotorun dövrəsinə transformatorun, müqavimətləri r_2 və x_2 olan və xarici yük müqavimətinə

$$\left(r_{\text{ekv}} = r_2 \frac{1-s}{s} \right)$$

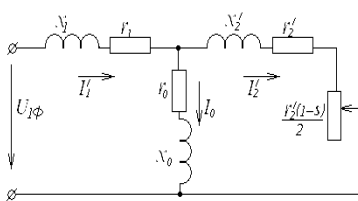
qoşulmuş ikinci dolağının dövrəsi kimi baxmaq olar.

Transformatorada olduğu kimi, asinxron mühərrikin ekvivalent rotor dövrəsinin kəmiyyətlərini statora gətirmək olar:

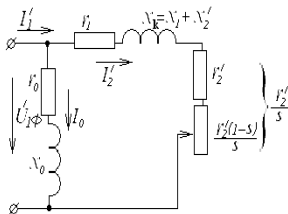
$$\begin{aligned} E'_2 &= E_2 k; \quad I'_2 = I_2 \frac{1}{k}; \quad r'_2 = r_2 k^2; \\ x'_2 &= x_2 k^2; \quad r'_2 \frac{1-s}{s} = r_2 \frac{1-s}{s} k^2. \end{aligned}$$

Bunları nəzərə alıb asinxron mühərrikin əvəz sxemini şəkil 7.13-də göstərilədiyi kimi qurmaq mümkündür.

Asinxron maşınların tədqiqində şəkli sadələşdirilmiş əvəz sxemindən (şəkil 7.14) də istifadə edilir.



Şəkil 7.13. Asinxron mühərrikin tam əvəz sxemi



Şəkil 7.14. Asinxron mühərrikin sadələşmiş əvəz sxemi

7.7. Asinxron mühərrikin fırlandırıcı momenti və mexaniki xarakteristikası

Fırlandırıcı moment

Statordan rotora fırlanan maqnit sahəsi ilə ötürülən elektromaqnit güc asinxron mühərrikin əvəz sxemindən göründüyü kimi rotorun aktiv müqavimətlərində istiliyə ayrılan gücə bərabərdir:

$$P_{em} = 3 I_2'^2 r'_2 + 3 I_2'^2 r_2 \frac{1-s}{s} = 3 I_2'^2 \frac{r'_2}{s} = \frac{\Delta P_{2e}}{s} \quad (7.20)$$

Asinxron mühərrikin energetik diaqramından (şəkil 4.11) mexaniki gücü P_{mex} təyin edirik:

$$P_{\text{mex}} = P_{\text{em}} - \Delta P_{2e} = 3 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} - 3 I_2'^2 r_2' = 3 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s} \quad (7.21)$$

Buradan görünür ki, mexaniki gücə çevrilən elektrik gücü rotor dövrəsinin $r_2' \frac{1-s}{s}$ aktiv müqavimətindəki istiliyə çevrilən gücə bərabərdir.

Mühərrikin mexaniki gücünü rotorun yaratdığı elektromaqnit moment (M) və rotorun bucaq sürəti ilə (Ω) ifadə edək:

$$P_{\text{mex}} = M\Omega = M\Omega_0(1-s) \quad (7.22)$$

burada $\Omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}$ – fırlanan maqnit sahəsinin bucaq sürətidir.

Bu tənlikdə güc Vattla, Moment Nyuton-metr ($\text{N}\cdot\text{m}$) ilə ifadə edilmişdir. (7.21) və (7.22) ifadələrini və

$$\Omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{\pi n_0}{30}(1-s)$$

nəzərə alsaq, fırlandırıcı moment üçün yazı bilərik:

$$M = \frac{28,6}{n_0} I_2'^2 \frac{r_2'}{s} \quad (7.23)$$

Mühərrikin sadələşmiş əvəz sxemindən (şəkil 7.14) rotor cərəyanını təyin edək:

$$I_2' = \frac{U_{\text{fr}}}{\sqrt{\left(\mathbf{r}_1 + \frac{\mathbf{r}_2'}{\mathbf{s}}\right)^2 + \mathbf{x}_k^2}} \quad (7.24)$$

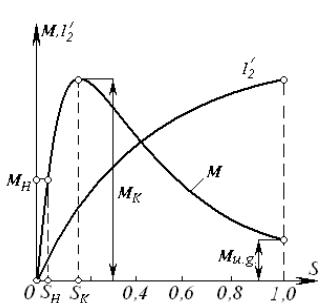
I_2' -in bu ifadəsini (7.23) düsturunda yerinə yazsaq, asinxron mühərrikin fırlandırıcı momenti üçün aşağıdakı düsturu alırıq:

$$\mathbf{M} = \frac{28,6 U_{\text{fr}}^2 \frac{\mathbf{r}_2'}{\mathbf{s}}}{\mathbf{n}_0 \left[\left(\mathbf{r}_1 + \frac{\mathbf{r}_2'}{\mathbf{s}} \right)^2 + \mathbf{x}_k^2 \right]} \quad (7.25)$$

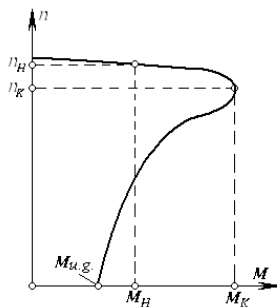
Bu ifadədən görürük ki, gərginliyin verilmiş qiymətində (U_{fr}) fırlandırıcı moment yalnız sürüşmədən ($\mathbf{s}$) asılıdır.

Mexaniki xarakteristika

Şəkil 7.15-də (7.24) və (7.25) düsturlarına əsasən asinxron mühərrik üçün $\mathbf{M}(\mathbf{s})$ və $I_2'(\mathbf{s})$ qrafikləri göstərilmişdir. $\mathbf{M}(\mathbf{s})$ qrafikindən istifadə edib, $\mathbf{n} = \mathbf{n}_0(1 - \mathbf{s})$ düsturunu alaraq $\mathbf{n}(\mathbf{M})$ qrafikini qurmaq çətin deyildir (şəkil 7.16). $\mathbf{M}(\mathbf{s})$ və $\mathbf{M}(\mathbf{n})$ asılılıqlarına asinxron mühərrikin **mexaniki xarakteristikaları** deyilir.



Şəkil 7.15. $M(s)$ və $I_2'(s)$ ayrıləri



Şəkil 7.16. Asinxron mühərrikin mexaniki xarakteristikası

İşədüşmənin əvvəlində ($s=1$) mühərrikin yaratdığı *işədüşmə* momenti bərabərdir:

$$M_{id} = \frac{28,6U_{1f}^2 r_2'}{n_0 \left[\left(r_1 + r_2' \right)^2 + x_k^2 \right]} \quad (7.26)$$

Sürüşmə azaldıqca, yəni mühərrikin fırlanma sürəti artdıqca onun yaratdığı moment artır və sürüşmənin müəyyən qiymətində (s_k) ən böyük (kritik) qiymətini (M_k) alır. Sürüşmənin sonrakı azalmasında ($s < s_k$) mühərrikin momenti azalır və $s = 0$ olduqda ($n = n_0$) sıfır olur.

Kritik sürüşmə və kritik momenti təyin edək. Bundan ötrü (7.25) ifadəsini s -ə görə diferensiallayıb, sıfıra bərabər etmək lazımdır:

$$\frac{dM}{ds} = 0 \quad (7.27)$$

Bunun nəticəsində kritik sürüşmə üçün təyin edirik ki,

$$s_k = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}$$

Mühərriklər üçün $x_k > r_1$ və deməli, $x_k^2 \gg r_1^2$ olduğuna görə r_1 -i nəzərdən atmaq olar. Onda təxmini düstur alırıq:

$$s_k \approx \frac{r_2'}{x_k} \quad (7.28)$$

Kritik momentin ifadəsi:

$$M_k = \frac{14,3}{n_0} \cdot \left[\frac{U_{1f}^2}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \right] \approx \frac{14,3}{n_0} \cdot \frac{U_{1f}^2}{x_k} \quad (7.29)$$

Təcrübədə mühərrikin mexaniki xarakteristikasını qurmaq üçün M_k/M ifadəsindən istifadə edirlər. Bu ifadə $r_1 = 0$ qəbul edilmiş hal üçün təyin edilir:

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (7.30)$$

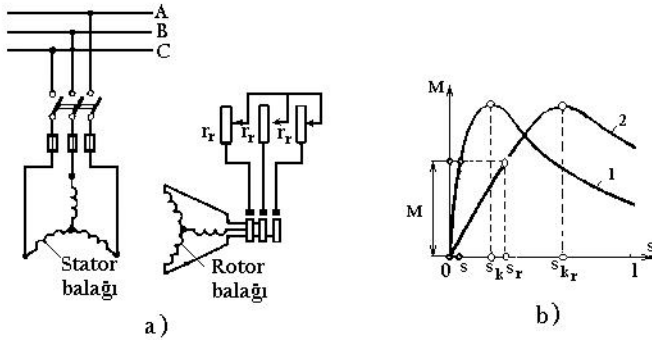
buradan

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (7.31)$$

Mühərrikin reostat xarakteristikaları

Faza rotoru dövrəsinə r_r müqavimətli reostat qoşsaq (şəkil 7.17,a), mühərrikin fırlandırıcı momenti belə təyin edilir:

$$M = \frac{28,6U_{1f}^2 \frac{r'_2 + r'_r}{s}}{n_0 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2 + r'_r}{s} \right)^2 + x_k^2 \right]} \quad (7.32)$$



Şəkil 7.17. Asinxron mühərrikin təbii və reostat xarakteristikaları

Bu hal üçün kritik sürüşmə

$$s_{k.r.} = \frac{r'_2 + r'_r}{x_k} \quad (7.33)$$

(7.32) düsturu üzrə $M(s)$ və $M(n)$ qrafiklərini qura bilərik. Mühərrikin sıxaclarında gərginlik nominal olduqda və onun dövrlərində əlavə müqavimətlər olmadıqda qurulmuş mexaniki xarakteristikaya mühərrikin **təbii-mexaniki xarakteristikası** deyilir. Faza rotoru dövrəsinə reostat daxil etdikdə mühərrikin **reostat-mexaniki xarakteristikalarını** alırıq.

Şəkil 7.17,a-da 1 mühərrikin təbii ($r_r = 0$) və 2 reostat ($r_r \neq 0$) mexaniki xarakteristikaları göstərilmişdir.

Mühərrikin dayanıqlı işləməsi

$M(s)$ əyrisinin $s=0$ -dan $s = s_k$ -ya qədər hissəsi xarakteristikanın *dayanıqlı*, $s = s_k$ -dan $s = 1$ -ə qədər hissəsi isə *dayanıqsız* hissəsi adlanır. Xarakteristikanın dayanıqlı hissəsində işlədikdə hər hansı təsadüfi səbəbdən müqavimət momentinin artması fırlanmanın yavaşmasına səbəb olur. Bu zaman sürüşmə artır, mühərrikin fırlandırıcı momenti artır və yeni müvazinət vəziyyəti yaranır. Müqavimət momentinin azalması mühərrikin yeyinləşməsinə səbəb olur və yenidən daha böyük sürətdə müvazinət yaranır. Xarakteristikanın dayanıqsız hissəsində işlədikdə hər hansı təsadüfi səbəbdən rotor sürətinin azalması mühərrikin dayanmasına, sürətin artımı isə mühərrikin yeyinləşib dayanıqlı hissəyə keçməsinə səbəb olur.

Mühərrikin kataloq göstəricilərinə əsasən təbii-mexaniki xarakteristikasının qurulması

Kataloqlarda və texniki sorğu kitablarında asinxron mühərriklər üçün işə düşmə və kritik momentlərin nominal momentı olan nisbətləri verilir:

$$\frac{M_{i.d}}{M_{nom}} = \delta, \quad \frac{M_k}{M_{nom}} = \lambda$$

$M_{i.d.}$ və M_k -nin ədədi qiymətlərini tapmaq üçün əvvəlcə M_{nom-i} (Nm) nominal gücə P_{nom} (kVt) görə təyin etmək lazımdır:

$$M_{nom} = 9550 \frac{P_{nom}}{n_{nom}} \quad (7.34)$$

Kataloqdan məlum δ , λ , P_{nom} , n_{nom} kəmiyyətlərə görə və (4.25), (4.29) düsturlarına əsasən mexaniki xarakteristikaları qurmaq olar. (7.31) düsturundan istifadə etdikdə hesabat daha sadə alınır:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

Bundan ötrü əvvəlcə kritik sürüşməni s_k belə təyin edirlər:

$$\frac{M_{nom}}{M_k} = \frac{1}{\lambda} = \frac{2}{\frac{s_{nom}}{s_k} + \frac{s_k}{s_{nom}}} \quad (7.35)$$

buradan

$$s_k = s_{nom} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) \quad (7.36)$$

M_k və s_k -nın qiymətini bilib, (7.31) düsturundan istifadə etməklə $M(s)$ əyrisini qurmaq olar.

Kritik momentin qiymətinə görə mühərrikin artıq yüklənmə qabiliyyəti təyin edilir. Normal icralı asinxron mühərriklər üçün artıq yüklənmə qabiliyyəti $\lambda = 1,6 - 2,5$.

İşə düşmə momentinin qiymətinə görə mühərrikin işə düşməsinin mümkünlüyü təyin edilir (δ). Mühərrikin işə düşə bilməsi üçün

$$M_{i.d.} > M_{müq.baş}$$

olmalıdır. Burada $M_{müq.baş}$ – istehsal mexanizminin işə düşmə anında statik müqavimət momentidir.

Momentin düsturundan görüldüyü kimi, sürüşmənin verilmiş qiymətində moment gərginliyin kvadratı ilə düz mütənasıbdır. Bununla əlaqədar olaraq şəbəkənin gərginliyinin azalması mühərrikin işinə mənfi təsir göstərir. İşə düşmə və kritik momentlərin sərt azalması ağır istehsal mexanizmlərinin işə düşməsinə çətinləşdirir, bəzən isə qeyri-

mümkün edir və mühərrikin qısamüddətli artıq yüklənmə qabiliyyətini azaldır.

Gərginliyin artması ($U > U_{nom}$) asinxron mühərrikin tələb etdiyi reaktiv gücün artmasına səbəb olur və bu da arzu edilməz haldır.

Bununla əlaqədar olaraq «Elektrik qurğularının quruluş qaydaları»nda mühərriklərin sıxaclarında gərginliyin nominal qiymətdən yol verilən fərqlənməsi $\pm 5\%$ qəbul edilmişdir.

7.8. Asinxron mühərrikin energetik göstəriciləri

Asinxron mühərrikdə güc itkiləri ΔP və tələb edilən reaktiv güc Q onun əsas istismar göstəricilərini təyin edir. Bu göstəricilər mühərrikin faydalı iş əmsalı η (f.i.ə.) və güc əmsalı $\cos\varphi$ -dir.

Mühərrikin f.i.ə.

Energetik diaqramda (şəkil 7.11) itkilərin cəmini aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{1e} + \Delta P_m + \Delta P_{2e} + \Delta P_{mex} = \Delta P_c + \Delta P_y$$

Bu ifadədə $\Delta P_y = 3(I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2)$ yükdən asılı olan dəyişən itkilər. $\Delta P_c = \Delta P_m + \Delta P_{mex}$ yüksüz işləmə itkilərinə bərabər sabit itkilərdir.

Mühərrikin yüklənmə əmsalının

$$\beta = \frac{P}{P_{nom}} \approx \frac{M}{M_{nom}} \approx \frac{s}{s_{nom}}$$

olduğunu nəzərə alsaq, rotor cərəyanının

$$\mathbf{I}_2' = \frac{\mathbf{E}_2'}{\sqrt{\left(\frac{\mathbf{r}_2'}{s}\right)^2 + \mathbf{x}_2'^2}} \approx \frac{\mathbf{E}_2' s}{\mathbf{r}_2'} = \frac{\mathbf{B} \mathbf{E}_2'}{\mathbf{r}_2'} s_{\text{nom}}$$

və stator cərəyanının

$$\dot{\mathbf{I}}_1 = \dot{\mathbf{I}}_0 + \dot{\mathbf{I}}_2'$$

yüklənmə əmsalına mütənasib olduğunu görürük. Onda dəyişən itkilər yüklənmə əmsalının kvadratı ilə mütənasib olar:

$$\Delta P_y = \Delta P_{y,\text{nom}} \beta^2$$

burada $\Delta P_{y,\text{nom}}$ – nominal yükə dəyişən itkilərdir.

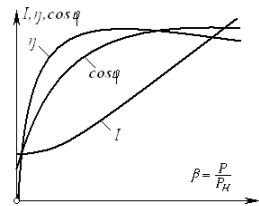
Bu asılılıqlardan istifadə etsək, mühərrikin f.i.ə. üçün alırıq:

$$\eta = \frac{P}{P + \sum \Delta P} = \frac{\beta P_{\text{nom}}}{\beta P_{\text{nom}} + \Delta P_c + \beta^2 \Delta P_{y,\text{nom}}} \quad (7.37)$$

$\eta(\beta)$ qrafikindən görünür ki, (şəkil 7.18) mühərrikin yükünün geniş həddə dəyişməsi y.i.ə.-nin azacıq dəyişməsinə səbəb olur. Bu isə əlverişli haldır.

Mühərrikin güc əmsalı

Asinxron mühərrikin tələb etdiyi reaktiv gücü əvəz sxeminə görə (şəkil 7.13) təyin edə bilərik:



Şəkil 7.18. Asinxron mühərrikin işçi xarakteristikaları

$$Q = 3I_1^2 x_1 + 3I_0^2 x_0 + 3I_2'^2 x_2' = Q_0 + Q_2 \quad (7.38)$$

Bu ifadədən görünür ki, tələb edilən reaktiv gücün bir hissəsi Q_0 yükün qiymətindən asılı deyildir, digər hissəsi Q_2 isə yükdən asılıdır və yüklənmə əmsalının kvadratı ilə (β^2) mütənasibdir. Mühərrikin güc əmsalı

$$\cos\varphi = \frac{P_e}{\sqrt{P_e^2 + Q^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q}{P_e}\right)^2}} \quad (7.39)$$

$\cos\varphi(\beta)$ qrafikindən (şəkil 7.18) görünür ki, mühərrik az yükləndikdə güc əmsalı çox kiçik olur. Bu isə energetik nöqteyi-nəzərdən əlverişli deyildir. Odur ki, asinxron mühərrikin yüksək $\cos\varphi$ ilə işləməsi üçün o tam yüklənməlidir.

7.9. Asinxron generator

Asinxron maşın təkcə mühərrik kimi deyil, müəyyən şəraitdə elektrik enerjisi generatoru kimi də işləyə bilər.

Əgər üçfazlı şəbəkəyə qoşulmuş asinxron maşının rotoru fırlanan maqnit sahəsinin istiqamətində sinxron sürətdə (n_0) böyük sürətlə (n) fırlandırılrsa, rotorun sürüşməsi mənfi olar:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} < 0$$

(7.20) bərabərliyindən belə nəticə çıxarmaq olar ki, elektromaqnit güc P_{em} -də mənfi olacaqdır:

$$P_{em} = \frac{\Delta P_{2e}}{s}$$

Bu isə enerjinin fırlanan maqnit sahəsi vasitəsilə rotordan statora ötürülməsinə sübutdur. Yəni asinxron

maşın mexaniki enerjini elektrik enerjisinə çevirib şəbəkəyə verəcəkdir, başqa sözlə, generator rejimində işləyəcəkdir.

Asinxron generatorun aktiv gücünü generatoru fırlandıran mühərrikin sürətini dəyişməklə tənzim edirlər.

Asinxron generatorun mənfi cəhəti şəbəkədən fırlanan maqnit sahəsi yaratmaq üçün böyük reaktiv güc tələb etməsidir. Buna baxmayaraq, asinxron generatorlardan külək güc qurğularında və kiçik kənd su-elektrik stansiyalarında istifadə edilir.

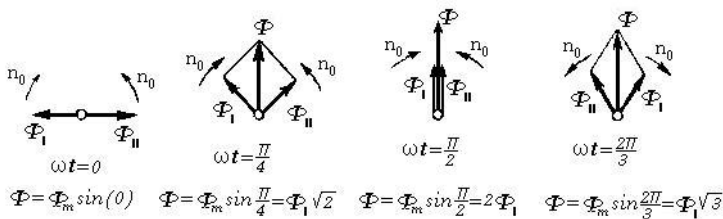
7.10. Asinxron mikromühərriklər

Birfazlı mühərriklər

Birfazlı asinxron mühərrikin statoru bir dolağa malikdir; rotor isə «dələ qəfəsi» şəklində qısa qapanmış halda hazırlanır. Mühərriki şəbəkəyə qoşduqda stator dolağının yaratdığı maqnit seli döyünən olur, fırlanan olmur: $\phi = \Phi_m \sin \omega t$. Döyünən maqnit selini müxtəlif istiqamətdə fırlanan iki eyni sabit qiymətli sel ilə əvəz etmək olar:

$$\Phi_I = \Phi_{II} = \frac{\Phi_m}{2}$$

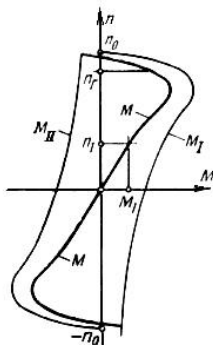
Buna inanmaq üçün (şəkil 7.19) diaqramlara baxmaq kifayətdir.



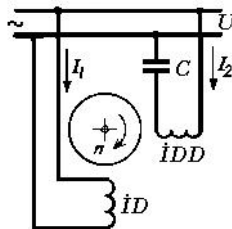
Şəkil 7.19. Döyünən maqnit selinin iki fırlanan selə ayrılması

Rotorun tərpənməz halında hər iki fırlanan selin yaratdıqları fırlandırıcı momentlər bir-birini müvazinətləşdirir və rotor heç bir tərəfə fırlanmır (şəkil 7.20).

Təcrübə göstərir ki, əgər rotoru hər hansı istiqamətdə fırlatsaq, sonradan kənardan təsir olmadan rotor həmin istiqamətdə fırlanmasını davam etdirəcəkdir. Rotorla eyni istiqamətdə fırlanan maqnit sahəsinə **düz**, əks istiqamətdə fırlanan sahəyə isə **əks-sahə** deyilir.



Şəkil 7.20. Birfazlı asinxron mühərrikin mexaniki xarakteristikası



Şəkil 7.21. Əlavə işə düşmə dolağı olan birfazlı asinxron mühərrik

Bir fazalı asinxron mühərrikdə başlanğıc işədənə momenti yaratmaq üçün onu əlavə quruluşla təchiz edirlər. Adətən, işədənə momenti yaratmaq üçün birfazlı mühərrik əlavə işəsalıcı dolaqla **İSD** təchiz edilir. Bu dolaq statorda elə yerləşdirilir ki, onun maqnit seli işçi dolağın (**İD**) selindən fəzada **90°** sürüşmüş halda olsun (şəkil 7.21). Bundan başqa, işəsalıcı dolağa ardıcıl olaraq kondensator **C** qoşulur. Bu ondar ötrü edilir ki, **I₁** və **I₂** cərəyanları arasında **90°**-yə yaxın faza fərqi yaransın. Nəticədə fəzada **90°** sürüşdürülmüş halda yerləşdirilmiş iki dolaqdan fazaca

fərqli cərəyanların axması fırlanan maqnit seli yaradır. Bu sel kifayət qədər fırlandırıcı moment yaradır. İşəsalıcı dolağın ölçülərini azaltmaq üçün onu qısamüddətli qoşulmaya hesablayırlar. Mühərrik normal sürətini aldıqda əlavə dolaq açılır.

Kondensatorlu mühərrik. Axır zamanlar kondensatorlu mühərriklər tətbiq edilməyə başlanmışdır. Bu mühərriklərin kondensatorlu işəsalıcı dolağı uzunmüddətli işə hesablanmışdır və iş müdətində qoşulmuş halda qalır. Belə mühərriklər böyük maksimal momentə və yüksək $\cos\varphi$ -ə malikdir.

Birfazlı mühərriklərdən elektrik məişət qurğularında geniş istifadə edilir (soyuducularda, yuyucu maşınlarda və s.).

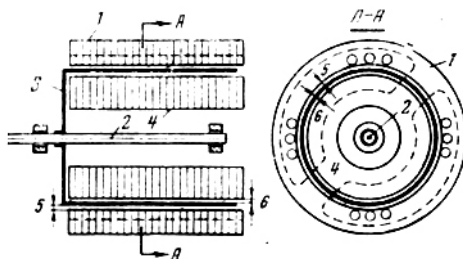
Müqaviməti artırılmış dolaqlı rotoru olan birfazlı asinxron mühərrik

Avtomatik sxemlərdə bu mühərriklər geniş yayılmışdır. Birfazlı mühərrikin rotor dolağının müqavimətini (r_2) artırısaq, r_2 -nin müəyyən qiymətində mühərrik başlanğıc sürət aldıqdan sonra müstəqil fırlanma qabiliyyətini itirir və dayanır. Müqaviməti artırılmış dolaqlı rotoru olan mühərriki işəsalıcı dolaqla təchiz etsək, o, müstəqil fırlana bilər. Bu mühərrikdə işəsalıcı dolaq rolunu idarə dolağı oynayır. İdarə dolağı qidamı avtomatika sxeminin elementlərindən müəyyən signal gəldikdə alır. Signal kəsildikdə idarə dolağının qidası kəsilir və mühərrik dayanır.

İçiboş rotorlu asinxron mühərrik. Avtomatik quruluşların sxemlərində kiçik güclü (vattın hissələrindən bir neçə yüz vatta qədər) içiboş rotorlu ikifazlı asinxron mühərriklər geniş tətbiq edilir. Belə mühərrikin konstruktiv quruluşu sxemi olaraq şəkil 7.22-də göstərilmişdir.

Mühərrikin statoru (1) adi konstruksiyaya malikdir, onun yuvalarında oxları 90° sürüşdürülmüş iki dolaq

(təsirləndirici dolaq və idarə dolağı) yerləşdirilmişdir. Mühərrikin valında (2) içiboş rotorlu (3) oturdulmuşdur. Rotor nazikdivarlı stəkan şəklindədir, dolaqsızdır. Rotor qeyri-ferromaqnit materialdan (alüminiumdan) hazırlanır.



Şəkil 7.22. İçi boş rot orlu asinxron mühərrikin quruluşu

Rotorun daxilində elektrotexniki polad vərəqlərdən yığılmış silindrik tərpənməz nüvə (4) yerləşdirilmişdir. Onun vəzifəsi maqnit selinin yolunda maqnit müqavimətini (R_{maq}) azaltmaqdır. Maqnit seli dörd dəfə hava aralığından (5 və 6, isiboş rotorun xaricindən və daxilindən) keçir.

Stator dolaqlarından keçən cərəyanlar fırlanan maqnit sahəsi yaradır. Bu sahə içiboş rotoru kəsib onda burulğan cərəyanlar yaradır. Bu cərəyanlarla fırlanan maqnit sahəsinin qarşılıqlı təsirindən fırlandırıcı elektromaqnit moment yaranır və rotor $n < n_0$ sürəti ilə fırlanmağa başlayır. Çəkisi az olduğuna görə rotorun ətaləti kiçik olur və buna görə bu mühərrikin avtomatik quruluşlarda tətbiqi böyük əhəmiyyət kəsb edir.

7.11. Müxtəlif iş rejimləri üçün elektrik mühərrikinin gücünün seçilməsi

Elektrik intiqalının tələb etdiyi gücü təyin edərkən onun həm qərarlaşmış və həm də keçid rejimlərindəki yükü nəzərə alınmalıdır. Uzunmüddətli iş rejimində işçi

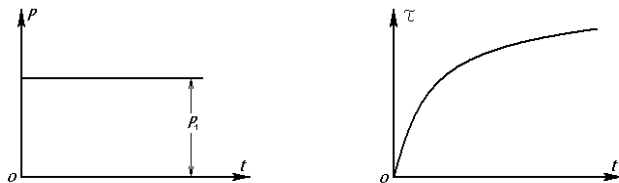
mexanizmin yükü sabit ola bilər və ya müəyyən qanunla dəyişə bilər. Birinci halda elektrik mühərrikinin temperaturu sabit, ikinci halda isə yükə asılı olacaqdır. Yüknün sabit halında elektrik mühərriki aşağıdakı qayda ilə seçilir.

Mexanizmin verilmiş P_1 yükünə əsasən və onun f.i.ə. nəzərə alınmaqla, kataloqdan bu gücdə və ya buna yaxın böyük güclü elektrik mühərriki seçilir:

$$P_n = \frac{P_1}{3}$$

Seçilən elektrik mühərriki işəsalınma itkilərinə görə bir daha yoxlanılır, çünki işəsalınma halları belə iş rejimində çox azdır.

Şəkil 7.23-də göstərilən iş rejimi üçün gücün və temperaturun zamandan asılılığı qrafikləri verilir. Bu cür yük qrafikinə malik olan mexanizmlərə misal olaraq ventilyator, kompressor və mərkəzdənqaçma nasosları göstərilə bilər.



Şəkil 7.23. Uzunmüddətli iş rejimi üçün və temperaturun zamandan asılılığı qrafikləri

İşçi mexanizmlərin çoxunda yük sabit qiymətdə qalmayıb müəyyən hədlərdə dəyişir. Bu halda intiqal mühərrikinin gücünün yükün orta qiymətinə görə seçilməsi düzgün olmaz, çünki mühərrikdəki istilik itkiləri yük

cərəyanının kvadratı ilə mütənasibdir. Orta yükə görə seçilmiş mühərrik artıq qızacaqdır.

Təcrübədə mühərriklərin qızmaya yoxlanmasında yaxınlaşma metodlarından istifadə edilir ki, bunlardan da ən sadəsi ekvivalent (orta kvadratik) kəmiyyətlər üsuludur.

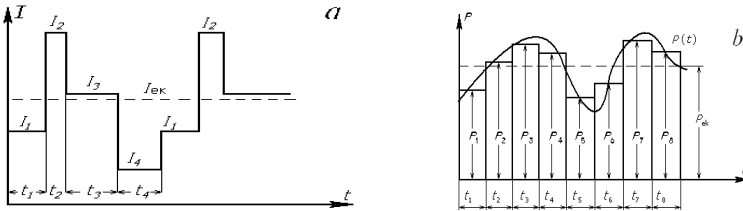
Şəkil 7.24-də dəyişən yükdə mühərrikin sərf etdiyi cərəyanın qrafiki göstərilmişdir. Həqiqi yük cərəyanı I , dəyişməz qiymətli I_{ekv} cərəyanı ilə əvəz edilə bilər. Bu cərəyanın yaratdığı itkilər:

$$I_{\text{ekv}}^2 r = \frac{(I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n) r}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

burada r – mühərrik dövrəsinin aktiv müqavimətidir.

Buradan

$$I_{\text{ekv}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$



Şəkil 7.24. Yük qrafikləri: a) ekvivalent cərəyan;
b) ekvivalent güc

Seçilmiş mühərrik qızma şərtlərini o halda ödəyir ki, $\Delta P_{\text{ekv}} \leq \Delta P_n$ olsun. Bu münasibəti başqası ilə əvəz etmək olar:

$$I_{\text{ekv}} \leq I_n$$

Əgər mühərrikin yük diaqramı $M(t)$ asılılığı şəklində verilmişsə və mühərrikin momenti cərəyanla mütənasib qəbul edilərsə ($M \equiv I$), onda ekvivalent momenti belə hesablamaq olar:

$$M_{\text{ekv}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

Sürəti az dəyişən intiqallar üçün bu ifadəni ekvivalent gucə görə yazmaq olar, çünki mühərrikin gücü fırlandırıcı momentlə mütənasibdir:

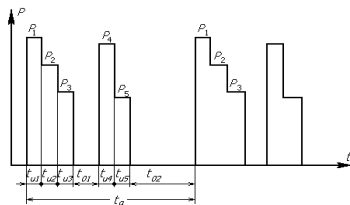
$$P_{\text{ekv}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

$M_{\text{ekv}} \leq M_n$ və ya $P_{\text{ekv}} \leq P_n$ isə mühərrik qızma şərtlərini ödəyir.

Əgər $I(t)$, $M(t)$, yaxud $P(t)$ yüklər qrafiki əyrixətli xarakter daşıyırsa, onu ekvivalent pilləli qrafiklə əvəz etmək lazımdır (şəkil 7.24,b).

Təkrar-qısamüddətli iş rejiminə malik istehsal mexanizmləri həqiqətdə xeyli mürəkkəb yük diaqramlarına malikdir (şəkil 7.25).

Təkrar-qısamüddətli iş rejimi üçün mühərrik seçdikdə həqiqi yük qrafiki tipik ekvivalent qrafiklə əvəz edilir. Bu halda ekvivalent güc aşağıdakı düsturla hesablanır:



Şəkil 7.23. Təkrar-qısamüddətli iş rejimində $P(t)$ yük diaqramı

$$P_{\text{ekv}} = \sqrt{\frac{P_{u1}^2 t_{u1} + P_{u2}^2 t_{u2} + \dots + P_{un}^2 t_{un}}{t_{u1} + t_{u2} + \dots + t_{un}}}$$

burada $P_{u1}, P_{u2}, \dots, P_{un}$ – mühərrikin $t_{u1}, t_{u2}, \dots, t_{un}$ zaman periodlarında müvafiq yükləridir. Bu halda ekvivalent güc fasilələr və yüksüz zamanlar nəzərə alınmadan tapılır.

Əgər mexanizmin həqiqi iş rejimi standart nisbi qoşulma **müddətinə** (ΠB_{st}) uyğun gəlmirsə, ekvivalent güc standart qiymətə görə belə təyin edilir:

$$P_{ekv.st} = P_{ekv.haq} \sqrt{\frac{\Pi B_{haq}}{\Pi B_{st}}}$$

burada $P_{ekv.haq}$ – həqiqi ekvivalent güc; ΠB_{haq} – həqiqi nisbi qoşulma müddətidir.

$P_{ekv.st}$ -in qiymətinə görə təkrar-qısamüddətli rejim üçün mühərrik standart ΠB_{st} %-ə uyğun olaraq

$$P_n \leq P_{ekv.st}$$

şərtinə əsasən seçilir.

7.12. Asinxron maşınlar və müxtəlif iş rejimləri üçün elektrik mühərrikinin gücünün seçilməsinə aid məsələlərin həlli metodikası

Məsələ 7.12.1

Dördqütblü asinxron mühərrik **60 Hs** tezlikli üçfazlı şəbəkəyə qoşulmuşdur. Nominal sürüşməsi **3%**-dir. Rotorun fırlanma sürətini və rotor cərəyanının tezliyini tapmalı.

Həlli. Rotor cərəyanının tezliyi

$$f_2 = f_1 s = 60 \frac{3}{100} = 1,8 \text{ Hs}$$

Rotorun fırlanma sürəti

$$n = n_0(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s) = \frac{60 \cdot 60}{2}(1-0,03) = 1746 \text{ dövr/dəq}$$

Məsələ 7.12.2

Dördqütblü faza rotorlu asinxron mühərrikin parametrləri belədir: $r_1 = 0,275 \text{ Om}$, $r_2 = 0,335 \text{ Om}$, $x_r = 1,03 \text{ Om}$. Stator və rotor dolaqları ulduz birləşdirilmişdir. Şəbəkənin xətt gərginliyi $U = 380 \text{ V}$. Transformasiya əmsali $k = 1,2$.

Təyin etməli: 1) rotor dövrəsinin işə düşmə cərəyanının və mühərrikin reostatsız işə düşmə momentini; 2) kritik momenti və kritik sürüşməni; 3) işə düşmə cərəyanının iki dəfə azaltmaq üçün işəsalıcı reostatın müqavimətini və bu hal üçün işə düşmə momentini.

Həlli. Fırlanan maqnit sahəsinin sürəti

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ dövr/dəq}$$

Sadələşmiş əvəz sxeminə (şəkil 7.14) əsaslanaraq, mühərrikin işə düşmə anında ($s = 1$) işə düşmə cərəyanını belə tapmaq olar:

$$\begin{aligned} I_{2.i.d} &= I_{2.i.d} \cdot k = \frac{U_{1\Phi} \cdot k}{\sqrt{\left(r_1 - r_1\right)^2 + x_k^2}} = \\ &= \frac{220 \cdot 1,2}{\sqrt{(0,275 + 0,35)^2 + 1,03^2}} = 221 \text{ A} \end{aligned}$$

İşə düşmə momenti

$$\begin{aligned} M_{i.d} &= \frac{28,6 U_{1\Phi}^2 r_2}{n_0 \left[\left(r_1 + r_2\right)^2 - x_r^2 \right]} = \\ &= \frac{28,6 \cdot 220^2 \cdot 0,335}{1500 \left[(0,275 + 0,335)^2 + 1,03^2 \right]} = 242 \text{ Hm} \end{aligned}$$

Kritik moment

$$\begin{aligned} M_k &= \frac{14,3 U_{1\Phi}^2}{n_0 \left(r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_r^2} \right)} = \\ &= \frac{14,3 \cdot 220^2}{1500 \left(0,275 + \sqrt{0,375^2 + 1,03^2} \right)} = 360 \text{ Hm} \end{aligned}$$

Kritik sürüşmə

$$s_k = \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_r^2}} = \frac{0,335}{\sqrt{0,275^2 + 1,03^2}} = 0,313$$

İşəsalıcı reostat qoşduqda işədüsmə cərəyanı

$$I_{2i.d.r} = \frac{I_{2i.d}}{2} = \frac{221}{2} = 110,5 \text{ A}$$

Əvəz sxemindən istifadə edib işəsalıcı reostatın müqavimətini tapırıq:

$$z_{i.d.r} = \sqrt{\left(r_1 + r_2 + r_r\right)^2 + x_k^2} =$$

$$= \frac{U_{1\Phi}}{I_{2i.d.r}} = \frac{U_{1\Phi} \cdot k}{I_{2i.d.r}} = \frac{220 \cdot 1,2}{110,5} = 2,39 \text{ Om}$$

$$r = r_1 + r_2 + r_r = \sqrt{z_{i.d.r}^2 - x_k^2} =$$

$$= \sqrt{2,39^2 - 1,03^2} = 2,16 \text{ Om}$$

$$r_r = r - r_1 - r_2 = 2,16 - 0,275 - 0,335 = 1,55 \text{ Om}$$

$$r_r = \frac{r_r}{k^2} = \frac{1,55}{1,2^2} = 1,075 \text{ Om}$$

Bu hal üçün işədüsmə momenti:

$$M_{i.d.r} = \frac{28,6 \cdot 220^2 (1,335 + 1,55)}{1500 \left[(0,275 + 0,335 + 1,55)^2 + 1,03^2 \right]} = 302 \text{ Hm}$$

Məsələ 7.12.3

Qısaqapanmış rotorlu asinxron mühərrikin parametrləri

belədir: $P_{nom} = 40 \text{ kVt}$, $n_{nom} = 1450 \text{ dövr/dəq}$, $\frac{M_k}{M_{nom}} = \lambda = 2,4$, $p=2$.

Tələb olunur: 1) mühərrikin $M(s)$ mexaniki xarakteristikasını qurmaq üçün cədvəl tərtib etmək; 2) yük momenti $M = 200 \text{ Hm}$, gərginlik $U' =$

0,9U_{nom} olduqda rotorun fırlanma sürətini tapmaq; 3) istehsal mexanizminin başlanğıc müqavimət momenti **M_{m.baş} = 170 Hm** isə mühərrikin nominal və nominaldan **10%** az gərginlikdə işə düşmə imkanını təyin etməli.

Həlli. Fırlanan maqnit sahəsinin sürəti

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ dövr dəq}$$

Mühərrikin nominal və kritik sürüşməsi:

$$s_{nom} = \frac{n_0 - n_{nom}}{n_0} = \frac{150 - 1450}{1500} = 0,033$$

$$s_k = s_{nom} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,033 \left(2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1} \right) = 0,151$$

Mühərrikin nominal və kritik momenti:

$$M_{nom} = \frac{9550P_{nom}}{n_{nom}} = \frac{9550 \cdot 40}{1450} = 263 \text{ Hm}$$

$$M_k = \lambda \cdot M_{nom} = 2,4 \cdot 263 = 632 \text{ Hm}$$

Mexaniki xarakteristika üçün

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} = \frac{2 \cdot 632}{\frac{0,151}{s} + \frac{s}{0,151}}$$

ifadəsindən istifadə edirik. Sürüşməyə müxtəlif qiymətlər verərək, fırlandırıcı momentin qiymətlərini tapırıq. Nəticələri cədvəldə toplayırıq:

Cədvəl 7.12.1

s	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,151	0,1	0,05	0
M, N _m	187	207	233	261	300	350	416	510	608	632	584	378	0

İstənilən gərginlikdə mühərrikin fırlandırıcı momenti:

$$M = \frac{2M \left(\frac{U}{U_{\text{nom}}} \right)^2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

$$\frac{M_k}{M} = \beta_k \quad \text{və} \quad \frac{U}{U_{\text{nom}}} = \gamma \quad \text{işarə etsək, verilmiş momentə uyğun}$$

sürüşməni belə tapa bilərik:

$$2\beta_k \gamma = \frac{s_k}{s} = \frac{s}{s_k}$$

$$s = s_k \left(\beta_k \gamma - \sqrt{\beta_k^2 \gamma^2 - 1} \right)$$

$$M = 200 \text{ Hm},$$

$$\text{yəni} \quad \frac{M_k}{M} = \frac{632}{200} = 3,16 \quad \text{və} \quad \gamma = 0,9 \quad \text{olduqda}$$

$$s = 0,151 \left(3,16 \cdot 0,9 - \sqrt{3,16^2 \cdot 0,9^2 - 1} \right) = 0,028$$

Buna uyğun fırlanma sürəti

$$n = 1500(1 - 0,028) = 1456 \text{ dövr/dəq}$$

Cədvəldən görürük ki, nominal gərginlikdə $M_{i.d.} = 187 \text{ Hm}$ -dir və $M_{i.d.} > M_{m.baş}$ olduğuna görə mühərrikin bu halda işə düşməsi mümkündür. Gərginlik $U = 0,9U_{\text{nom}}$ olduqda işə düşmə momenti

$$M_{i.d.}' = 0,9^2 \cdot M_{i.d.} = 0,81 \cdot 187 = 152 \text{ Hm}$$

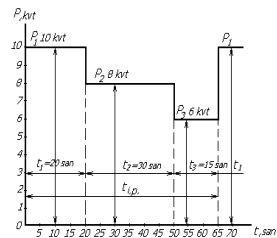
$M_{m.baş}$ -dan kiçikdir. Buna görə də 10% azalmış gərginlikdə mühərrikin işə düşməsi mümkün olmayacaqdır.

Məsələ 7.12.4

İş rejimi şəkil 7.24-də təsvir olunmuş diaqramla verilən mexanizmi hərəkətə gətirmək üçün mühərrikin lazım olan gücünü təyin etməli.

Həlli

Bizim halda iş rejimi uzun dəyişən yükəndir. Belə iş rejimlərində mühərrikin gücü ekvivalent gücə görə təyin olunur ki, bu da



Şəkil 7.24. $P=f(t)$ qrafiki

$$P_{ekv} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n P_k^2 t_k}{t_{is,p}}}$$

Burada $t_{is,p}$ – işçi period müddəti:

$$t_{is,p} = t_1 + t_2 + t_3 = 20 + 30 + 15 = 65 \text{ san}$$

$$P_{ekv} = \sqrt{\frac{10^2 \cdot 20 + 8^2 \cdot 30 + 6^2 \cdot 15}{65}} = 8,3 \text{ kVt}$$

Yük diaqramları $M=f(t)$ momenti və yaxud $I=f(t)$ cərəyanı ilə verilən halda mühərriklərin gücü ya ekvivalent momentə görə

$$M_{ekv} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (M_k^2 t_k)}{t_{is,p}}}$$

ya da ekvivalent cərəyana görə seçilir.

$$I_{ekv} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (I_k^2 t_k)}{t_{is,p}}}$$

Məsələ 7.12.5

Şəkil 7.25-də verilmiş yük diaqramına uyğun təkrar-qısamüddətli yük rejimində işləyən mexanizmi hərəkətə gətirmək üçün mühərrikin lazım olan gücünü təyin etməli. Mühərrik $n = 720$ dövr/dəq fırlanan sürətinə malik olmalıdır.

Həlli. İşçi vaxtda ekvivalent momenti təyin edirik:

$$M_{ekb} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (M_K^2 t_K)}{t_{is,p}}}$$

$$t_{is,p} = t_1 + t_2 + \dots + t_n$$

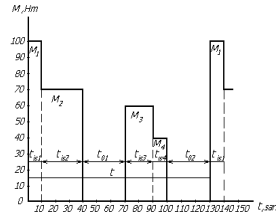
$$M_{ekv} = \sqrt{\frac{100^2 \cdot 10 + 70^2 \cdot 30 + 60^2 \cdot 20 + 40^2 \cdot 10}{10 + 30 + 20 + 10}} = 63,2 \text{ Nm}$$

İşçi vaxt üçün ekvivalent momentinə uyğun olan gücü təyin edirik.

$$P_{ekv} = \frac{M_{ekv}^n}{9550} = \frac{63,2 \cdot 720}{9550} = 4,75 \text{ kVt}$$

Nisbi işləmə müddətini təyin edirik.

$$\varepsilon = \frac{t_{is}}{t_{ms}} = \frac{70}{130} = 0,54$$



Şəkil 7.25. $M=f(t)$ qrafiki

Kataloqlarda təkrar-qısamüddətli rejimdə işləyən mühərriklərin nominal gücü nisbi işləmə müddətinin $\varepsilon=0,15; 0,25; 0,4$ və $0,6$ standart qiymətlər üçün verilir. Əgər nisbi işləmə müddətinin hesablanma qiyməti standart qiymətdən fərqlənirsə, yük diaqramından hesablanan güc aşağıdakı düstur ilə yenidən hesablanmalıdır:

$$P_{ekv}^{\prime} = P_{ekv} \sqrt{\frac{\varepsilon_{is}}{\varepsilon}}; \quad \varepsilon = 0,6$$

üçün

$$P_{ekv}^{\prime} = 4,75 \sqrt{\frac{0,54}{0,4}} = 5 \text{ kVt}$$

Kataloqdan **4,5 kVt** hesablama üçün və $\varepsilon = 0,6$ əsasən, ya da **5,5 kVt** hesablama gücünə və $\varepsilon = 0,4$ əsasən mühərrik seçilə bilər.

7.13. Asinxron maşınlar və müxtəlif iş rejimlərinə uyğun mühərrikin gücünün seçilməsi bölməsinə aid sərbəst işlər

1. Fırlanan maqnit sahəsinin alınması hadisəsini izah edin.
2. Maqnit sahəsinin fırlanma istiqamətini necə dəyişmək olar?
3. Yüksüzüzləmə cərəyanının artırılması asinxron mühərrikin güc əmsalına necə təsir edir?
4. Nominal yükdə asinxron mühərrikin rotoru $n = 720$ dövr/dəq sürətlə fırlanır. Rotor cərəyanının f_2 tezliyini tapmalı. Şəbəkənin tezliyi $f_1 = 50$ Hz-dir.
5. Dördqütblü asinxron mühərrik 60 Hz tezlikli üçfazlı şəbəkəyə qoşulub. Nominal fırlanma sürəti 1746 dövr/dəq-dir. Nominal sürüşməni tapmalı.

6. Qısaqapanmış və faza rotorlu mühərriklərin müsbət və nöqsan cəhətlərini göstərin.

7. Mühərrikin fırlandırıcı momenti şəbəkə gərginliyindən necə asılıdır? Gərginlik 10% azalsa, moment necə dəyişər?

8. Gərginliyin 20% azalması zamanı müqavimət momenti sabit qalırsa, rotorun fırlanma sürəti necə dəyişər?

9. Asinxron mühərrikin sürətini hansı üsullarla tənzim etmək olar?

10. Birqatlı asinxron mühərrikin iş prinsipini izah etməli.

11. Yük diaqramlarının qurulma ardıcılığını izah edin.

12. Müxtəlif iş rejimləri üçün elektrik mühərriklərinin seçilməsinin əsas müddəalarını söyləyin.

13. Uzunmüddətli iş rejimi üçün elektrik mühərrikinin gücü necə seçilir?

14. Qısamüddətli iş rejimi üçün elektrik mühərrikinin gücü necə seçilir?

15. Təkrar-qısamüddətli iş rejimi üçün elektrik mühərrikinin gücü necə seçilir?

16. Elektrik mühərrikinin artıq qızması nədən asılıdır və bu mühərrikin iş rejiminə necə təsir edir?

8-ci fəsil

SİQNALLAR NƏZƏRİYYƏSİNİN ELEMENTLƏRİ

Signal fiziki bir proses olub, məlumatı əks etdirir və fəzada ötürür.

Geofiziki tədqiqatlarda signal – təbii və ya süni mənbələrdən yerin səthində elektromaqnit dalğalarının yayılması ola bilər.

Geofiziki signallar xüsusi çevirici vasitəsilə elektrik signalına çevrilir, gücləndirilir və araşdırılır. Bu proses zamanı məlumatların təhrifini minimuma endirmək üçün signalın parametri və çevrici sistemin xarakteristikası uzlaşdırılmalıdır.

Signalın parametrini və çevrici sistemin xarakteristikasını göstərmək üçün iki üsul mövcuddur: zaman və spektrə görə.

Birinci üsulla signal zamana görə kəsilməz funksiya şəklində və ya da elementar impulsların cəmi şəklində göstərilir.

İkinci üsulla signal spektr şəklində göstərilir (müxtəlif tənlikli harmonik toplananların cəmi kimi).

Əvvəlcədən verilən riyazi funksiya şəklində göstərilməsi mümkün olan signallara müntəzəm signallar deyilir. Əks halda qeyri-müntəzəm və ya təsadüfi signallar deyilir.

Müntəzəm signallar – periodik, kvaziperiodik və impuls (qeyri-periodik) signal kimi üç növə ayrılır.

8.1. Periodik signallar

Müntəzəm zaman intervalında təkrar olunan signallar periodik signallar adlanırlar və

$$x(t) = x(t + \pi T) \quad (8.1)$$

yazılır. Burada t – zaman müddəti ($-\infty \leq t \leq +\infty$); π – tam ədəd; T – təkrarın periodudur.

Periodik siqnala verilən məlumatlar təkcə bir perioda məhdudlanır, qalan periodlar bu periodla eyni olub heç bir əlavə məlumat daşıyırlar. Sırf periodik siqnallar mövcud deyildir, çünki ixtiyari təkrar olunan proseslərin hər birinin başlanğıcı və sonu vardır. Odur ki, bu və ya digər şəkildə periodik proseslərə yaxın olan proseslər nəzərdən keçirilir.

Ən sadə periodik siqnal harmonik sinusoidal siqnal olduğundan:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right) \quad (8.2)$$

burada A – rəqsin amplitudası; $T = \frac{2\pi}{\omega}$ – period, san; ω – dövrü tezlik, rad/san; $\omega t + \varphi_0$ – ani faza; φ_0 – başlanğıc faza.

Mürəkkəb periodik siqnalları Furye sırası ilə göstərmək məqsədəuyğundur:

$$\begin{aligned} x(t) &= a_0 + \sum_{K=1}^{\infty} \left[a_K \cos \frac{2\pi K}{T}t + b_K \sin \frac{2\pi K}{T}t \right] = \\ &= a_0 + \sum_{K=1}^{\infty} [a_K \cos K\omega t + b_K \sin K\omega t] \end{aligned} \quad (8.3)$$

burada a_0 – siqnalın sabit toplananıdır.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t = -\pi}^{\omega t = \pi} x(\omega t) d(\omega t)$$

a_K – siqnalın K -cı kosinusoidal toplananının amplitudasıdır və

$$a_K = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos \frac{2\pi K}{T}t dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cos K\omega t d(\omega t)$$

b_K – signalın K -cı sinusoidal toplananının amplitudasıdır və

$$b_K = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \sin \frac{2\pi K}{T} t dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \sin K\omega t d(\omega t)$$

Əgər Eyler düsturundan

$$\cos \theta + j \sin \theta = e^{j\theta} \quad (8.4)$$

istifadə etsək, onda Furiye sırasını kompleks şəkildə göstərmək olar:

$$x(t) = \sum_{K=-\infty}^{\infty} C_K e^{j\frac{2\pi K}{T}t} = \sum_{K=-\infty}^{\infty} C_K e^{jK\omega t} \quad (8.5)$$

burada

$$C_K = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) e^{-j\frac{2\pi K}{T}t} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) e^{-jK\omega t} d(\omega t)$$

(8.3) ifadəsini aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$\begin{aligned} x(t) &= a_0 + \sum_{K=1}^{\infty} A_K \cos\left(\frac{2\pi K}{T}t - \varphi_K\right) = \\ &= a_0 + \sum_{K=1}^{\infty} A_K \cos(K\omega t - \varphi_K) \end{aligned} \quad (8.6)$$

burada $A_K = \sqrt{a_K^2 + b_K^2}$ – amplitudlar spektri;

$\varphi_K = \arctg \frac{b_K}{a_K}$ – fazalar spektri; C_K – kompleks spektr adlanır.

Periodik signalın amplitud spektrinin qrafiki diskret və harmonikdir (şəkil 8.1).

Spektrin alçaq tezliyi əsas tezlik və ya birinci harmonika adlanır; spektrin qalan tezlikləri isə əsas tezliyin yüksək harmonikləridir.

Periodik siqnalın spektrində əsas tezlikdən aşağı tezlikli harmonika ola bilməz (sıfır tezliyə malik olan sabit toplanandan başqa).

Periodik prosesin harmonik toplananları ortoqonaldır, yəni bir-birindən asılı olmadığı üçün istənilən harmonika dəyişdirilə bilər və hətta spektrdən tama-milə çıxarılsa belə, başqa harmonikləri amplitudu və fazası dəyişməz qalar. Harmonik toplananların ortoqonallığı siqnalı

məhdud sayda harmoniklərə ayırmağa imkan verir. Bu halda aproksimasiyanın xətası istənilən qədər kiçik olur.

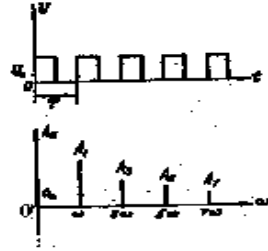
Siqnalın əsas enerjisinin toplandığı tezliklər oblastı spektrin eni adlanır. Əksər hallarda siqnalın əsas enerjisi ilk 10-20 harmoniklərdə toplanmış olur. Siqnal spektrinin eninin məhdudlaşdırılması təkcə energetik mülahizələrlə deyil, siqnalın formasının təhrif olunması ilə də əlaqədardır. Praktiki olaraq siqnal enerjisi daşımayan yüksək tezlikli harmoniklərin aradan çıxarılması siqnalın formasını müəyyən dərəcədə təhrif edir.

Ayrı-ayrı zaman anlarında mürəkkəb periodik siqnalın harmonikləri bir fazada toplanı bilər və ya əks fazada olurlar, yəni maksimum və minimumlar yaranır.

Maksimal səviyyənin minimuma nisbəti siqnalının dinamik diapazonu adlanır və adətən desibellərlə ifadə edilir:

$$D_c = 20 \lg \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \quad (8.7)$$

Periodik siqnalın triqonometrik və ya eksponensial Furiye sırasına ayrılması vahid mümkün üsul deyil. Bunun üçün çoxlu ortoqonal funksiyalardan istifadə etmək olar: Lejandr, Yakobi, Ermit, Çebişev polinomları, Lyaqker və Bessel funksiyaları və s. sıranın tez yığılmasını və verilmiş siqnal



Şəkil 8.1. Periodik siqnalın amplitud spektrinin qrafiki

funksiyasının lazımı dəqiqliklə approksimasiyasına imkan verir.

8.2. Kvazi-periodik siqnallar

Diskret, lakin qeyri-harmonik spektrə malik olan siqnallar kvazi-periodik adlanırlar. Bu halda toplananların tezlikləri nisbətən tam ədəd deyil, ixtiyari və həmçinin irrasional ədəd ola bilər. Məsələn, müxtəlif tezlikli iki kosinusoidal (sinusoidal) rəqslərin cəmi, fərdi və ya hamili kvazi-periodik olur.

Tutaq ki, verilmiş siqnal aşağıdakı kimidir:

$$x(t) = U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t$$

və $\omega_1 < \omega_2$.

Bu ifadəni belə təsvir etmək olar:

$$\begin{aligned} x(t) &= U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos [\omega_1 t + (\omega_2 - \omega_1) t] = \\ &= U_{\Sigma}(\Delta \omega t) \cos \omega_2 t \end{aligned}$$

burada $\Delta \omega = \omega_2 - \omega_1$.

$$U_{\Sigma} = (\Delta \omega t) = [U_1^2 + 2U_1 U_2 \cos \Delta \omega t + U_2^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\omega_2 t = \omega_1 t + \arctg \frac{U_2 \sin \Delta \omega t}{U_1 + U_2 \cos \Delta \omega t}$$

Beləliklə, müxtəlif tezlikli iki harmonik rəqsləri topladıqda, amplitud və fazası fərq tezliyi: $\Delta \omega$ ilə dəyişən bir rəqs alınır. Tezliklərin nisbəti irrasionaldırsa, periodiklik şərtinin dəqiq gözlənilmədiyi T zamanını tapmaq qeyri-mümkündür.

Əgər tezliklərin nisbətən tam ədəd deyil, lakin rasio-naldırsa, hər hansı m və n tam ədədlərini tapmaq mümkündür ki, bu halda

$$\omega_1 n = \omega_2 m$$

Ümumi rəqsin periodu isə

$$T_{\Sigma} = nT_2 = mT_1$$

Tezlikləri irrasional nisbətində period yalnız təqribən müəyyən edilə bilər.

8.3. İmpuls siqnallar

İmpuls siqnalların davamiyyət müddəti müəyyən zaman fasiləsi ilə məhdudlanır. Həmin zaman daxilində siqnal periodik xarakter daşımaqla müəyyən sayda harmonik periodlara malik olar və yaxud mürəkkəb periodik rəqs şəklində ola bilər. İmpuls siqnalın spektral təhlili o vaxt mümkün olar ki, siqnalı aproksimasiya edən riyazi funksiya mütləq integrallana bilər və məlum sayda minimum, maksimum və qırılma nöqtələrinə malikdir. Qeyri-periodik siqnal periodu sonsuzluq olan periodik siqnalın xüsusi halı hesab edilə bilər. Odur ki, praktiki olaraq istənilən qeyri-periodik siqnalların spektral təhlilini aparmaqla, onların Furiye sırasından Furiye integralına keçid belə aparılır:

$$\begin{aligned} x(t) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{K=-\infty}^{\infty} C_K e^{jK\omega t} = \\ \lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{K=-\infty}^{\infty} \frac{e^{jK\omega} \pi}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) e^{-jK\omega t} d(\omega t) &= \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} j\omega \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-jK\omega t} dt &= \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) e^{-j\omega t} d\omega & \end{aligned} \quad (8.8)$$

Son ifadədə

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (8.9)$$

Signal amplitudunun kompleks spektral sıxlığı olub, düzünə Furiye çevirməsi adlanır, vahidi isə

$$\frac{\text{amplitudun olcū vahidi}}{\text{tezliyin olcū vahidi}}$$

əks Furiye çevirməsi

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int S(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

siqnalı sonsuz kiçik harmonik toplananların inteqral cəmi şəklində təsvir etməyə imkan verir.

Furiye inteqralının Furiye sırasından fərqi ondan ibarətdir ki, Furiye inteqralı qeyri-periodik funksiyaları periodik toplananların cəmi kimi təsvir edərsə, Furiye sırası periodik funksiyaları periodik toplananlar cəmi kimi göstərir. Bunun səbəbi odur ki, periodik siqnalın spektri diskret olmaqla, yalnız əsas tezliyin harmonikindən təşkil olunur; qeyri-periodik siqnalın spektri isə fasiləsiz olmaqla $-\infty$ -dan $+\infty$ -a qədər bütün tezlikləri əhatə edir.

Mənfi tezlik – riyazi mücərrədlik – Furiye inteqralı ifadəsində kompleks formada yazılışda meydana çıxar. Əgər yalnız müsbət tənliklərlə əməliyyat aparılırsa, hər bir ω tezliyində iki funksiya uyğun gələcəkdir: $\sin \omega t$ və $\cos \omega t$. Bundan azad olmaq üçün hər tezliyə uyğun vahid kompleks funksiya $e^{j\omega t}$ daxil etmək lazımdır. Furiye inteqralının kompleks şəkildə təsvirindən əlavə triqonometrik yazılmış formasından da (sinus-kosinus Furiye çevirməsi) istifadə edilir:

$$x(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} a(\omega) \cos \omega t d\omega + \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} b(\omega) \sin \omega t d\omega \quad (8.10)$$

burada

$$a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega t dt$$

$$b(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin \omega t dt$$

və ya

$$x(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} A(\omega) \cos[\omega t - \varphi(\omega)] d\omega \quad (8.11)$$

burada

$$A(\omega) = [a^2(\omega) + b^2(\omega)]^{1/2}$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{b(\omega)}{a(\omega)}$$

Sonuncu ifadə qeyri-periodik siqnalın kompleks spektral sıxlığını aşağıdakı şəkildə təsvir etməyə imkan verir:

$$S(j\omega) = A(\omega) e^{-j\varphi(\omega)} \quad (8.12)$$

Kompleks spektral sıxlığın modulu $A(\omega)$ siqnalın amplitud spektri, $\varphi(\omega)$ isə faza spektri adlanır.

Siqnalın spektral sıxlığı ümumi şəkildə $-\infty \leq t \leq +\infty$ zaman intervalında təyin edilir. lakin real qeyri-periodik siqnallar hər hansı məlum zaman intervalında $t_1 \leq t \leq t_2$ verilir, yəni spektral sıxlıq təkcə tezliyin funksiyası olmayıb, zamandan da asılıdır.

Qeyri-periodik siqnalın enerjisinin spektr üzrə paylanması belə ifadə edilə bilər:

$$P_z = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} A^2(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} W(\omega) d\omega \quad (8.13)$$

burada $W(\omega) = \frac{1}{\pi} A^2(\omega)$ – signalın energetik spektral sıxlığıdır.

Sonuncu ifadə signal spektrinin praktiki enini, yəni signalın əsas enerjisinin toplandığı oblastı təyin etməyə imkan verir

$$P_Z = P_0 + \Delta P = \int_0^{\omega_H} W(\omega) d\omega + \int_{\omega_H}^{\omega_B} W(\omega) d\omega + \int_{\omega_B}^{\infty} W(\omega) d\omega$$

burada

$$\Delta P = \int_0^{\omega_H} W(\omega) d\omega + \int_{\omega_B}^{\infty} W(\omega) d\omega$$

signalın tam enerjisi ilə müqayisədə çox kiçik gücdür, ω_H və ω_B isə spektrik aşağı və yuxarı sərhəd tezlikləridir.

Real qeyri-periodik signallar müəyyən t_1 və t_2 zaman müddətləri arasında təzahür edirlər. Məlumat və energetik nöqtəyi-nəzərdən signalın bütün zonaları eyni olmur: çox vaxt başlanğıc və son zonalar kiçik enerji və məlumat daşıyırlar. Odur ki, signalın effektiv uzunluğu anlayışından istifadə etmək daha məqsədəuyğundur:

$$\tau_{ef} = (t_2 + \Delta t) - (t_1 + \Delta t) \quad (8.14)$$

Signalın effektiv uzunluğu və spektrin praktiki eni biri-birilə sıx əlaqədardırlar:

$$P_0 = \int_{\omega_H}^{\omega_B} W(\omega) d\omega = \int_{t_1 + \Delta t}^{t_2 - \Delta t} x^2(t) dt \quad (8.15)$$

Beləliklə, spektrin praktiki eni $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ siqnalın effektiv uzunluğu ilə müəyyən olunur. Ümumi halda istənilən qeyri-periodik proses üçün yazmaq olar:

$$\Delta f \tau_{ef} = K \approx 1 \quad (8.16)$$

burada Δf – spektrin praktiki eni; τ_{ef} – siqnalın effektiv uzunluğu; K – sabit əmsal olub, siqnalın formasından asılı olaraq geniş hədddə dəyişə bilər, lakin əksər hallarda vahidə yaxındır.

Qeyri-periodik siqnal spektrinin eni və effektiv uzunluğundan başqa dinamik diapazonu ilə xarakterizə olunur və periodik siqnalda olduğu kimi təyin edilir.

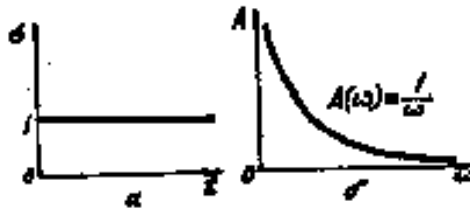
Qeyri-periodik siqnalın zamana görə təhlili zamanı o , sonlu və ya sonsuz sayda elementar impulsların cəmi kimi təsvir edilir. Bu məqsədlə əksər hallarda vahid impuls və vahid funksiya şəklində impulslardan istifadə edilir.

Vahid funksiya $\sigma(t)$ belə təyin edilir:

$$\sigma(t) = 0 \text{ olduqda } -\infty < t < 0$$

$$\sigma(t) = 1 \text{ olduqda } 0 \leq t < \infty$$

Vahid funksiyanın qrafiki təsviri şəkil 8.2,a-da verilir.



Şəkil 8.2. Vahid funksiyanın qrafik təsviri

Şəkil 8.2,b-də onun spektral sıxlığının modulunun qrafiki göstərilmişdir:

$$S(j\omega) = \int_0^{\infty} \sigma(t) e^{-j\omega t} dt = [j\omega]^{-1} \quad (8.17)$$

Signalı sonsuz kiçik $d\tau$ zaman fasiləsi ilə gecikən sonsuz kiçik dx amplitudlu vahid funksiyaların cəmi şəklində təsvir etmək olar (şəkil 8.3,a).



Şəkil 8.3. Signalın təsviri

dx – amplitudu aşağıdakı tənliklə təyin edilir:

$$dx = \frac{d}{dt} [x(t)] d\tau = x'(\tau) d\tau \quad (8.18)$$

Odur ki, amplitudu dx olan hər bir vahid funksiya belə təsvir edilə bilər:

$$d[x(t)] = \frac{d}{dt} [x(t)] \sigma(t - \tau) d\tau \quad (8.19)$$

Bu ifadədən istənilən t_1 zaman anı üçün $x(t)$ signalının qiyməti təyin edilə bilər:

$$x(t) = \int_0^t x'(\tau) \sigma(t - \tau) d\tau \quad (8.20)$$

Əgər sıfır anında signalın qiyməti sıfıra bərabər deyilsə,

$$x(t) = x(0)\sigma(t) + \int_0^t x'(\tau)\sigma(t-\tau)d\tau \quad (8.21)$$

Bu ifadə Dyumel integralı adlanır və siqnalları müxtəlif sistemlərin xarakteristikalarının təhlilində geniş tətbiq olunur.

Siqnalı vahid funksiyalara ayırmaqdan əlavə onu vahid impulslara da ayırmaq mümkündür. Vahid impuls $\delta(t)$ bəzən delta-funksiya və ya Dirak funksiyası adlanır; sahəsi vahidə bərabər olan sonsuz qısamüddətli və sonsuz böyük amplitudlu siqnala deyilir.

Vahid impulsun spektri

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)e^{-j\omega t} dt = 1 \quad (8.22)$$

tezlikdən asılı deyil, odur ki, bütün spektral toplananların amplitud və fazaları eyni, spektrin eni isə hüdudsuzdur – sıfırdan sonsuz-luğa kimi.

Qeyri-periodik siqnal sonsuz kiçik $d\tau$ müddətində gecikən vahid impulsların cəmi kimi təsvir edilə bilər (şəkil 8.3,b):

$$x(t) = \int_0^t x(\tau)\sigma(t-\tau)d\tau \quad (8.23)$$

Praktiki olaraq istənilən siqnal, kifayət qədər yüksək dəqiqliklə, sonlu Δt zaman fasilələri ilə ayrılan vahid impulslarla (və ya vahid funksiyalarla) ifadə edilə bilər:

$$x(t) \approx \sum_{k=0,1,2}^{\infty} x(k\Delta t)\delta(t-k\Delta t) \quad (8.24)$$

burada $x(k\Delta t)$ – siqnalın $k\Delta t$ zaman anındakı qiyməti; $\delta(t-k\Delta t)$ – gecikən vahid impulslardır.

V.A.Kotelnikov isbat etmişdir ki, məhdud spektrə malik olan signal ümumi şəkildə, $\Delta t \leq [2f_B]^{-1}$ zaman intervallarında hesablanmış ani qiymətləri vasitəsilə təyin edilə bilər; burada f_B – signalin spektrinin yuxarı sərhəd tezliyidir.

V.A.Kotelnikov sırasına ayrılmış signal belə təsvir edilir:

$$x(t) \approx \sum_{k=0,1,2}^{\infty} x(k\Delta t) \frac{\sin \gamma}{\gamma}$$

burada $\gamma = 2\pi f_B(t - k\Delta t)$.

Kotelnikov teoremi vasitəsilə istənilən fasiləsiz signal lazımı yüksək dəqiqlik dərəcəsi ilə diskret signala çevrilə bilər.

8.4. Təsadüfi signallar

Parametrləri əvvəlcədən məlum olmayan, yəni köçürdüyü məlumat da naməlum olan signal, təsadüfi signal adlanır. Bütün real signallar çox və ya az dərəcədə təsadüfidirlər. Ümumi halda təsadüfi signala çoxlu naməlum dəyişənlərdən asılı olan təsadüfi kəmiyyətlərin məcmuu kimi baxmaq olar. Təsadüfi signalların təhlilinin mürəkkəbliyi ondadır ki, burada spektral və zaman təhlili metodlarının bilavasitə tətbiqi qeyri-mümkündür, çünki təsadüfi signal zamandan dəqiq funksional asılı formada təsvir edilə bilmir. Təsadüfi signallar stasionar və qeyri-stasionar olurlar. Statistik parametrləri zamandan asılı olmayan təsadüfi signallar stasionar adlanırlar. Qeyri-stasionar təsadüfi signalların statistik parametrlərinin zamandan asılılığı onların təhlilini xeyli çətinləşdirir və mürəkkəbləşdirir.

İstənilən təsadüfi signalın kafi xarakteristikası ehtimalların paylanması olub, signalın mümkün olan qiymətlər çoxluğundan hansı qiyməti alması ehtimalını göstərir. Praktikada orta qiymətlərdən (moment funksiyalarından) istifadə etmək daha əlverişli olur. Ümumi halda təsadüfi signalın qiyməti həm zamandan və həm də bir və ya bir neçə

müstəqil dəyişənlərdən asılı olur. Odur ki, orta qiymət həm zamana görə və həm də digər dəyişənlərə görə tapıla bilər.

Çoxluğa görə orta qiymətlər (riyazi gözləmələr) hər hansı qeyd olunmuş t_1 müddətində siqnalın mümkün olan bütün qiymətlərinin orta kəmiyyətinə görə təyin edilir. $x(t)$ siqnalının t_1 zaman anında $x(t_1) = x$ təsadüfi qiymətini nəzərə alaraq çoxluğa görə orta qiymət $M[x(t)]$ həmin siqnal ehtimal sıxlığı $\rho_1(x_1; t_1)$ ilə belə ifadə edilə bilər:

$$M[x(t_1)] = \int_{-\infty}^{\infty} x_1 \rho_1(x_1; t_1) dx_1$$

Qeyri-simmetrik təsadüfi siqnallar üçün çoxluğa görə orta qiymət zamandan asılıdır. Stasionar təsadüfi siqnallar üçün $M[x(t_1)] = \text{const}$ və zamandan asılı deyil. Bu halda çoxluğa görə orta qiymət siqnalın sabit toplananından başqa heç bir şey deyil:

$$M[x(t_1)] = a_0 = \text{const}$$

$x_1(t)$ kəmiyyətinin $M[x(t_1)]$ -dən meylinin ölçüsü dispersiya $D[x(t_1)]$ olub, həmin kəmiyyətin riyazi gözlənməsidir.

$$D[x(t_1)] = M\{[x(t_1)] - M[x(t_1)]\}^2$$

Stasionar təsadüfi siqnal üçün dispersiya:

$$D[x(t_1)] = M[x^2(t_1)] - a_0^2$$

Siqnalın dəyişən toplananının gücünü göstərir; bu halda orta kvadrat qiymət $M[x^2(t_1)]$ siqnalın ümumi gücünü müəyyən edir.

Riyazi gözləmə və dispersiya siqnalı yalnız t_1 zaman anında xarakterizə edir, ayrı-ayrı qiymətlər arasında zamana görə əlaqəni əks etdirmir. Siqnalın zaman xassəsi ayrı-ayrı

hissələrlə oxşarlıq dərəcəsini müəyyən edən korelyasiya funksiyaları ilə təyin edilir. $\Phi(t_1, t_2)$ korelyasiya funksiyası signalın ayrı-ayrı $x(t_1)$ və $x(t_2)$ qiymətləri arasında ehtimal rabitəsini müəyyən edir.

Ümumi şəkildə korelyasiya funksiyası

$$\Phi(t_1, t_2) = M[x(t_1); x(t_2)]$$

signalın t_1 və t_2 zaman anlarındakı qiymətlərinin hasilinin orta qiymətidir. Qeyri-stasionar təsadüfi signallar üçün korelyasiya funksiyası t_1 və t_2 zaman anlarından asılıdır. Stasionar təsadüfi signallar üçün korelyasiya funksiyası yalnız $(t_2 - t_1) = \tau$ fərqindən asılı olub, belə tapıla bilər:

$$\Phi(t_1, t_2) = \Phi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t-\tau)dt$$

Stasionar təsadüfi signalın korelyasiya funksiyası obyektiv statistik xarakteristika olmaqla, əksər signallar üçün asan təyin edilir və təhlil üçün əlverişlidir. Korelyasiya funksiyasının mühüm xassələri aşağıdakılardır:

1. Korelyasiya funksiyası signalın ayrı-ayrı hissələri arasında nisbi τ sürüşmə funksiyasıdır.
2. Korelyasiya funksiyası $\tau = 0$ olduqda ən böyük qiymət alır.
3. Əgər stasionar təsadüfi signalda sabit toplanan və periodik toplananlar yoxdursa, $\tau \rightarrow \infty$ olduqda korelyasiya funksiyası signalın orta qiymətinin kvadratına yaxınlaşır. Əgər orta qiymət sıfıra bərabərdirsə, $\Phi(\tau) \rightarrow 0$.
4. Periodic signalın korelyasiya funksiyası periodik signal olub, əsas tezliyi və bütün harmonikləri əhatə edir.
5. İki müstəqil stasionar signalların $x_1(t)$ və $x_2(t)$ qarşılıqlı korelyasiya funksiyası sabit olub, həmin funksiyaların orta qiymətlərinin hasilinə bərabərdir:

$$\Phi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_1(t) x_2(t - \tau) dt = \\ = [x_1(t)]_{or} [x_2(t)]_{or}$$

Əgər orta qiymətlərdən biri sıfıra bərabədirsə,
 $\Phi(\tau) = 0$.

6. $\Phi(\tau)$ – korrelyasiya funksiyası τ görə cüt funksiyadır.

Stasionar siqnalların əksəriyyəti erqodik xassəyə malikdir; onların çoxluğa görə orta qiymətinin zamana görə orta qiymətinə bərabərliyi ehtimalı vahiddir. Bu isə təhlili xeyli asanlaşdırır. Təsadüfi siqnala sonsuz sayda və təsadüfi amplituda, tezlik və fazaya malik olan sadə harmonik rəqslərin cəmi kimi baxmaq olar. Lakin spektral sıxlıq təsadüfi prosesin bir halı üçün təyin edilərsə, tapılmış qiymət təsadüfi və qeyri-müəyyən kəmiyyət olacaqdır.

Odur ki, təsadüfi siqnalları təhlil edərkən orta spektral xarakteristika energetik spektral sıxlıqdan və ya təsadüfi siqnalın gücünün bütün spektr boyunca paylanmasını xarakterizə edən energetik spektrdən istifadə olunur.

Eni $\Delta\omega \rightarrow 0$ olan tezlik diapazonunda təsadüfi siqnalın energetik spektri $W(\omega)$ siqnalın ΔP gücünün, həmin tezlik zonasında onun $\Delta\omega$ eninə nisbəti kimi tapılır:

$$W(\omega) = \frac{\Delta P}{\Delta\omega} \left[\frac{\text{güc vahidi}}{\text{tezlik vahidi}} \right]$$

Stasionar proseslərin korelyasiya funksiyası ilə energetik spektri arasında əlaqə A.J.Xinçinin isbat etdiyi kimi Furiye inteqralı şəklində təsvir edilir:

$$W(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

$$\Phi(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega$$

Bu ifadələr stasionar siqnalların təhlilində mühüm əhəmiyyətə malik olmaqla, $\Phi(\tau)$ asılılığını $W(\omega)$ -dan (və ya $W(\omega)$ -nı $\Phi(\tau)$ -dən) almaqla və Furiye çevirməsinin bütün məlum xassələrindən istifadə etməyə imkan verir. Məsələn, bu ifadələr vasitəsilə stasionar təsadüfi siqnalın spektrinin praktiki eni eimi mühüm məsələni həll etmək mümkündür. İstənilən siqnal üçün

$$\Delta f \tau_0 = \mu \approx 1$$

burada Δf – təsadüfi siqnal spektrinin effektiv eni; τ_0 – korelyasiya inteqralı – zaman sürüşməsi olub, bu halda korelyasiya funksiyası kifayət qədər qiymətə malikdir; μ – vahidə yaxın sabit əmsaldır.

Korelyasiya inteqralı τ_0 belə tapıla bilər:

$$\tau_0 = \frac{1}{\Phi(0)} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\tau) d\tau$$

Spektrin effektiv eni Δf isə

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi W(0)} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) d\omega$$

burada $\Phi(0)$ və $W(0)$ – korelyasiya funksiyası və energetik spektrin $\tau = 0$ və $\omega = 0$ halları təyin olunmuş qiymətləridir.

Beləliklə, siqnalın ayrı-ayrı hissələrinə qədər az korelyasiya olunmuşsa, korelyasiya inteqralı o qədər kiçik, siqnalın spektri bir o qədər geniş olur, əgər $\tau \rightarrow 0$, $\Delta f \rightarrow \infty$. Spektrin eninin məhdudlaşdırılması korelyasiyanı artırır. Bu

onu göstərir ki, periodik siqnallar sonsuz korelsyasiya intervalına malikdirlər.

8.5. Siqnalların çevrilməsi

Siqnalın xüsusiyyətlərini tam müəyyən etmək üçün onun uzunluğu, spektrinin eni və dinamik diapazonundan əlavə, orta gücünü və həmçinin mania siqnalları və təhriflərin orta gücünün həmin gücə nisbətini bilmək lazımdır.

$$\Pi_c = \log \frac{P_c}{P_\Pi}$$

Bu parametr artım adlanmaqla faydalı siqnala təhriflərin nisbətini göstərir və siqnaldan düzgün məlumat ayırmağa imkan verən əsas kriterilərdən biridir.

Spektrin effektiv eni, siqnalın uzunluğu və artmanın birgə hasil siqnalın həcmi adlanır:

$$V_c = \Delta f \Delta t \Pi_c$$

Ümumi halda siqnalın həcmi nə qədər böyükdürsə, o qədər onun apardığı məlumat çoxdur. Siqnalların çevrilməsi zamanı onların həcmi dəyişməməlidir, əks halda məlumatın bir hissəsi itə bilər. Siqnalın həcmnin sabit halında onun ayrı-ayrı parametrləri dəyişə bilər: siqnalın uzunluğunun və spektrinin dəyişməsi, siqnalın zamana görə sürüşməsi, siqnalın spektr üzrə sürüşməsi, başlanğıc energetik səviyyə və artımın dəyişməsi.

Siqnalların bütün mümkün olan çevrilməsi növləri üç qrupa ayrılır: siqnalın fasiləsizliyini dəyişməyən, diskret və diskret-analoq çevrilmələri. Birinci halda siqnalın hər hansı çevrilməsi zamanı onun istər kəmiyyətə və istərsə də zaman etibarilə dəyişən fasiləsiz olur. Diskret çevrilmədə siqnal yalnız diskret dəyişə bilər: a) kəmiyyətə; b) zamana görə; c) həm kəmiyyət və həm də zamana görə.

Diskret-analoq çevrilməsində diskret siqnalın analoq şəklinə çevrilməsi baş verir. Bu halda siqnal üzərində aparılan əməliyyatların sayı on dəfələrlə ola bilər.

8.6. Siqnallar nəzəriyyəsinin elementlərinə aid sərbəst işlər

1. Aşağıdakı periodik siqnalların amplitud spektrlərini təyin edib qrafiklərini qurmali:

a) biryarımpriodlu düzləndirici vasitəsilə düzləndirilmiş sinusoidal gərginlik (şəkil 8.4,a)

$$U(t) = \begin{cases} U_0 \sin \omega t & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0 & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases}$$

b) ikiyarımpriodlu düzləndirici ilə düzləndirilmiş sinusoidal gərginlik (şəkil 8.4,b)

$$U(t) = |U_0 \sin \omega t| \quad 0 \leq t \leq T$$

c) işarəsi dəyişən düzbucaqlı gərginlik (şəkil 8.4,c)

$$U(t) = \begin{cases} +U_0 & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ -U_0 & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases}$$

ç) impuls gərginlik (şəkil 8.4,ç)

$$U(t) = \begin{cases} U_0 & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \tau \leq t \leq T \end{cases}$$

2. Kvaziperiodik siqnalın qrafikini qurmali

$$U_2(t) = U_1 \sin \omega_1 t + U_2 \sin \omega_2 t$$

Əgər $U_1 = U_2 = 1$, $\omega_1 = 1$ rad/s, $\omega_2 = \sqrt{2}$ rad/s.

3. Aşağıdakı impuls siqnalların spektrlərini təyin etməli və qrafikini qurmalı:

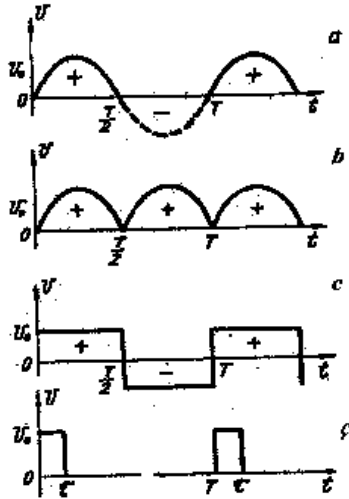
– sinusoidin bir yarımdalğası şəklində vahid impuls (şəkil 8.4,a)

– vahid düzbucaqlı impuls (şəkil 8.4,ç)

4. Nə üçün təsirin uzunluğu azaldıqca, spektr genişlənir?

5. Sübut etməli ki, $U(t) = U_0 \sin \omega t$ periodik siqnalının

avtokorelyası funksiyası periodik olmaqla $\frac{U_a^2}{2} \text{const } \omega \tau$ bərabərdir.



Şəkil 8.4. Görginliyin zamandan asılılıq qrafiki

9-ci fəsil

RADİOELEKTRON QURĞULARININ ÜMUMİLƏŞDİRİLMİŞ XARAKTERİSTİKALARI

İxtiyari radioelektron qurğuları çoxlu sayda müxtəlif elementlərin (rezistorlar, kondensatorlar, induktiv sargıclar, diodlar, tranzistorlar, transformatorlar və s.) sadə və ya mürəkkəb birləşmələrindən hazırlanır. Ayrı-ayrı elementlər birləşərək siqnallar üzərində istənilən əməliyyatlar aparan, yəni siqnalları çevirən: gücləndirən, zəiflədən, süzən, differensiallayan, inteqrallayan və s. elementar funksional düyünlər təşkil edirlər. Real funksional düyünlərin xarakteristikası elədir ki, burada heç bir əməliyyat dəqiq yerinə yetirilmir. Odur ki, qurğunun çıxışındakı siqnalın çevrilməsi verilmiş əməliyyatı yerinə yetirilməsi hesab edilmir və ayrı-ayrı funksional birləşmələrin və qurğunun real çevirmə xüsusiyyətini xarakterizə edir.

Radioelektron çevirici qurğularının ekvivalent sxemini giriş və çıxışa malik cüt sıqaçlı dördqütblü şəklində göstərmək olar. Bu halda qurğunun daxili forması deyil, onun müxtəlif standart siqnallara qarşı göstərdiyi reaksiyalar maraq doğurur. Bu, qurğunun bütün elementlərinin və hissələrindən siqnalların keçməsinə baxmadan onun ümumiləşdirilmiş xarakteristikalarını müəyyən etməyə imkan verir.

Radioelektron qurğuları aktiv və passiv ola bilirlər. Passiv elementlər yalnız enerjini qəbul etmək və yığmaq xüsusiyyətinə malikdir. aktiv elementlərə isə enerji mənbəi və gücləndirici elementləri olan batareyalar, akkumulyatorlar, elektron lampaları və tranzistorlar aiddir.

Cərəyan və gərginliyin bir-birindən asılılığına görə qurğular xətti, parametrik və qeyri-xətti qurğulara bölünürlər.

Xətti qurğularda onun parametrləri cərəyan və gərginliyin qiymətlərindən asılı deyildir. Mütləq xətti qurğular mövcud olmadığından, onlar real olaraq cərəyan və gərginliyin məhdud sərhəd daxilində dəyişməsinə uyğundur.

Parametrik qurğularda onun parametrləri zamana uyğun verilmiş qanun əsasında dəyişir. Qeyri-xətti elementlərdə isə cərəyan və gərginlik arasındakı dəyişmə qeyri-xətti olub, onun parametrləri cərəyan və gərginliyin qiymətindən asılıdır.

9.1. Xətti qurğular

Hər hansı qurğunun mühüm xarakteristikası onun çıxış təsirinin (-y) giriş təsirinə (x) olan nisbətini göstərən ötürmə əmsalıdır.

Ötürmə əmsalı adsız ədəd olub, nisbi qiymətə malikdir və elektrik dövrələrində güc, cərəyan, gərginliklərin nisbəti kimi təyin edilə bilər. Əgər giriş və çıxış təsirləri müxtəlif formada olarsa (məsələn, qurğunun girişinə verilən signal şüa seli formasında, çıxışda alınan signal elektrik signalı formasında), ötürmə əmsalı çevirmə əmsalı adlanır və onun müəyyən ölçü vahidi olur.

Ümumi halda ötürmə əmsalı kompleks qiymətə malik olub zamandan və ya tezlikdən asılıdır. Çünki real radioelektron qurğuları məhdud tezlik diapazonuna malik olub, signal spektrləri təşkilədicilərinin hamısını eyni formada buraxmır. Bu, qurğuda bəzi reaktiv elementlərin: kondensatorların, induktiv sargıqların, transformatorların və s. müqavimətlərinin tezlikdən asılılığı ilə xarakterizə edilir.

Reaktiv elementlər elektrik enerjisini toplamaq xüsusiyyətinə malik olduğundan qurğunun müəyyən ətaləti olur. Odur ki, çıxış dəyişməsi həmişə girişdən zaman etibarilə geri qalır və giriş signalı olmadıqda çıxışda müəyyən müddət signal olur. Bu isə ötürmə əmsalının zamandan asılı olmasına səbəb olur.

Xətti qurğularda ötürmə əmsalı çıxış signalı spektrinin giriş signalı spektrinə olan nisbətinə, yaxud $0 < t < \infty$ şərtində çıxış signalı funksiyasının giriş signalı funksiyasına olan nisbətinə deyilir.

Birinci halda alınan ötürmə əmsalı qurğunun spektral xarakteristikası adlanır və giriş signalı spektrinin çıxış signalı spektrindən fərqlənmə dərəcəsini göstərir.

İkinci halda ötürmə əmsalı qurğunun zaman xarakteristikası olub, çıxış signalının formasının giriş signalının formasından necə fərqləndiyini göstərir. Qurğunun göstərilən üsulla təyin edilən spektral və zaman xarakteristikaları universal hesab edilir. Həmdə onların təcrübi və analitik üsulla təyin edilməsi giriş signalının formasından asılı olaraq müəyyən qədər çətinlik törədə bilər. Odur ki, radioelektronikada qurğunun tezlik xüsusiyyətini onun amplitud-faza xarakteristikasının köməyiylə göstərmək qəbul edilmişdir. Qurğunun zaman xüsusiyyətləri isə keçid funksiyası və impuls reaksiyası ilə təsvir edilir.

Xətti qurğuların amplitud-faza xarakteristikası tezliyin bütün diapazonlarında, yəni sıfırdan sonsuzluğa qədər qiymətində çıxışdakı sinusoidal signalın, girişdəki sinusoidal signalı olan nisbətində deyilir:

$$K(j\omega) = \frac{U_{\text{ix}}(t)}{U_{\text{gir}}(t)} = \frac{U_{\text{ix}} e^{j\omega(t - \Delta t)}}{U_{\text{gir}} e^{j\omega t}} \quad (9.1)$$

Çıxış signalının giriş signalına nəzərən faza fərqi qurğudakı reaktiv elementlərdə signalın gecikməsi ilə əlaqədardır. Ümumi halda qurğunun amplitud-faza xarakteristikasını aşağıdakı kimi ifadə etmək olar:

$$K(j\omega) = K(\omega) e^{-j\varphi(\omega)} \quad (9.2)$$

burada $K(\omega)$ – amplitud-tezlik xarakteristikasının modulu olub giriş və çıxış signallarının amplitudlarının (effektiv və ya orta qiymətlərinin) nisbətinin tezliyə uyğun necə dəyişməsinə göstərir; $\varphi(\omega)$ – faza-tezlik xarakteristikası olub, giriş signalı tezliyi dəyişdikdə çıxış signalı fazasının necə dəyişməsinə göstərir.

Amplitud-tezlik və faza-tezlik xarakteristikaları qarşılıqlı əlaqədə olub, radioglektron qurğuları üçün eyni qiymətli hesab edilir. Yəni hər bir amplitud-tezlik xarakteristikasına bir faza-tezlik xarakteristikası uyğundur.

Amplitud-tezlik xarakteristikası istənilən xətti qurğunun həm qərarlaşmış rejimdə (sabit amplitudalı dəyişən tezlikli sinusoidal gərginlik təsir etdikdə), həm də keçid rejimində (ixtiyari təsir olduqda) tam tezlik xüsusiyyətini təyin edir.

Girişə istənilən formada təsir olan və məlum amplitud-tezlik xarakteristikalı xətti qurğuya baxaq. Tutaq ki, $x(t)$ dövrü olmayan giriş signalıdır və həmin signalı Furiye integralı formasında göstərmək olar, yəni

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

deməli, sonsuz kiçik sinusoidal təşkiledicilərin cəmində onun hər biri aşağıdakı kimi olur:

$$dx(t) = \frac{1}{2\pi} S_x(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (9.3)$$

Girişə təsir edən hər bir sonsuz kiçik sinusoidal təşkiledicinin $dx(t)$ təsirindən xətti qurğunun çıxışında sonsuz kiçik sinusoidal təşkiledici $dy(t)$ yaranır

$$dy(t) = dx(t)K(j\omega) = \frac{1}{2\pi} S_x(j\omega)K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (9.4)$$

Xətti qurğularda superpozisiya prinsipi (hər bir səbəbin təsirindən yaranan səbəblərin cəmi, təsirlərin cəminə bərabərdir) doğru olduğundan tam çıxış signalını $y(t)$ tapmaq üçün $dy(t)$ ifadəsini bütün tezliklər üzrə toplamaq lazımdır. Bu vaxt aşağıdakı ifadə alınır:

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(j\omega) K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (9.5)$$

burada $y(t)$ – ifadəsini Furiye integralı formasında göstərmək olar

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_y(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (9.5,a)$$

Göstərilən ifadələrin (2.5) və (2.5a) bərabərliyindən

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(j\omega) K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_y(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

yazmaq olar.

Buradan

$$S_x(j\omega) K(j\omega) = S_y(j\omega) \quad (9.6)$$

Beləliklə çıxış signalı spektri, giriş signalı spektrinin amplitud-tezlik xarakteristikası hasilinə bərabərdir. Bu ifadə nəinki dövrü və qeyri-dövrü signallar üçün, həm də stasionar təsadüfi signallar üçün də doğrudur. Odur ki,

$$W_y(\omega) = |K(j\omega)|^2 W_x(\omega) \quad (9.7)$$

burada $W_y(\omega)$ və $W_x(\omega)$ – giriş və çıxış signallarının energetik spektri; $|K(j\omega)|$ – amplitud-faza xarakteristikasının moduludur.

Alınmış ifadəyə əsasən belə nəticəyə gəlmək olar ki, xətti qurğuların işi istənilən asılı olmayan təsiri nəticəsində amplitud-faza xarakteristikası ilə təyin edilir və aşağıdakıları təyin etməyə imkan verir:

– çevrilmiş signal spektrini giriş signalı spektri və amplitud-faza xarakteristikasına görə

$$S_y(j\omega) = S_x(j\omega)K(j\omega)$$

– giriş signalı spektrini çevrilmiş signal spektri və qurğunun spektral xüsusiyyətinə görə

$$S_x(j\omega) = S_y(j\omega)[K(j\omega)]^{-1}$$

– giriş və çevrilmiş siqnallar spektrlərinə amplitud-faza xarakteristikasını

$$K(j\omega) = S_y(j\omega)[S_x(j\omega)]^{-1}$$

Qurğunun zaman xarakteristikaları keçid funksiyasının $h(t)$ və impuls reaksiyasının $g(t)$ köməyilə daha universal olaraq göstərilir.

Keçid funksiyası dedikdə qurğunun vahid funksiya forma-sında reaksiyası nəzərdə tutulur. İmpuls keçid xarakteristikası, yaxud impuls reaksiyası vahid impulsun təsirinin nəticəsidir. Əgər qurğunun keçid funksiyası və impuls reaksiyası məlumdursa, ixtiyari təsirə qarşı reaksiyasını təyin etmək. Tutaq ki, $x(t)$ ixtiyari qeyri-dövri siqnaldır və onu Dyumel formasında ifadə etmək olar

$$x(t) = \int_0^t x'(\tau)\sigma(t-\tau)d\tau \quad (9.8)$$

İnteqral cəmi sonsuz kiçik amplitudaya xas gecikən vahid funksiyanı $\sigma(t-\tau)$ aşağıdakı kimi ifadə etmək olar

$$dx = \frac{d}{dt}[x(t)]d\tau = x'(\tau)d\tau \quad (9.9)$$

Qurğunun girişinə sonsuz kiçik amplitudalı vahid funksiya formasında elementar impuls versək

$$dx(t) = x'(\tau)\sigma(t-\tau)d\tau \quad (9.10)$$

çıxışa da elementar

$$dy(t) = x'(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (9.11)$$

çıxış signalı təsir edir. Burada $h(t-\tau)$ qurğunun keçid funksiyasıdır.

Xətti qurğular üçün superpozisiya prinsipi doğru olduğundan tam reaksiyanı aşağıdakı kimi ifadə etmək olar

$$y(t) = \int_0^t x'(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (9.12)$$

Bu ifadə çıxarıldıqda $t = 0$, $x(0) = 0$ və $h(0) = 0$ olduğu, bəzi hallarda $x(0) \neq 0$, yaxud $h(0) \neq 0$ başlanğıc şərtlərini sıfır qiymətli olması nəzərə alınmışdır. Odur ki, (9.12) ifadəsini belə yazmaq olar:

$$y(t) = x(0)h(t) + \int_0^t x'(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (9.13)$$

Əgər signal qrafiki verilsə və keçid funksiyası məlum olarsa, onda çıxış signalını elementar reaksiyasını sonlu cəmi kimi göstərmək olar

$$y(t) = x(0)h(t) + \sum_{k=1}^n \Delta x h(t-k\Delta\tau)\Delta\tau \quad (9.14)$$

Əgər signalı vahid impulsların integral cəmi $\delta(t)$ kimi göstərsək:

$$x(t) = \int_0^t x(\tau)\delta(t-\tau)d\tau \quad (9.15)$$

Onda çıxış signalı $y(t)$ bu cür təyin edilə bilər:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)g(t-\tau)d\tau \quad (9.16)$$

burada $g(t-\tau)$ qurğunun impuls reaksiyasıdır.

Vahid impulsu həmin impulsun zamana uyğun birinci törəməsi kimi göstərmək mümkün olduğundan

$$\delta(t) = \frac{d}{dt}[\sigma(t)] \quad (9.17)$$

xətti qurğularda impuls reaksiyası həmin ifadəyə uyğun keçid funksiyası ilə əlaqədardır

$$g(t) = \frac{d}{dt}[h(t)] \quad (9.18)$$

Ümumi halda (9.16) ifadəsi sıfır başlanğıc şərtinə görə bu formada yazıla bilər

$$y(t) = x(t)h(0) + \int_0^t x(\tau)g(t-\tau)d\tau \quad (9.19)$$

Beləliklə, xətti qurğunun işi və onun reaksiyası $y(t)$ ixtiyari hissəyə $x(t)$ əsasən tamamilə amplitud-faza xarakteristikasının $K(j\omega)$, yaxud keçid $h(t)$ və impuls reaksiyasının $g(t)$ köməyi ilə təyin edilir:

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(j\omega)K(j\omega)e^{j\omega t}d\omega = \\ &= \int_0^t x'(\tau)h(t-\tau)d\tau = \int_0^t x(\tau)g(t-\tau)d\tau \end{aligned} \quad (9.20)$$

Göstərilən hər üç xarakteristika arasında eyni qiymətli əlaqə olub, müxtəlif olmaqla xətti qurğunun xüsusiyyətini eyni sıxlıqla xarakterizə edir. Bu əlaqə xətti qurğunun girişinə vahid impuls verdikdə, bu şərtlə qurğunun reaksiyası onun impuls reaksiyası, yaxud vahid funksiya $\sigma(t)$, bu halda $y(t) = h(t)$ olarsa daha aydın görünür. Tutaq ki, $x(t) = \delta(t)$. Onda

$$\begin{aligned}
 y(t) = g(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(j\omega) K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega = \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega
 \end{aligned} \tag{9.21}$$

çünkü vahid impulsun spektral sıxlığı vahidə bərabərdir. Odur ki,

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

həm də

$$K(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt$$

olduğu doğrudur.

Əgər $x(t) = \sigma(t)$. Onda

$$S_x(j\omega) = \frac{1}{j\omega}$$

və

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K(j\omega)}{j\omega} e^{j\omega t} d\omega \tag{9.22}$$

Xətti qurğunun amplitud-faza xarakteristikasının energetik spektral sıxlığı tezlikdən asılı olmayan $\mathbf{W}_x(\omega) = a = \text{const}$ təsadüfi siqnal təsir etdikdə də təyin etmək olar. Məsələn, elektronun naqillərdə istilik funksiyası vaxtı yaratdığı «ağ» gurultu formasında siqnal belə xassəyə malikdir. Bu halda

$$|K(j\omega)|^2 = \frac{1}{a} W_y(\omega)$$

Ümumi halda giriş spektrinə və məlum amplitud-faza xarakteristikasına görə çevrilmiş signalın asan təyin edilməsi aldadıcı təsəvvür yaradır. Çünki

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(j\omega) K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

inteqralını adi halda hesablamaq çətindir. Bundan başqa, giriş signalı t – bütün həqiqi qiymətlərinə görə hesablanmalıdır və

$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt$ inteqralı yığılan olmalıdır. Bu isə çoxlu sayda vacib

signalın çevrilməsi məsələsini Furyc inteqralının köməyi ilə həll etməkdə çətinlik törədir. Bu çətinlik Laplas çevrilməsini tətbiq etməklə bir qədər aradan qaldırılır.

9.2. Xətti qurğularda signalların təhrifsiz çevrilməsi şərtləri

Signalın təhrifsiz çevrilməsində çıxışdakı signal girişə nəzərən t vaxtı qədər gecikir və intensivliyinə görə fərqlənir, yəni

$$y(t) = K_0 x(t - \tau)$$

burada

$$K_0 = \text{const} \quad (9.23)$$

Spektral təhlil baxımından bu şərtin ödənməsi üçün

$$S_y(j\omega) = K_0 S_x(j\omega) e^{-j\omega\tau} \quad (9.24)$$

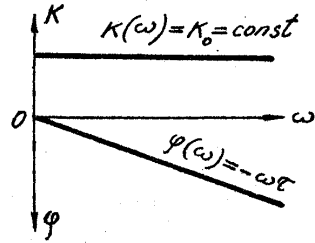
yaxud

$$A_y(\omega) = K_0 A_x(\omega) e^{j\varphi_y(\omega)} = e^{j\varphi_y(\omega) - j\omega\tau}$$

olmalıdır.

Çıxış signalının amplitud spektri ilk qiymətdən K_0 dəfə çox (az) fərqli olan spektr təşkilədicilərinə malik olur. Bu isə amplitud-tezlik xarakteristikasının tezlikdən asılı olmadığını göstərir (şəkil 9.1). Bu halda faza-tezlik xarakteristikası sabit dikliyə malik olmalıdır, yəni

$$\varphi(\omega) = -\omega\tau$$



Şəkil 9.1. Amplitud, faza-tezlik xarakteristikaları

burada

$$\tau = \text{const}$$

Real radioelektron qurğularının bu cür xarakteristikaları olmur. Çünki signal az və çox dərəcədə təhrif olunur. Odur ki, real qurğularda siqnalların təhrifsiz çevrilməsi şərti – amplitud-tezlik xarakteristikasının müntəzəm, faza-tezlik xarakteristikasının isə signal spektrünün əsas hissəsinin toplandığı zolaqda ω_H -dən – ω_B -dək düzxətli olmasıdır.

Bu qayda ilə real radioelektron qurğuları məhdud tezlik zolağına $\Delta\omega = \omega_j - \omega_a$ malikdirki, burada çevrilmənin təhrifsiz getməsi şərti ödənilir. Təhrifsiz buraxılan tezlik zolağının məhdudlaşdırılması qurğunun ətalətli olmasını, qərarlaşmış rejimə aramla keçməsinə və təsirinin uzun müddət «yadda» saxlanmasını və onun normal vəziyyətə sakit keçməsinə göstərir. Qurğunun sakit haldan qərarlaşmış iş rejiminə keçməsi, qərarlaşmış müddəti t_q , yaxud keçid prosesinin uzunluğu adlanır.

Xətti qurğularda, onun buraxma zolağı ilə keçid prosesinin uzunluğu arasında bu cür asılılıq mövcuddur:

$$\Delta f t_q \approx 1 \quad (9.32)$$

Bu onu göstərir ki, təhrifsiz buraxılan tezlik zolağı nə qədər geniş olarsa, qərarlaşmış vaxtı bir o qədər az olar, yaxud əksinə kiçik buraxma zolağına uyğun qərarlaşmış vaxtı çox olur.

9.3. Qeyri-xətti qurğular

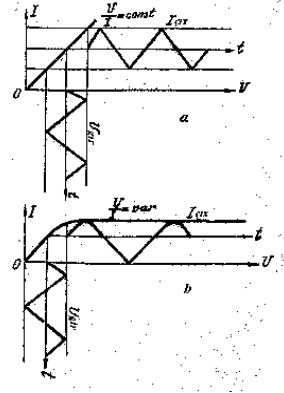
Ciddi desək, texnikada xətti elementlər yoxdur. Həqiqətdə, hətta məftilli rezistorun müqaviməti də qeyri-xəttidir.

$$R = R_0(1 + \alpha T) = R_0 + R(I) \quad (9.33)$$

burada R_0 – rezistorun başlanğıc müqaviməti; T – mütləq temperatur; α – temperatur əmsalidir.

Rezistordan nə qədər çox cərəyan keçərsə, temperatur bir o qədər yüksəlir, buna uyğun rezistorun müqaviməti də artır. Yəni, real rezistorun müqaviməti sabit olmayıb, ondan keçən cərəyanın qiymətindən asılıdır. Bu qayda ilə radioelektronika qurğularının digər elementləri kondensatorlar, induktiv sargac, transformator, elektron lampalar, diodlar, tranzistorlar da qeyri-xətti elementlərdir. Odur ki, həmin elementlər iştirak edən qurğular da qeyri-xətti olub, əsas girişə verilən idarəedici siqnaldan asılıdır.

Qeyri-xəttilik çıxış signalının forma və spektrinin təhrifinə səbəb olur. Məsələn, şəkil 9.2,a-da xətti elementin volt-ampere xarakteristikası göstərilmişdir. Girişə təsir edən üçbucaq formalı siqnalın təsirindən çıxışdakı siqnal da üçbucaq formalıdır. Qeyri-xətti elementlər isə (şəkil 2.2,b) çıxış signalının forması və onun spektri xeyli dərəcədə təhrif olunur. Qurğunun qeyri-xəttilik dərəcəsini amplitud xarakteristikasının köməyiylə göstərmək olar:



Şəkil 9.2. Xətti elementin volt-ampere xarakteristikası

$$U_{cix} = \psi(U_{gir})$$

Amplitud xarakteristikası kvadratik olan qurğuya baxaq

$$U_{\text{cix}} = \alpha U_{\text{gir}}^2$$

Bu qurğunun girişinə sinusoidal signal verdikdə çıxışdakı signalın forması aşağıdakı kimi olur:

$$U_{\text{gir}}(t) = \alpha (U \sin \omega t)^2 = \frac{\alpha U^2}{2} (1 - \cos 2\omega t) \quad (9.34)$$

Beləliklə, signalın spektri xeyli təhrif olunmuş, çıxışda ω tezlikli sinusoidal rəqslər əvəzinə 2ω tezlikli və sabit təşkilediciyə malik rəqslər alınmışdır. Əgər girişə daha mürəkkəb, məsələn, iki sinusoidal rəqslərin cəmi formasında signal təsir göstərsə,

$$\begin{aligned} U_{\text{cix}}(t) &= \alpha (U_1 \sin \omega_1 t + U_2 \sin \omega_2 t)^2 = \\ &= \frac{\alpha}{2} (U_1^2 + U_2^2 - U_1^2 \cos 2\omega_1 t - U_2^2 \cos 2\omega_2 t) + \\ &\quad + \alpha U_1 U_2 [\cos(\omega_1 - \omega_2)t - \cos(\omega_1 + \omega_2)t] \end{aligned} \quad (9.35)$$

burada çıxış signalı spektri nəinki sabit təşkiledicidən və ikiqat tezlikli harmonikadan, həm də tezlik birləşmələrindən ($\omega_1 - \omega_2$) və ($\omega_1 + \omega_2$) ibarət harmonikalardan ibarət olur.

Ümumi halda, praktiki olaraq istənilən qurğunun amplitud xarakteristikası dərəcəli polinomla aproksimasiya edilə bilər.

$$U_{\text{cix}}(t) = \alpha U_{\text{gir}} + \beta U_{\text{gir}}^2 + \gamma U_{\text{gir}}^3 + \delta U_{\text{gir}}^4 + \varepsilon U_{\text{gir}}^5 + \dots \quad (9.36)$$

Yuxarıda baxılan hallarda qeyri-xəttiliyə səbəb elektron qurğularında olan ətalətsiz elementlərin: rezistorların, lampaların, tranzistorların, fotorezistorların və s. olmasıdır. Qurğuda qeyri-xətti ətalətsiz elementlərdən əlavə, qeyri-xətti elektriki ətalətli elementlər də: seqnetoelektrikli kondensatorlar, ferromaqnit nüvəli induktiv sargacalar mövcuddur. Bunlardan başqa ətalətli istilik elementləri: tranzistorlarda

vardır ki, bu elementlər çıxış signalını nəzərə çarpacaq dərəcədə təhrif edirlər. Bu vaxta qədər qeyri-xətti qurğuları təhlil etmək üçün, ümumiləşdirilmiş universal spektral və zaman xarakteristikaları yoxdur, hər bir müəyyən təhlil halında konkret siqnalları və qurğuları nəzərə almaq lazım gəlir.

Beləliklə, qeyri-xətti elementlərdə çıxış signalı spektrinin forması giriş signalının forması və qiymətinə oxşamayıb, qeyri-xətti asılı olur. Bu halda çıxış signalı spektrində giriş signalının yüksək tezlikli harmonikalarından əlavə, qarışıq tezliklər də olduğundan, istənilən elektrik siqnallarının formasını çevirmək mümkündür. Lakin çox halda radioelektron qurğularının qeyri-xəttiliyi arzu olunmaz və yolverilməzdir. Müxtəlif ölçü cihazları qurğularının gücləndiriciləri xətti rejimdə işləməlidirlər. Ancaq bütün aktiv elementlər qeyri-xətti olduğundan onların qeyri-xəttiliyini aradan qaldırmaq və ya kifayət qədər minimal qiymətə endirmək məsələsi meydana çıxır. Qeyri-xəttiliyi tam yox etmək praktiki olaraq qeyri-mümkündür; lakin onun təsirini azaltmaq nisbətən asandır. Tutaq ki, kvadratik amplitud xarakteristikalı qurğu verilmişdir:

$$U_{\text{cix}}(t) = \alpha U_{\text{gir}}^2$$

Əgər giriş signalı kiçik amplitudlu faydalı dəyişən toplanan - $\Delta U \sin \omega t$ və köməkçi sabit U_0 toplanandan ibarət olarsa,

$$U_{\text{cix}}(t) = 2[U_0 + \Delta U \sin \omega t]^2 = \alpha \left[U_0 + \frac{\Delta U^2}{2} - \frac{\Delta U^2}{2} \cos 2\omega t + 2U_0 \Delta U \sin \omega t \right] \quad (9.37)$$

Çıxış siqnalının sabit toplananı $U_0 + \frac{\Delta U^2}{2}$ asanca süzülə bilər (məsələn, bölüşdürücü kondensator vasitəsilə). Çıxış siqnalının dəyişən toplananı

$$\begin{aligned} U_{\text{cix}}(t) &= 2\alpha U_0 \Delta U \sin \omega t - \alpha \frac{\Delta U^2}{2} \cos 2\omega t = \\ &= 2\alpha U_0 \Delta U \left[\sin \omega t - \alpha \frac{\Delta U}{4U_0} \cos 2\omega t \right] \approx \quad (9.38) \\ &\approx 2\alpha U_0 \Delta U \sin \omega t \end{aligned}$$

Əgər $4U_0 \gg \Delta U$.

Göründüyü kimi, U_0 sabit toplanan nə qədər böyük və dəyişən toplananın amplitudası ΔU kiçikdirsə, bunların nisbəti də o qədər kiçik və amplitud xarakteristikası qeyri-xəttiliyinin təsiri azdır. Müasir radioelektronikada elektronlampaları, bipolyar və unipolyar tranzistorlar kimi kifayətdə qeyri-xətti gücləndirici elementlərdən istifadə etməklə, müxtəlif gücləndirici qurğuların yaradılmasında qeyri-xətti amplitud xarakteristikalarının xəttiləşdirilməsi metodundan geniş istifadə olunur. Bütün hallarda işçi xətti rejimi təmin etmək üçün idarəedici elektrodla gücləndirilən giriş siqnalı gərginliyi ilə birlikdə sabit gərginlik verilir.

9.4. Parametrik qurğular

Ötürmə əmsalı, giriş və çıxış müqavimətləri, kökləmə tezliyi və s. parametrləri verilmiş qanunla dəyişən qurğular parametrik qurğular adlanır. Məsələn, ötürmə əmsalı sinusoidal qanunla dəyişən parametrik qurğuya baxaq:

$$K(t) = K_0 \sin \omega_0 t \quad (9.39)$$

Tutaq ki, qurğunun giriş gərginliyi sinusoidal, amplitud qiyməti isə azdır. Onda

$$\begin{aligned}
 U_{\text{cix}}(t) &= U_{\text{gir}}(t)K(t) = U_s \sin \omega_s t K_0 \sin \omega_0 t = \\
 &= \frac{U_s K_0}{2} [\cos(\omega_0 - \omega_s)t - \cos(\omega_0 + \omega_s)t]
 \end{aligned}
 \tag{9.40}$$

Beləliklə, parametrin qurğular, qeyri-xətti qurğular kimi siqnalın spektrini dəyişdirir. Ancaq parametrik qurğular, qeyri-xətti qurğulardan fərqli olaraq siqnalın amplitudasını qeyri-xətti dəyişdirmir, yəni çıxış siqnalının amplitudasına mütənasib olur. Ümumi halda göstərilən şərt yerinə yetirilmir, çünki istənilən parametrik qurğuda qeyri-xətti elementlərdən istifadə edilir.

Əgər giriş siqnalı iki sinusoidal siqnalın cəmindən ibarətdirsə, yəni

$$\begin{aligned}
 U_{\text{cix}}(t) &= K_0 \sin \omega_0 t [U_1 \sin \omega_1 t + U_2 \sin \omega_2 t] = \\
 &= \frac{K_0 U_1}{2} [\cos(\omega_0 - \omega_s)t - \cos(\omega_0 + \omega_s)t] + \\
 &\quad + \frac{K_0 U_2}{2} [\cos(\omega_0 - \omega_s)t - \cos(\omega_0 + \omega_s)t]
 \end{aligned}
 \tag{9.41}$$

Bu bərabərlikdə hər bir siqnal sinusoidal ötürmə əmsalı funksiyasının qiymətinə vurulur. Bu onu göstərir ki, parametrik qurğulara da xətti sistemlərdə olduğu kimi superpozisiya prinsipini tətbiq etmək olar.

Xətti rejimdə işləyən parametrik qurğuların amplitud-faza xarakteristikası nəinki tezlikdən, həm də zamandan asılıdır. Odur ki, onun təyini üçün ümumi analitik metod yoxdur.

Bu qayda ilə parametrik qurğuların keçid xarakteristikası və impulsın reaksiyası həm zamandan, həm də ötürmə əmsalından zamana uyğun dəyişmə-sindən asılıdır.

9.5. Radioelektron qurğularının ümumiləşdirilmiş xarakteristikalarına aid sərbəst işlər

1. Xətti qurğunun amplitud-faza xarakteristikası $K(j\omega) = j\omega A(1 + j\omega D)^{-1}$ olub, $A = \text{const}$.

İşarəsi dəyişən düzbucaqlı gərginlik bu xətti qurğudan keçirmək onun amplitud spektrinin necə dəyişəcəyini müəyyən edib qrafikdə təsvir edin (1-ci fəsildə 1 sərbəst işə bax). Qəbul edilirki, $T = A = 1$.

2. Giriş və çıxış siqnallar spektrləri: $S_{\text{gir}}(j\omega) = B = \text{const}$; $S_{\text{cix}}(j\omega) = B(1 + j\omega D)^{-1}$ məlum olan xətti qurğunun amplitud-faza xarakteristikasını təyin etməli.

3. Uzunluğu $\tau_{\text{ef}} \geq 10^{-6}$ san olan impulsları gücləndirmək üçün nəzərdə tutulmuş gücləndirici hansı minimal buraxma zolağına malik olmalıdır?

4. Əgər $U_{\text{gir}}(t) = U \sin \omega t$ isə, amplitud xarakteristikası $U_{\text{cix}} = \alpha U_{\text{gir}} + \beta U_{\text{gir}}^2 + \gamma U_{\text{gir}}^3$ olan qeyri-xətti qurğunun çıxışındakı siqnalın spektrini təyin etməli.

10-cü fəsil

YARIMKEÇİRİCİ CİHAZLAR

10.1. Yarımkeçiricilərin elektrik keçiriciliyi

Elektrik keçiriciliyinə görə naqillərlə dielektriklər arasında orta vəziyyət tutan materiallara yarımkeçiricilər deyilir. Naqillərin xüsusi həcmi elektrik müqaviməti 10^{-8} - 10^{-5} Om.m, dielektriklərindəki 10^7 - 10^{16} Om.m olduğu halda, yarımkeçiricilər üçün bu kəmiyyət 10^{-5} - 10^7 Om.m-ə bərabərdir.

Yarımkeçiricilər üçün elektrik keçiriciliyinin temperaturadan, elektrik sahəsindən, işıqlanmadan, sıxılmadan və s. təsirlərdən çox asılı olması xarakterikdir.

Elektronikada ən çox istifadə olunan yarımkeçirici maddələrə germanium, silisium və qallium arsenidi aiddir. Yarımkeçiricinin, məsələn, germaniumun kristal qəfəsinin quruluşuna baxaq (şəkil 10.1,a). Məlumdur ki, germanium dördvalentli elementdir. kristalda hər atom dörd yaxın atomla kovalent rabitədədir. Atomun bütün elektronları kovalent rabitədə iştirak edir. Belə ideal kristal qəfəsdə mütləq sıfır temperaturda sərbəst elektronlar yoxdur və buna görə də kristal cərəyanı keçirmir. Temperatur mütləq sıfırdan böyükdürsə, istilik hərəkətindən enerjisi artmış elektronların bəziləri rabitələrdən azad olur. Nəticədə kristalda sərbəst elektronlar yaranır. Elektron itirmiş atom müsbət yüklənir. Atomda boş qalmış yer başqa elektronla tutula bilər. Elektron-boş yer cütünün yaranması prosesi əks proseslə, bu cütlərin rekombinasiyası ilə müşayiət edilir.

Əgər kristallı elektrik sahəsində yerləşdirsək, onda elektronların hərəkəti hesabına elektrik cərəyanı yaranacaq. Eyni zamanda əks istiqamətdə boş yerlərin hərəkəti meydana çıxacaq, atomda boş yer qonşu atomun elektronu keçəcəkdir. Nəticədə kristalda elektronların və boş yerlərin nizamlı hərəkəti, yəni elektrik cərəyanı əmələ gələcəkdir.

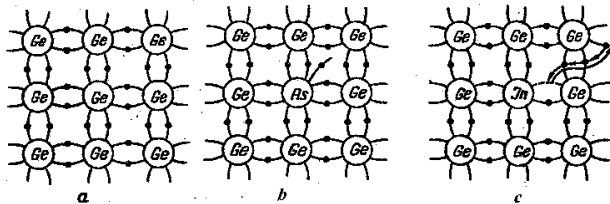
Sərbəst elektronların hərəkəti ilə əlaqədar elektrik keçiriciliyinə elektron, yaxud n tipli (neqative), boş yerlərin

hərəkəti ilə əlaqədar elektrik keçiriciliyinə p tipli (positive) keçiricilik deyilir.

Saf yarımkəçiricilərdə n -tipli keçiricilik p tipli keçiriciliyə bərabər olduğuna görə onların keçiriciliyi qarışıq olur. Saf keçiriciliyə aşqar qatmaqla n tipli, yaxud p tipli keçiriciliyi artırmaq olar. Artıq n tipli keçiricilik yaranan aşqara donor, artıq p tipli keçiricilik yaranan aşqara akseptor aşqar deyilir.

Kristalik qəfəsdə beşvalentli aşqar, məsələn, arsen atomu olduqda (şəkil 10.1,b) onun valent elektronlarından dördü kovalent rabitəyə daxil olur, beşinci elektron isə yalnız aşqarın atomu ilə qarşılıqlı təsirdə qalır. Buna görə də beşinci elektron asanlıqla arsen atomunu tərk edib, xarici elektron sahəsinin təsiri ilə hərəkət edir. Yarımkəçiricid müəyyən qədər aşqar atomları olduqda çoxlu sayda sərbəst elektronlar yaranır və belə yarımkəçiricidə n tipli keçiricilik üstünlük təşkil edir. Belə yarımkəçiriciyə n tipli yarımkəçirici deyilir.

Yarımkəçiriciyə üçvalentli aşqar, məsələn, indium daxil etdikdə tamamilə başqa xarakterli keçiricilik yaranır. Üçvalentli indium atomu germaniumun dörd atomu ilə (şəkil 10.1,b) kovalent rabitəyə girir, lakin rabitələrdən birində elektronla tutulmamış bir boş yer qalır. Xarici elektrik sahəsinin təsiri ilə qonşu atomun elektronu bu boş yeri tuta bilər. Azad olmuş yerə öz növbəsində başqa qonşu atom elektronu keçə bilər və s. Beləliklə, elektronların növbə ilə hərəkəti mümkün olur. Bu zaman elektronlar yarımkəçiricinin atomlarından uzaqlaşmayaraq, həmişə onlarla qarşılıqlı təsirdə olur.



Şəkil 10.1. Keçiricilik qəfəsi

Elektronların belə ardıcıl yerdəyişməsinə, tama-milə şərti olaraq, elektronların hərəkətinin əksi istiqamətində boş yerlərin (müsbət yüklü) hərəkəti kimi baxmaq daha münasibdir. Müəyyən miqdar akseptor aşqar daxil edilmiş yarımkeçiricidə p tipli keçiricilik üstünlük təşkil edir və o, p tipli keçirici adlanır.

Təcrübədə xalis donor və yaxud xalis akseptor aşqarlı yarımkeçirici həmişə hər iki tip keçiriciliyə malikdir. Lakin bunlardan biri üstünlük təşkil edir.

Yaxşı elektrik xarakteristikalarına malik yarımkeçirici cihaz almaq üçün aşqarın hər bir atomunun payına 10^8 - 10^9 yarımkeçirici atomu düşən saf yarımkeçiricilərdən istifadə edilir. n tipli və p tipli keçiricilik yaratmaq üçün saf yarımkeçiricilərə qatılan aşqarın konsentrasiyası daha böyük olmalıdır: aşqarın bir atomunun payına yarımkeçiricinin 10^6 - 10^7 atomu düşür.

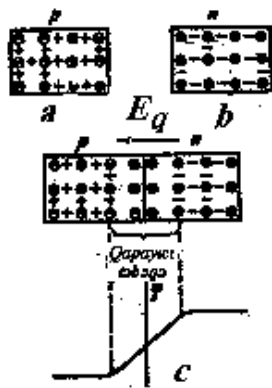
Qeyd etmək lazımdır ki, temperaturun artması yarımkeçiricidə kovalent rabitələrin bəzilərinin pozulmasına səbəb olur və nəticədə yarımkeçiricinin müqaviməti azalır. Yarımkeçiricidə əmələ gələn belə qeyri-əsas yükdaşıyıcıları onun elektrik xarakteristikalarını pisləşdirir. Germanium kristalının işçi temperaturu $85 \div 100^\circ\text{C}$ -dən, silisium üçün isə 150 - 200°C -dən çox olmamalıdır.

10.2. Yarımkeçirici diod. Stablitrondlar

Müxtəlif keçiricilikli iki yarımkeçiricidən ibarət cihaza yarımkeçirici diod deyilir. p və n -tipi keçiriciliyə malik iki yarımkeçiricinin toxunduqları səth p - n keçidi adlanır. p - n keçidinin elektrik xassələri yarımkeçirici diodun elektrik xarakteristikalarını təyin edir. Nə qədər ki, yarımkeçiricilər bir-birinə toxunmur, onlardakı yükdaşıyıcıları yarımkeçiricinin bütün həcmi boyu bərabər paylanır. Hərəkətdə olmayan ionlar da bu həcm boyu bərabər paylanır (şəkil 10.2, a, b).

Yarımkeçiriciləri bir-birinə toxundurduqda sərhəd təbəqədə elektron və boş yerlərin rekombinasiyası nəticəsində sərhədin yaxınlığında hərəkət edən yükdaşıyıcılarından məhrum olmuş təbəqə əmələ gəlir. Odur ki, bu sərhəd təbəqə böyük elektrik müqavimətinə malik olur və qapayıcı təbəqə adlanır (şəkil 10.2, c). Qapayıcı təbəqənin qalınlığı, adətən bir neçə mikrondan artıq olmur.

Praktikada p-n keçidinin mexaniki üsut ilə alınması çətin olduğundan əritmə və yaxud diffuziya metodundan istifadə edirlər. Bircins, adətən n-tipli yarımkeçiricinin müəyyən hissəsinə əridilməklə və yaxud diffuziya metodu ilə akseptor aşqar atomları daxil edilir.



Şəkil 10.2. Yarımkeçiricilərin sərhəddində qapayıcı təbəqə

Yarımkeçiricinin həmin hissəsində p tipli keçiricilik, n yarımkeçiricisi ilə sərhəddə isə qapayıcı təbəqə yaranır.

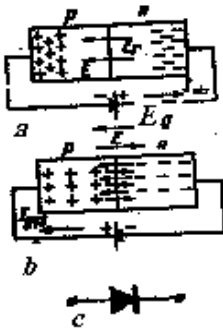
Qapayıcı təbəqənin genişlənməsinə sərhəddə aşqarların hərəkətsiz ionlarının yaratdığı ikiqat elektrik təbəqəsi maneçilik törədir. İkiqat elektrik təbəqəsi yarımkeçiricilərin kontakt (toxunma) potensiallar fərqi (potensial səddini) təyin edir (şəkil 10.2,c). Meydana çıxan potensial fərqi qapayıcı təbəqədən əsas yükdaşıyıcılarının hərəkətinə maneçilik törədən E_q intensivlikli elektrik sahəsi yaradır.

Əgər dioda xaricdən qapayıcı təbəqədə E_q xüsusi sahə ilə eyni istiqamətli E_{xar} intensivlikli elektrik sahəsi yaradan gərginlik tətbiq etsək (şəkil 10.3,a), bu qapayıcı təbəqənin yalnız genişlənməsinə səbəb olacaqdır. Nəticədə p-n keçidinin müqaviməti böyük, diodun cərəyanı isə kiçik olacaqdır. Bu cərəyan əks cərəyan deyilir.

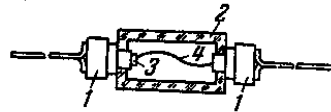
Dioda gərginliyi əks istiqamətdə tətbiq etdikdə (şəkil 10.3,b) xarici elektrik sahəsi xüsusi sahənin əksinə yönələrək qapayıcı təbəqənin qalınlığını azaldır və gərginlik 0,3-0,6 V

olduqda qapayıcı təbəqə tamamilə yox olur. p-n keçidinin müqaviməti şiddətlə azalır, dioddan böyük cərəyan keçir. Bu cərəyana düz cərəyan deyilir. Düz istiqamətdə diodun müqaviməti yalnız yarımkeçiricinin müqaviməti ilə təyin edilir. Düz cərəyanın yaranmasında həm müsbət, həm də mənfi yükdaşıyıcıları iştirak edir, belə ki, ümumi cərəyan müsbət və mənfi (boşyer) yüklərin yaratdıqları cərəyanların cəminə bərabərdir.

Yarımkeçirici diodun şərti işarəsi şəkil 10.3,e-də göstərilmişdir. Yarımkeçirici diodlar quruluşuna görə nöqtə və müstəvi kontaktlı olur. Nöqtə kontaktlı dioda qalınlığı 0,1-0,6 mm, sahəsi 0,5-1,6 mm² n keçiricilikli germanium, yaxud silisium lövhəciyindən istifadə edilir. Bu lövhəciyə itiüclü məftil qaynaq edilir (şəkil 10.4). Nöqtə kontaktlı diodları hazırladıqda məftillə yarımkeçirici lövhəciyin kontaktından kiçik müddətdə böyük cərəyan buraxırlar ki, bu da kontaktın yaxınlığında p oblastının yaranmasına və yaranmış p oblastı ilə n yarımkeçiricisinin arasında qapayıcı təbəqənin əmələ gəlməsinə səbəb olur.



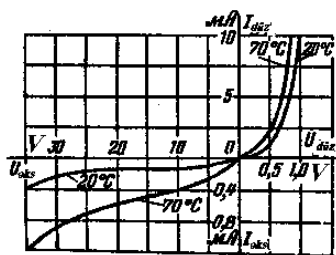
Şəkil 10.3. Yarımkeçirici dioda qida mənbəyinin birləşdirilməsi



Şəkil 10.4. Nöqtə kontaktlı diodun konstruksiyası

Nöqtə kontaktlı diodun müxtəlif temperaturalar üçün voltamper xarakteristikaları şəkil 10.5-də təsvir edilmişdir.

Əyaniliyi artırmaq üçün xarakteristikanın düz və əks cərəyana aid hissələri müxtəlif miqyasda qurulmuşdur. Nöqtə kontaktlı dioda kontakt sahəsinin kiçikliyi düz cərəyanın və p-n keçidinin elektrik tutumunun kiçik olmasına səbəb olur. Ona görə də nöqtə kontaktlı diodlardan çox yüksək tezislərdə istifadə imkanı yaranır.

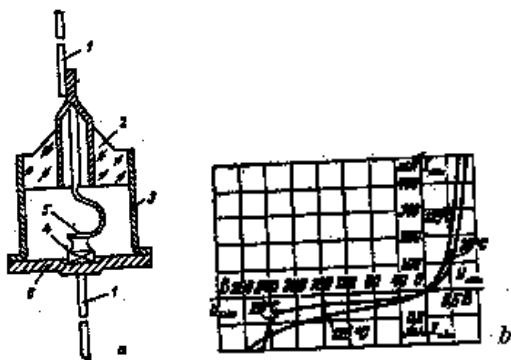


Şəkil 10.5. Nöqtə kontaktlı diodun volt-ampər xarakteristikası

Müstəvi kontaktlı diodlarda p-n keçidi müxtəlif tip keçiricilikli iki yarımkeçirici ilə yaradılır.

Müstəvi kontaktlı diodu hazırladıqda saf yarımkeçiriciyə yaxın məsafələrdə donor və akseptor aşqarlar daxil edirlər. Bunun nəticəsində yarımkeçiricinin bir hissəsi n tipli, digər hissəsi isə p tipli keçiriciliyə malik olur. Müstəvi kontaktlı diodun quruluşu və volt-ampər xarakteristikası şəkil 10.6-da göstərilmişdir.

Keçid sahəsinin böyük olmasına görə müstəvi kontaktlı diodlar böyük cərəyan keçirməyə qadirdir, lakin onların p-n keçidi böyük elektrik tutumuna malikdir.



Şəkil 10.6. Müstəvi kontaktlı diodun konstruksiyası (a) və volt-ampər xarakteristikası (b)

Diodların əks cərəyanı temperatur artdıqca çoxalır. Güclü diodların düz cərəyanla qızma dərəcəsini məhdudlaşdırmaq üçün xüsusi tədbirlər görülür: diodlar radiatorlarda qurulur və yaxud üfürülməklə soyudulur və s.

Dioda təsir edən əks gərginlik müəyyən qiymətə (onlarla, yaxud yüzlərlə volta) çatdıqda, qapayıcı təbəqədə elektrik sahəsi o qədər güclənir ki, əks cərəyan şiddətlə artıb diodu qızdırır və nəticədə p-n keçidinin elektriki dağılmasına səbəb olur. Diodların əksəriyyəti əks gərginliyin p-n keçidinin elektrik möhkəmliyi gərginliyinin 70-80%-nə qədər qiymətlərində etibarlı işləyə bilir.

Fizika kursundan məlumdurki, elektrik sahəsi güclü olduqda bu sahə elektronru atomun valentlik zonasından keçiricilik zonasına qopara bilir. Bu hadisəyə Zener effekti deyilir. Zener effekti ilə əlaqədar hadisə döənən olduğuna görə p-n keçidinin artıq qızması qarşısını alan tədbir gördükdə, diodun əks-deşilmə gərginliyində işləməsi mümkün olur. Bundan başqa, elektrik sahəsində böyük sürət almış elektronlar toqquşaraq valent elektronunu keçiricilik zonasına ata bilir. Nəticədə yükdaşıyıcılar cütü yaranır: keçiricilik zonasında elektron və valentlik zonasında boş yer. Bu cüt öz növbəsində elektrik sahəsində sürətlənərək yeni cütlər yaradır və i.a. Sahənin kifayət intensivliyində proses selvari xarakter alır və əks cərəyan şiddətlə artır. Bu hadisəyə selvari çoxalma effekti deyilir.

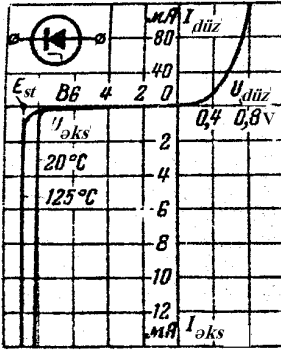
Zener və selvari çoxalma effektlərindən istifadə olunmasına əsaslanmış diodlar sabit gərginliyi stabilləşdirmək üçün tətbiq edilir və yarımkeçirici stabiltronlar adlandırılır.

Silisiyum stabiltronunun volt-ampere xarakteristikası və şərti işarəsi şəkil 10.7-də göstərilmişdir. Qapayıcı təbəqənin qalınlığını dəyişməklə stabilləşdirmə gərginliyi 4-200 V olan stabiltronlar hazırlamaq olur.

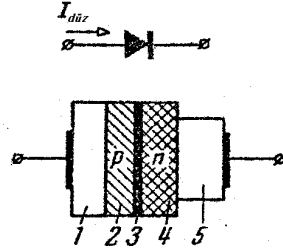
Stabiltronun stabilləşdirmə rejimində dinamik müqavimətinin qiyməti

$$R_d = \frac{dU_{eks}}{dI_{eks}} = 5 \div 50 \text{ Om}$$

olur. Böyük qiymətlər yüksəkvoltlu ($U_{st} = 100-200 \text{ V}$) stabilitronlara aiddir.



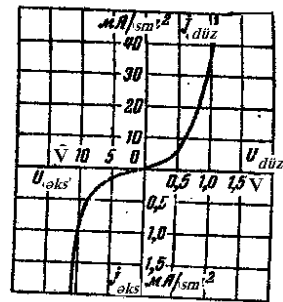
Şəkil 10.7. Silisium stabilitronunun şerti işarəsi və volt-ampər xarakteristikası



Şəkil 10.8. Selen ventiliinin sxematik quruluşu

Germanium və silisium diodlarından başqa nisbətən pis xarakteristikalı selen və miss oksidi ventillərindən də istifadə edilməkdədir. Selen ventiliinin sxematik quruluşu şəkil 10.8-də, volt-ampər xarakteristikası isə şəkil 10.9-da göstəilmişdir.

Selen ventiliində qapayıcı təbəqə (3), p keçiricilikli saf selenlə (2) n keçiricilikli kadmium selenidin (4) toxunma sərhəddində yaranır. Selen ventili bir tərəfdən saf kristallik selenlə (2) örtülmüş və anod vəzifəsini görən alüminium, yaxud polad diskdən (1) ibarətdir. Katod vəzifəsini selenini üzərinə çəkilmiş kadmium və qalay xəlitəsi (5) görür. Kadmium atomlarının selenə diffuziya etməsi nəticəsində n keçiricilikli təbəqə, kadmium-selenin təbəqəsi (4) əmələ gəlir.

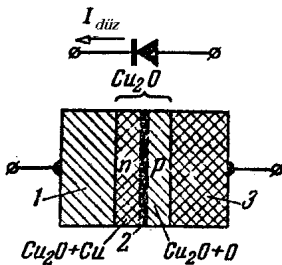


Şəkil 10.9. Selen ventili-nin volt-ampər xarakteristikası

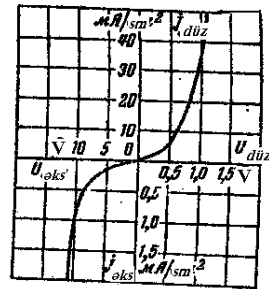
Selen ventili üçün düz cərəyanın yol verilən sıxlığı 50 mA/sm², əks gərginliyin buraxılabilən qiyməti 20-45 V-dur.

Mis oksidin ventildə mis 2-oksidi, oksigen artırıldığı zaman ρ keçiricilikli yarımkəçiriciyə çevrilmə xassəsindən istifadə edilir. Mis oksidi ventilin sxematik quruluşu şəkil 10.10-da, volt-ampər xarakteristikası isə şəkil 10.11-də göstərilmişdir. Mis oksidi ventili, üzərində mis 2-oksidi təbəqəsi çəkilmiş mis diskdən (1) ibarətdir. Yaxşı kontakt yaratmaq üçün bu təbəqənin üzərində qurğuşun disk (8) sıxılmışdır. Mis 2-oksidi təbəqəsi mis oksigen atmosferində termiki emal etdikdə yaranır. Bu zaman mis 2-oksidi xarici təbəqəsi ρ keçiriciliyinə, mis diskə yanaşan təbəqəsi isə oksigen çatışmadığına görə n keçiriciliyinə malik olur. Bu iki təbəqə arasında p-n keçidi (2) yaranır.

Mis oksidi ventili üçün düz cərəyanın yol verilən sıxlığı 50 mA/sm², əks gərginliyin buraxılabilən qiyməti isə 12 V-a qədərdir.



Şəkil 10.10. Mis oksidi ventilin sxematik quruluşu

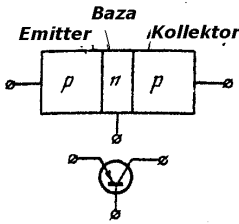


Şəkil 10.11. Mis oksidi ventilin volt-ampər xarakteristikası

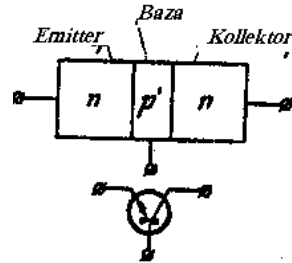
10.3. Yarımkəçirici triodlar

Yarımkəçirici triod və ya tranzistor, elektrik rəqsləri generatoru və gücləndiriciləri kimi istifadə edilən iki p-n keçidinə malik yarımkəçirici cihaza deyilir. İki p-n keçidinə malik olduğuna görə yarımkəçirici triodlar iki tipə ayrılır; p-n-p və

n-p-n. Müstəvi kontaktlı yarımkeçirici triodların quruluşu sxemləri və şərti işarələri şəkil 10.12 və 10.13-də göstərilmişdir.



Şəkil 10.12. p-n-p tipli yarımkeçirici triodun quruluş sxemi və şərti işarəsi



Şəkil 10.13. n-p-n tipli yarımkeçirici triodun quruluş sxemi və şərti işarəsi

Yarımkeçirici triodun mərkəz təbəqəsi baza kənar təbəqələrdən yük mənbəyi olanı emitter, emitterdən gələn yükləri qəbul edən isə kollektor adlanır. Emitter-baza p-n keçidində gərginlik düz istiqamətdə, kollektor-baza p-n keçidində isə əks istiqamətdə verilir (şəkil 10.14). Emitter-baza dövrəsində çox kiçik gərginlik belə, böyük cərəyanı yaradır. Kollektor-baza gərginliyi emitter-baza gərginliyindən bir neçə dəfə böyük olur.

Hər iki tip yarımkeçirici triodun iş prinsipi oxşar olduğuna görə p-n-p tipli triodun işini nəzərdən keçirək. Tutaq ki, emitter-baza dövrəsi açıqdır (şəkil 10.14) və bu dövrədəki cərəyan sıfırdır ($I_e = 0$). Kollektor-baza dövrəsində əks istiqamətdə qoşulmuş gərginliyin (E_k) təsiri ilə kiçik əks-cərəyan ($I_{k,0}$) yaranır. Bu cərəyan tranzistorun parametrlərindən biridir və kiçik qiymətləri yarımkeçiricinin yaxşı kəmiyyətinə dəlalət edir.

Emitter-baza arasında kiçik gərginlikli mənbə qoşduqda (E_c) dövrədə emitter cərəyanı (I_e) əmələ gəlir. Bazaya emitterdən daxil olan boş yerlərin bir hissəsi sərbəst elektronlarla rekombinasiya edir və bu elektronların əvəzi xarici dövrədən bazaya daxil olaraq baza cərəyanını (I_b) yaradır.

Diffuziyanın hesabına boş yerlərin əksəriyyəti hərəkətini davam etdirib, E_k mənbəyinin elektrik sahəsinin təsiri ilə p-n keçidini keçir və kollektora daxil olur (şəkil 10.14,b). Nəticədə baza-kollektor dövrəsində I_k kollektor cərəyanı yaranır:

$$I_k = I_e - I_b$$

Deməli, emitter cərəyanı vasitəsilə kollektor cərəyanını idarə etmək olur.

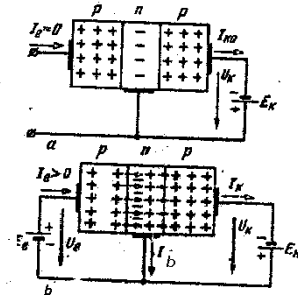
Kollektor cərəyanı artımının (ΔI_k), kollektor gərginliyinin sabitliyi şəraitində, emitter cərəyanı artımına olan nisbətində tranzistorun cərəyanı görə gücləndirmə əmsalı deyilir:

$$\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_e}, \quad (U_k = \text{const}) \quad (10.1)$$

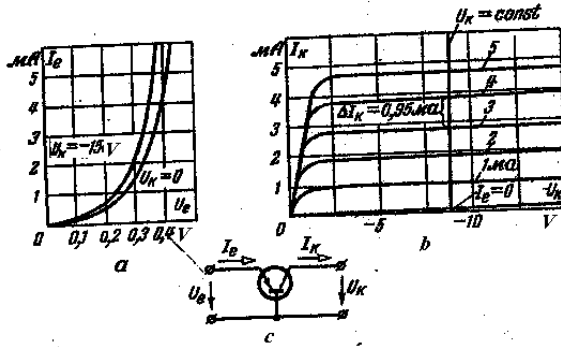
Baxılan sxemdə baza həm emitter və həm də kollektor dövrəsi üçün ümumi elektrod vəzifəsini gördüyünə görə bu sxem ümumi bazalı sxem adlanır. Bu halda emitter dövrəsi giriş, kollektor dövrəsi isə çıxış dövrəsi olur. Giriş və çıxış kəmiyyətlərinin asılılıqları triodun volt-ampere xarakteristikalarını təyin edir (şəkil 10.15). Giriş xarakteristikalarında (şəkil 10.15,a) görünür ki, mənfi kollektor gərginliyini (U_k) artırıqda emitter cərəyanı (I_e) bir qədər artır və xarakteristika sola sürüşür.

Emitter cərəyanının sabit qalması şəraitində ($I_e = \text{const}$) kollektor cərəyanının (I_k) kollektor gərginliyindən (U_k) asılılığına triodun çıxış xarakteristikası deyilir (şəkil 10.15,b). Çıxış xarakteristikasından triodun cərəyanı görə gücləndirmə əmsalını tapa bilərik:

$$\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_e} = \frac{0,95 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} = 0,95$$



Şəkil 10.14. p-n-p tipli yarımkəçirici trioda yükdaşıyıcıların hərəkəti



Şəkil 10.15. Ümumi baza sxemi ilə birləşmiş p-n-p tipli yarımkeçirici triodun volt-ampər xarakteristikaları

Yarımkeçirici triodların ümumi bazalı sxemindən başqa, təcrübədə ümumi emitterli və ümumi kollektorlu sxemlərdən də istifadə edilir (şəkil 10.16). Ümumi emitterli sxem daha geniş yayılmışdır.

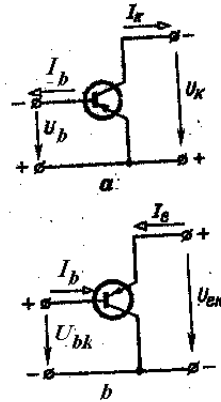
Şəkil 10.17-də p-n-p tipli triodun ümumi emitterli qoşulma sxemi üçün giriş və çıxış xarakteristikaları göstərilmişdir. Belə qoşulma sxemində cərəyana görə gücləndirmə əmsalı belə tapılır:

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} \quad (10.2)$$

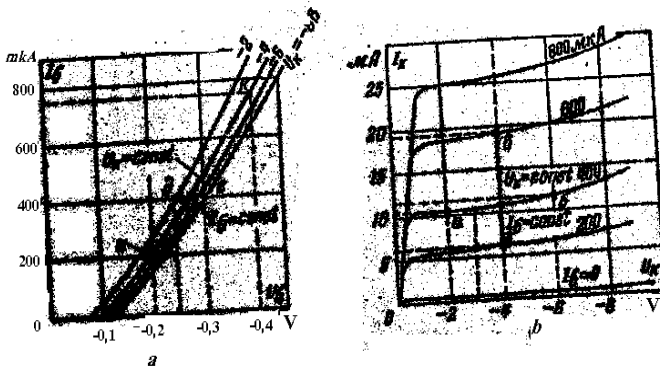
$\Delta I_b = \Delta I_e - \Delta I_k$ olduğunu nəzərə alsaq, tapırıq ki:

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b - \Delta I_k} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (10.3)$$

Mövcud triodlar üçün $\beta = 10 \div 200$ olur.



Şəkil 10.16. Yarımkeçirici triodun qoşulma sxemləri



Şəkil 10.17. p-n-p tipli yarımkəçirici riodun ümumi emitterli qoşulma sxemi üçün giriş (a) və çıxış (b) xarakteristikaları

Yarımkəçirici triodun xarakteristikaları temperaturdan çox asılıdır. Temperatur artdıqca kollektorun başlanğıc cərəyanı (I_{ka}) artır. Kollektor keçidinin artıq qızmasının qarşısını almaq üçün bu keçiddə ayrılan güc buraxılabilən gücdən böyük olmamalıdır:

$$P_k = |I_k U_k| \leq P_{k.bur} \quad (10.4)$$

Bundan başqa, kollektora çox böyük gərginlik verdikdə kollektor keçidi dəşilə bilər, ona görə də bu gərginlik (U_k) buraxılabilən qiymətdən artıq olmamalıdır:

$$|U_k| \leq U_{k.bur} \quad (10.5)$$

Kollektor cərəyanına görə oxşar məhdudlaşdırma

$$I_k \leq I_{k.bur} \quad (10.6)$$

kollektor keçidinin buraxılan qızması ilə təyin edilir.

p-n keçidləri tutumlarından kollektor keçidinin tutumu, yəni kollektorla baza arasındakı tutum (C_k) əhəmiyyət kəsb edir.

Sənaye elektronika sxemlərindən yarımkəçirici triodun elektrodlarına, adətən döyünən gərginlik verilir. Belə gərginliyin tərkibində müxtəlif tezlikli toplananlar olur.

Triodun parametrləri tezlikdən asılı olaraq dəyişir. Yüksək tezliklərdə yükdaşıyıcıların hərəkət müddəti özünü göstər-diyinə görə α əmsalı azalır. α əmsalının $\sqrt{2}$ dəfə azal-masına uyğun tezliyə triodun sərhəd tezliyi (f_{α}) deyilir. Sərhəd tezliyini artırmaq üçün bazanın qalınlığını azaldırlar.

Müasir yarımkeçirici triodların parametrləri cədvəl 10.1-də göstərilmişdir.

Cədvəl 10.1

$U_{k,bur},$ V	$P_{k,bur},$ Vt	$I_{k,bur},$ A	$f_{\alpha},$ mHs	$C_k,$ pF	α
45-100	0,1-60	0,01-12	0,06-120	1-500	0,9-0,995

Yarımkeçirici triodlu sxemləri təhlil etdikdə və hesabladıqda, təbidir ki, onun yalnız cərəyanı gücləndirmə xassəsini xarakterizə edən α və β kəmiyyətləri kifayət deyildir. Elektrik dövrəsinin elementi kimi yarımkeçirici triodu tam xarakterizə etmək üçün dörd müstəqil kəmiyyət lazımdır. Lazımi parametrləri sayının elektron lampa trioduna nisbətən iki dəfə çox olması yarımkeçirici triod xarakteristikalarının müəyyən fərqlənmələri ilə izah edilir. Əvvələn, baza-emitter gərginliyi yarımkeçirici trioda giriş cərəyanı yaradır. Elektron lampa triodunda tor cərəyanı çox vaxt nəzərə alınmır. İkincisi, yarımkeçirici trioda çıxış kollektor gərginliyi giriş xarakteristikalarına təsir göstərir ki, bu hadisə lampa triodunda yoxdur. Bütün bu deyilənlər yarımkeçirici trioda aktiv dördqütblü kimi baxmağa vadar edir. Dördqütblünün sabit əmsalları yarımkeçirici triodun parametrləri olur.

Ölçmə gücləndirici və məntiq sxemlərində ümumi emitterli (ÜE) sxemlər geniş yayıldığına görə bu sxemlə qoşulmuş yarımkeçirici triodun parametrlərini öyrənmək məqsədəuyğundur.

ÜE sxemi ilə qoşulmuş yarımkeçirici triodun elektrik vəziyyəti dörd kəmiyyətlə xarakterizə edilir: I_b , U_b , I_k , U_k . Bu kəmiyyətlərdən ikisi müstəqildir, digər ikisi isə birincilərdən asılı ifadə edilir. Müstəqil seçilmiş

kəmiyyətlərdən asılı olaraq yarımkeçirici triodun müxtəlif parametrlər sistemi meydana çıxır.

Ölçmə və mühəndis hesablamalarını asanlaşdırmaq üçün müstəqil kəmiyyət kimi baza cərəyanı I_b və kollektor gərginliyi U_k daha əlverişlidir. Digər iki kəmiyyət – U_b və I_k müstəqil kəmiyyətlərlə ifadə edilir:

$$U_b = f_1(I_b, U_k), \quad I_k = f_2(I_b, U_k) \quad (10.7)$$

Belə tənliklər sistemi ilə triodun h parametrləri tapılır. Xarakteristikaların xətti hissələrində ΔU_b və ΔI_b artımları üçün yazmaq olar:

$$\begin{aligned} \Delta U_b &= h_{11} \Delta I_b + h_{12} \Delta U_k \\ \Delta I_k &= h_{21} \Delta I_b + h_{22} \Delta U_k \end{aligned} \quad (10.8)$$

burada h_{ik} – parametrləri giriş və çıxış xarakteristikaları ailəsindən asanlıqla tapıla bilər.

$$\left. \begin{aligned} h_{11} &= \left| \frac{\Delta U_b}{\Delta I_b} \right|, & U_k = \text{const}, & \Delta U_k = 0 \\ h_{12} &= \left| \frac{\Delta U_b}{\Delta U_k} \right|, & I_b = \text{const}, & \Delta I_b = 0 \\ h_{21} &= \left| \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} \right|, & U_k = \text{const}, & \Delta U_k = 0 \\ h_{22} &= \left| \frac{\Delta I_k}{\Delta U_k} \right|, & I_b = \text{const}, & \Delta I_b = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10.9)$$

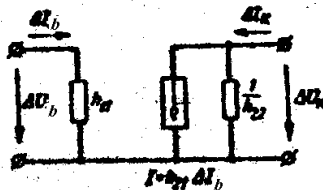
h_{11} parametri sabit kollektor gərginliyində yarımkeçirici triodun giriş müqavimətini ifadə edir: $h_{11} = 100 \div 1000 \text{ Om}$.

h_{12} parametri ölçüsüz daxili əks-rəpətə parametridir. $h_{12} = 0,002 \div 0,0002$. Praktik hesablamalarda $h_{12} = 0$ qəbul edilir.

h_{21} parametri ölçüsüz olub, yarımkeçirici triodun cərəyana görə gücləndirmə xassəsini ifadə edir: $h_{21} = \beta$.

h_{22} parametri keçiricilik ölçüsünə malikdir və yarımkeçirici triodun sabit baza cərəyanında çıxış gərginliyini xarakterizə edir: $h_{22} = 10^{-4} \div 10^{-5}$ Sim/m.

h parametrlərindən istifadə edilməsi yarımkeçirici triod üçün ekvivalent əvəz sxemi çəkməyə imkan verir ki, bu da yarımkeçirici gücləndiricilərin hesabını asanlaşdırır. Yarımkeçirici triodun ÜE sxemi üçün ekvivalent dördqütblü əvəz sxemi şəkil 10.18-də göstərilmişdir ($h_{12} = 0$). Əvəz sxemi (10.8) tənliklərinə əsasən qurulmuşdur.

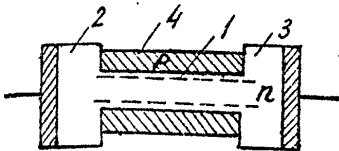


Şəkil 10.18. Triodun ÜE sxemi üçün dördqütblü əvəz sxemi

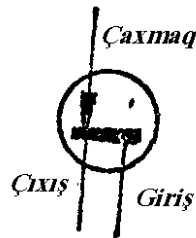
10.4. Sahə effektiv tranzistorlar

Sahə effektiv tranzistorlarda çıxış müqaviməti giriş signalı parametrlərindən asılıdır. Bu tranzistorlar n tipli elektrik keçiricilikli çubuq, yaxud lövhədənq ibarət olub, en kəsiyi sahəsi əks istiqamətdə qoşulmuş elektron-deşik keçidinin köməyiylə dəyişir (şəkil 10.19).

İşçi hissə (1) xüsusi müqaviməti $\rho = 0,04 \div 0,2$ Om.m olan elektron keçiricilikli yüksək omlu germaniumdan hazırlanır. Çıxış (2) və giriş (3) sahəsi daha yüksək elektron keçiriciliyinə malik olub, keçirici olmayan sıxaclarla təchiz edilmişdir ki, buradan xarici dövrə giriş və çıxışa birləşdirilir. İşçi sahə (kanal) qaynaq üsulu ilə hazırlanaraq indium (4) təbəqəsi ilə əhatə edilmişdir ki, bu germaniumla birləşərək $n-p$ keçidini əmələ gətirir. Çaxmaq adlanan indium təbəqəsində idarəedici elektrodun çıxışı qaynaq edilmişdir. Sahə effektiv tranzistorun sxemlərdə istifadə edilən şərti işarəsi şəkil 10.20-də göstərilmişdir.



Şəkil 10.19. Sahə effektiv tranzistorun quruluşu



Şəkil 10.20. Sahə effektiv tranzistorun şerti işarəsi

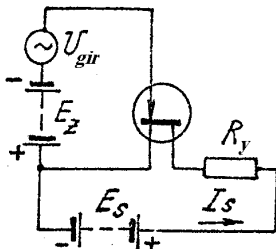
Çıxış və çaxmaq aralığına xarici e.h.q. mənbəi birləşdirildikdə n-p keçidi bağlı istiqamətində genişlənir; kanalın, yəni işçi sahəsinin en kəsiyi sahəsini azaldır və onun müqaviməti

$$R = \rho \frac{l}{S_k}$$

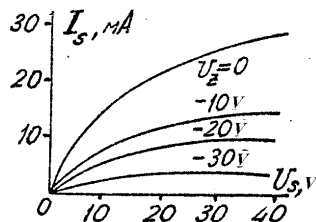
çoxalır.

Çaxmaqda böyük mənfə gərginlik olduqda kanalın en kəsiyi sahəsi sıfıra qədər azalır və sahə effektiv tranzistorun müqaviməti sonsuz olur.

Sahə effektiv tranzistorun birləşmə sxemi və volt – amper xarakteristikası şəkil 10.21 və 10.22-də verilmişdir. Burada yük dövrəsinə e.h.q. mənbəi E_s , giriş dövrəsinə U_{gir} siqnal mənbəi və E_z yerdəyişmə e.h.q. mənbəi birləşdirilir.



Şəkil 10.21. Sahə effektiv tranzistorun qoşulma sxemi



Şəkil 10.22. Sahə effektiv tranzistorun volt-amper xarakteristikası

Giriş siqnalının (U_s) böyük qiymətlərində işçi sahə, yəni kanal yükdaşıyıcıları hesabına dolduğundan xarakteristika absis oxuna paralel alınır ($U_z = -30$ V).

Sahə effektiv tranzistorun gücləndirici xüsusiyyəti xarakteristikanın dikliyi

$$S = \left. \frac{\partial I_s}{\partial U_G} \right|_{U_S = \text{const}}$$

ilə xarakterizə olunur.

n keçidi, yəni çaxmaq əks istiqamətdə birləşmədiyindən daha təsirli tranzistor böyük giriş müqavimətinə (10^6 - 10^8 Om) malik olur. Çıxış müqaviməti isə nisbətən böyük olmaqla, kanalın fiziki parametrlərindən asılıdır.

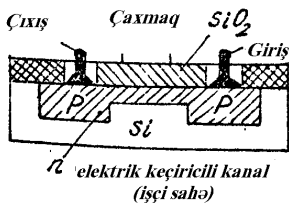
Cədvəl 10.2-də bəzi sahə effektiv tranzistorların parametrləri verilmişdir.

Sahə effektiv tranzistorun mənfi cəhəti yaxın vaxta qədər kiçik en kəsiyi sahəli kanalın alınması texnologiyasının mürəkkəbliyi və parametrlərinin fərqlənməsi idi.

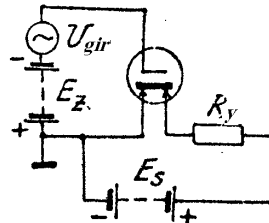
Cədvəl 10.2

Sahə effektiv tranzistorun tipi	I_s , mA	S , mA/V	Giriş gərginliyi, $U_{gir.}$, V
KП102Е	0,18 – 0,55	0,25 – 0,7	2,8
KП102Ж	0,4 – 1,0	0,3 – 0,9	4,0
KП102Ы	0,7 – 1,8	0,39 – 1,0	5,5
KП102К	1,8 – 3,0	0,45 – 1,2	7,5
KП102Л	2,4 – 6,0	0,65 – 1,3	10,0
KП103Е	0,3 – 0,7	0,4 – 1,8	0,4 – 1,5
KП103Ж	0,55 – 1,2	0,7 – 2,1	0,5 – 2,2
KП103Ы	1,0 – 2,1	0,8 – 2,6	0,8 – 3,0
KП03К	1,7 – 3,8	1,4 – 3,5	1,4 – 4,0
KП103Л	3,0 – 6,6	1,8 – 3,8	2,0 – 6,0
KП03М	5,4 – 12	2,0 – 4,4	2,8 – 7,0

Sahə effektiv tranzistorların sonriadan təkmilləşdirilməsi çaxmağı izolə edilmiş MOY tipli (metol-oksidiyarımkeçirici) tranzistorların hazırlanması imkan verdi. Həmin tranzistorun struktur quruluşu və birləşmə sxemi şəkil 10.23 və 10.24-də göstərilmişdir.



Şəkil 10.23. MOY – transformatorun quruluşu



Şəkil 9.24. MOY – transformatorun qoşulma sxemi

Çaxmaq, metal-oksidi-sahə effektiv yarımkeçirici tipli tranzistorlarda dielektriklə ayrıldığından onun giriş müqaviməti böyükdür.

Çaxmaqda gərginlik olmadıqda U_s gərginliyinin qütblüyündən asılı olmayaraq kanal bağlı qalır və qarşılıqlı birləşmiş iki dioda bənzəyir. E_z e.h.q. mənbənin gərginliyi təsir etdikdə çıxış (P_c) və giriş (P_g) zonaları yuxarıya əyilir, yarımkeçiricinin səthi boşluq keçiriciliyi xassəsi alır və çıxış ilə giriş arasında körpü yaradır. Çaxmağın dövrəsindəki gərginliyin yüksəlməsi həmin körpünün qalınlığını artırır. Nəticədə MOY tranzistorunun çıxış müqaviməti azalmış olur. Bu tranzistorlar 1000 mHz və daha çox tezliklərdə işləyirlər. Müxtəlif tipli tranzistorlar üçün giriş müqaviməti 10^{15} Om, xarakteristikanın dikliyi 30 mA/V-a qədər, giriş dövrəsində işçi cərəyan $5 \div 30$ mA, işçi gərginlik $U_s \leq 12$ V, 200 mHz tezliyə uyğun gücə görə gücləndirmə əmsalının qiyməti 20 db olur.

Qeyd etmək lazımdır ki, sahə effektiv və metal-oksidiyarımkeçirici tranzistorları iki p-n keçidli adi tranzistorlardan fərqli olaraq bəzi üstün cəhətlərə malikdirlər. Bunlardan

böyük giriş müqaviməti, ölçü və çəkisinin kiçik olması yaxşı tezlik xüsusiyyətlərini göstərmək olar.

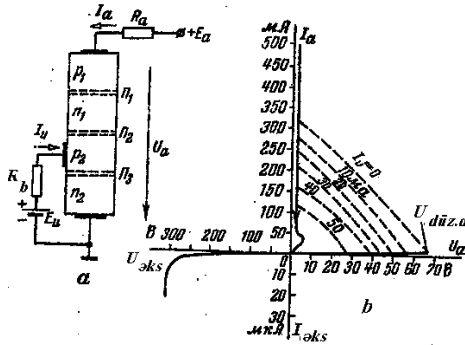
10.5. Tiristorlar

Üç p-n keçidli idarə olunan yarımkeçirici ventil tiristor adlanır. Tiristorlar silisiumdan hazırlanır və dörd $p_1-n_1-p_2-n_2$ təbəqəyə malik olur (şəkil 10.25,a). Həmin təbəqələr arasında üç ədəd p-n keçidi yaranır: Π_1 , Π_2 , Π_3 .

Tiristora verilən gərginliyin istiqaməti elə seçilir ki, Π_1 və Π_3 keçidləri açıq, Π_2 keçidi bağlı olsun. Açıq keçidlərin müqavimətləri cüzi qiymətə malik olduğundan U_a gərginliyi tamamilə Π_2 bağlı keçidinə tətbiq edilmiş olur. Bu halda tiristorun cərəyanı çox kiçik qiymət alır.

U_a gərginliyinin qiyməti böyüyərək düz istiqamətli deşilmə gərginliyinə ($U_{düz.d}$) çatana qədər ventilin cərəyanı cüzi miqdarda artır (şəkil 10.25,b). Gərginlik bu qiyməti keçdikdə Π_2 keçidində yükdaşıyıcı cütlərin selvari çoxalma effekti nəticəsində cərəyan şiddətlə artır və ventildə gərginlik azalır, çünki cərəyanın artması R_a müqavimətində gərginlik düşgüsünü artırır. Yükdaşıyıcıların selvari çoxalma prosesi Π_2 keçidinin dəyişməsinə səbəb olur. Bundan sonra ventildə gərginlik 0,5 – 1,0 V qiymətinə qədər azalır. Mənbənin e.h.q.-ni (E_a) artırıdıda, müqavimətini azaltdıqda tiristorun cərəyanı volt-ampere xarakteristikasının şaquli hissəsinə uyğun sürətdə dəyişir (şəkil 10.25,b). Dövrədən mənbəni açdıqda 10-30 mk.san müddətində Π_2 keçidi yenidən bərpa olur. P_2 təbəqəsinə müstəqil mənbədən (E_a) qidalandırılan köməkçi dövrə vasitəsilə tiristora (şəkil 10.25,a) əlavə yükdaşıyıcıları daxil etməklə selvari çoxalma prosesini gücləndirmək olar. Bu zaman həmin proses daha kiçik deşilmə gərginliyində ($U_{düz.d}$) baş verir və tiristordan cərəyan keçir. Köməkçi dövrədən axan cərəyanı idarəedici cərəyan deyilir (I_i). İdarəedici cərəyandan asılı olaraq deşilmə gərginliyinin nə dərəcədə azalması miqdarını tiristorun xarakteristikalarından görmək olar (şəkil 10.25,b) Bu xarakteristikalar tiratronun xarakteristikalarına

oxşayır, lakin burada idarə gərginliklə deyil, cərəyanla (I_i) həyata keçirilir.



Şəkil 10.25. Tiristorun struktur sxemi (a) və volt-ampere xarakteristikaları (b)

Əgər tiristora əks gərginlik $U_{\text{əks}}$ versək, Π_1 və Π_2 keçidləri bağlı olduğundan ondan keçən cərəyan kiçik olacaqdır. lakin tiristorun əks istiqamətdə dəşilməsinin qarşısını almaq üçün əks gərginlik buraxıla bilən qiymətindən kiçik olmalıdır. $U_{\text{əks}} < U_{\text{əks.b.b.}}$. Beləliklə, aydın olur ki, tiristor qövşboşalma tiratronunun yarımkəçirici analoqudur, lakin tiratrona nisbətən bir sıra üstünlüklərə malikdir: ölçüləri kiçikdir, xidmət müddəti böyükdür, itgiləri azdır və s.

Tiristorlarda idarə olunan düzləndiricilərdə, invertorlarda və avtomatikanın müxtəlif quruluşlarında istifadə edilir.

10.6. Mikromodullar və integral sxemləri

Müasir texnikanın intensiv inkişafı elektron qurğularının geniş tətbiqini tələb edir. Elektron hesablama maşınları, elektron idarəetmə sistemləri, proqramlı avtomatlar və başqa komplekslər elektronikanın külli miqdarda elementlərindən ibarətdir. Oudur ki, həmin qurğulara daxili olan sxemlərin ölçü və çəkisini, həm də tələb etdiyi gücü azaltmaqla onların etibarlılığını və iş müddətini artırmaq mühüm əhə-

miyyət kəsb edir. Sxemlərin ölçülərinin azaldılması kosmik və raket texnikasında, xüsusilə vacib məsələdir.

Elektronikada çox kiçik radiolampaların tətbiq edilməsi onların ölçülərini və çəkisini $5\div 7$ dəfə azaldır. Yarımkeçirici diod və triodların tətbiq edilməsi isə qurğunun həcmi $20\div 30$ dəfə azaldır. Odur ki, radiotexniki qurğuların həcmi bir daha azaldılması yarımkeçirici diod və triodlar əsasında, yəni eyni gövdədə yaradılmış modul sxemləri əsasında yerinə yetirilir. Burada çoxlu sayda rezistorlar, kondensatorlar, diodlar, yarımkeçirici triodlar bir gövdədə yığılaraq mərtəbə formasında qurğunun tam sxeminə, yaxud onun hər hansı blokuna uyğun olur və onun həcmi $300\div 1000$ dəfə azaldır.

Radiotexniki qurğuların həcmi və çəkisini daha da azaltmaq üçün integral sxemlərdən (İS) istifadə edilir. Həmin integral sxemləri monokristall yarımkeçiricilərdən ibarət olub, səthdən xüsusi texnologiya ilə diodlardan, triodlardan, rezistorlardan, kondensatorlardan yaradılır.

Təcrübədə hibrid integral mikrosxemləri də geniş yayılmışdır. Bu sxemlər əvvəlki sxemlərdən öz hazırlanma texnologiyası və quruluşu ilə fərqlənərək, aralıq mikrosxem növüdür. Rezistorlar, kondensatorlar, cərəyan daşıyan birləşmələr, izolyasiya təbəqələri və s. dielektrikə xüsusi şablonların köməyi ilə termovakuum çökdürülməsi və ya katod tozlanması üsulu ilə çəkilir. Sonra adi üsulla yüksək miniatur formada yarımkeçirici elektronikanın gövdəsilə elementləri qaynaq edilir, yaxud bərkidilirlər. Integral sxemlərinin tətbiq edilməsi isə qurğunun həcmi və çəkisini adi lampa ilə hazırlanan qurğulara nisbətən 20000 dəfə və daha çox azaldır.

Integral mikrosxemləri müxtəlif sayda aktiv (bipolyar, yaxud sahə effektlı tranzistorlardan) və passiv (rezistorlar, kondensatorlar, diodlar) elementlərdən və bir yarımkeçirici kristalda onun sayına görə sxemləri ayrılan elementlərdən ibarətdir. Bu nöqteyi-nəzərdən mikrosxemlər $10\div 100$ elementdən ibarət olan böyük integral sxemlərinə (BİS) ayrılırlar.

Radioelektron qurğularının müxtəlif hissələri integral mikrosxemlərdən hazırlanır. Mikrosxemlərin xüsusiyyəti və vəzifəsi onun şərti işarəsində göstərilir.

Qəbul olunmuş ayrı-ayrı mikrosxemlərin şərti işarəsi **K** hərfindən (integral mikrosxemlərə məxsus olduğunu göstərən) və altı elementdən ibarətdir. Birinci rəqəm texnoloji növünü göstərir. Əgər 1 olarsa yarım-keçirici və qarışıq mikrosxem, 2 olarsa hidrid mikrosxem olduğunu göstərir.

Qeyd etmək lazımdır ki, hazırda hibrid sxemlərin tətbiq edilməsi məsləhət görülmür. Yalnız elektro-vakuum cihazların əvəzinə tranzistorları və ayrı-ayrı tranzistorların əvəzinə isə integral mikrosxemləri istifadə etmək məsləhət görülür. Elementin işarəsində ikinci, üçüncü hərf qrupu və funksional sinfi göstərilir. Məsələn:

YC – harmonik siqnallar üçün gücləndirici;

YT – yavaş dəyişən siqnallar gücləndiricisi, yaxud sabit cərəyan gücləndiricisi;

ΓΦ – xüsusi formalı siqnal generatoru;

ΠC – tezlik çeviricisi və s.

Göstərilən funksional sinfə aid olan sxemlər, yəni gücləndirmə, çevirmə, impuls və harmonik siqnalları generasiya edən, impuls-analoq və s. sxemlər, mikrosxem formasında geniş yazılmışdır ki, bunlara da məntiq sxemləri deyilir.

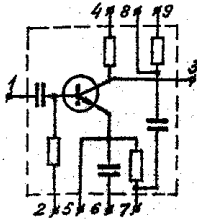
Məntiq rəqəmləri hesab-rəqəm maşınlarında və radioelektron sistemlərində (rəqəm voltmetrlərində, tezlikölçəndə, avtomatikanın bəzi qurğularında, idarəetmə sistemlərində və s.) istifadə edilir. Məntiq sxemlərində siqnalın iki qiyməti şərti olaraq «0» və «1» qeyd edilir.

Məsələn, əgər sistemə təsir edən potensialın qiyməti 0,4 V-dan azdırsa, onun qiyməti «0», 2,4 V-dan çoxdursa «1» qəbul edilir. Siqnalın aralıq qiyməti keçid prosesi vaxtı yaranır və sxemdə qeyd olunmur.

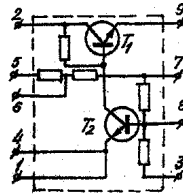
Məntiq sxeminin vəzifəsi – ikilik say sisteminə uyğun yadda saxlamaqdan, cəmləməkdən, vurmaqdan, toplamaqdan və s. ibarətdir.

Hər bir mikrosxem üçün əvvəlcədən mənbəin e.h.q.-nin qiyməti, giriş siqnallarının xüsusiyyətləri, xarici yükün yol verilən müqaviməti kimi xarici parametrlər müəyyənləşdirilir.

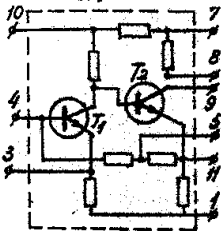
Şəkil 10.26, 10.27, 10.28, 10.29-da bəzi sadə integral mikrosxemlər və şəkil 10.30-da onların konstruktiv quruluşları verilmişdir.



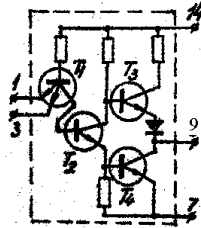
Şəkil 10.26. KZ24 seriyalı K22YC242 universal gücləndirici



Şəkil 10.27. K2ПН241 stabilizatoru

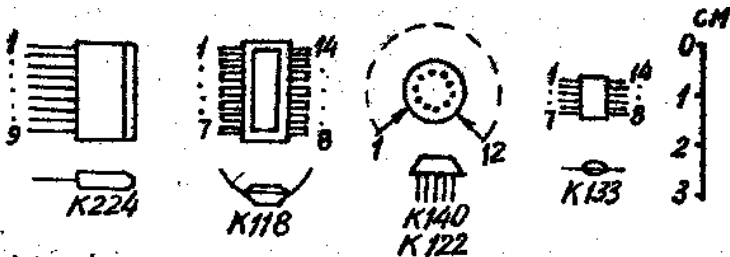


Şəkil 10.28. K122 və K118 seriyalı K1YC181D



Şəkil 10.29. K133 seriyalı K1ЛБ331 məntiq sxemi

Mikrosxemlərin geniş tətbiqi radioelektronikanın inkişafına böyük təkan olacaq, geofiziki qurğuların həcmünün və çəkisinin kiçik olmasına səbəb olacaqdır.



Şəkil 10.30. Mikrosxemlərin konstruktiv quruluşu

10.7. Fotomüqavimətlər

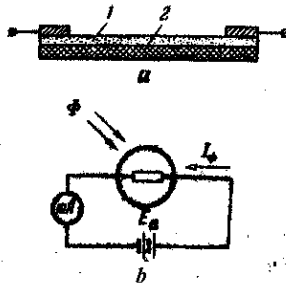
İşıq şüasının təsirindən elektrik keçiriciliyi dəyişən daxili fotoeffektli fotoelektrik yarımkeçirici cihaza fotomüqavimət (fotorezistor) deyilir.

Fotomüqavimət (şəkil 10.31,a) üzərinə vakuumda buxarlandırmaqla nazik yarımkeçirici təbəqə (1) çəkilmiş və cərəyan keçirməyən materialdan: şüşə, saxsı və yaxud kvartsdan hazırlanmış lövhədən (2) ibarətdir.

İşığa həssas material kimi fotomüqavimətlərdə qurğuşun sulfiddən, kadmium seleniddən və kadmium sulfiddən istifadə edilir. Qeyd etmək lazımdır ki, fotomüqavimət bircins yarımkeçiricidən hazırlandığına görə onda p – n keçidi yaranmır.

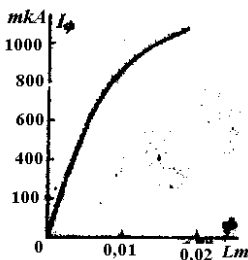
İşıqlandırılmayan fotomüqavimətə gərginlik tətbiq edilmə (şəkil 10.31,b), dövrədən qaranlıq cərəyanı adlanan zəif cərəyan keçir. Fotomüqavimət işıqlandırıldıqda ondan axan işıq cərəyanı qaranlıq cərəyanından 1-2 tərtib böyük olur. İşıq cərəyanı ilə qaranlıq cərəyanın fərqiə fotocərəyan deyilir:

$$I_{\phi} = I_{ic} - I_{qar}$$

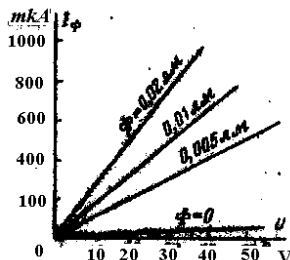


Şəkil 10.31. Fotomüqavimətin quruluşu (a)
və qoşulma (b) sxemi

Fotomüqavimətin işıq xarakteristikasından göründüyü kimi (şəkil 10.32) o, işıq selinin kiçik qiymətlərindən düzxətt olduğu halda böyük qiymətlərdə xəttin pozulur, yəni fotocərəyan işıq selinin artmasına mütənasib olmur.



Şəkil 10.32. Fotomüqavimətin işıq xarakteristikası



Şəkil 10.33. Fotomüqavimətin volt-ampər xarakteristikası

Fotomüqavimətlərin volt-ampər xarakteristikaları düzxətt şəklində olur (şəkil 10.33). Fotomüqavimətləri xarakterizə etmək üçün inteqral həssaslığı kəmiyyətindən

istifadə etmək olar: $S = \frac{I_\phi}{\Phi}, \frac{mA}{lm}$. Lakin fotomüqavimətin

cərəyanı mənbəin gərginliyindən asılı olduğuna görə xüsusi həssaslıq anlayışından istifadə edilir:

$$S_0 = \frac{S}{U} = \frac{I_\phi}{\Phi U}, \frac{mA}{lm \cdot V}$$

Müxtəlif fotomüqavimətlər üçün $S_0 = 0,8-6 \text{ mA/Lm.V}$ olur. Fotomüqavimətin parametrlərindən biri də qarışıq müqavimətdir: $R_{qar} = 10 \div 60000 \text{ kOm}$.

Xarici fotoeffektli fotoelementlərə nisbətən fotomüqavimətlərin müsbət cəhəti yüksək həssaslığa, kiçik ölçülərə və böyük etibarlıba malik olmasıdır. Nöqsan cəhətlərinə ətalətinin böyüklüyü, işıq xarakteristikasının qeyri-xəttiliyi və temperatura görə qeyri-stabilliyi aiddir. Fotomüqavimətlərdən bu nöqsanlarına görə avtomatikanın yalnız rele sxemlərindən istifadə edilir.

10.8. Yarımkəçirici fotoelementlər

Fotodiod – bir (və yaxud iki) p-n keçidinə malik olan və işıqlandırıldıqda e.h.q. yaradan, yaxud əks cərəyanın qiymətini dəyişən daxili fotoeffektli yarımkəçirici cihazdır.

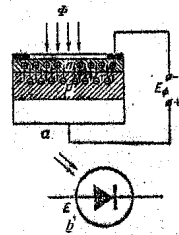
Fotodiod germaniumdan, silisiumdan, selendən, qallium sulfiddən, gümüş sulfiddən və s. hazırlanır. İşığa həssas yarımkəçirici olan plastmass gövdədə yerləşdirilir. Işıq cihazın pəncərəsindən p-n keçidinin üzərinə düşür. Işığın təsiri nəticəsində yarımkəçiricidə valent elektronları keçiricilik zonasına sıçrayaraq, hər iki oblastda (həm p və həm də n oblastında) sərbəst yükdaşıyıcıları cütlərinin sayını artırır. Kontakt potensiallar fərqi təsiri ilə (p-n keçidinin elektrik sahəsinin) p oblastının qeyri-əsas daşıyıcıları – elektronlar, n oblastına və əksinə, n oblastının qeyri-əsas daşıyıcıları – boş yerlər, p oblastına keçərək orada yığılacaqdır.

Bunun nəticəsində fotodiodun elektrodları arasında foto-e.h.q. (E_f) adlanan potensiallar fərqi yaranacaqdır. Foto-e.h.q.-nin qiyməti 1 V-a qədər olur. Belə fotodiodun sıxaclarına müqavimət qoşsaq, yaranan dövrədən E_f -dən asılı olan kiçik fotocərəyan axacaqdır. Fotodiodun sxematik quruluşu və şərti işarəsi şəkil 10.34-də göstərilmişdir.

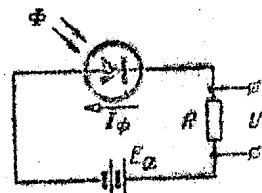
Fotodiod iki rejimdə işləyə bilər; fotogenerator və fotoçevirici rejimlərində.

Fotodiodun xarici qidalandırıcı mənbəsiz işləməsi rejim fotogenerator rejimi adlanır.

Əgər fotodioda onu qapayan istiqamətdə xarici E_a mənbəyi qoşsaq, fotoçevirici rejimində işləyər (şəkil 10.35). Bu rejimdə işıqlıq artıqda əks cərəyan artır. Fotoçeviri-



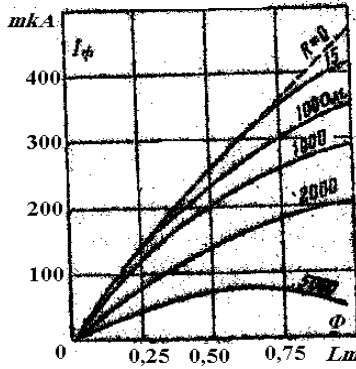
Şəkil 10.34. Fotomüqavimətin quruluşu (a) və qoşulma (b) sxemi



Şəkil 10.35. Fotomüqavimətin işıq xarakteristikası

ci rejimində işləyən fotodiodun işıq xarakteristikaları şəkil 10.36-də göstərilmişdir.

İşıq selinin (Φ) kiçik qiymətlərində xarakteristikalar xəttidir, işıq selini artırıqda isə fotocərəyanın doyması hadisəsi baş verir. Yük müqavimətini R artırıqda fotocərəyan daha kiçik qiymətlərdə doyur. Fotoçevirici rejimində işləyən fotodiod fotomüqavimətə oxşayır, lakin daha yüksək integral həssaslığına malikdir.



Şəkil 10.36. Fotomüqavimətin volt-ampere xarakteristikası

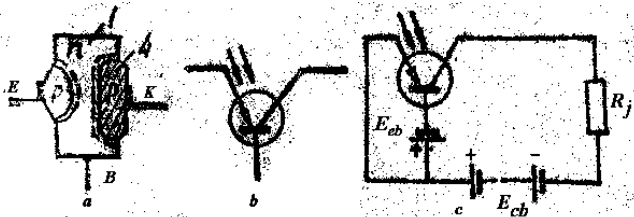
Silisiyum fotodiodları başqalarına nisbətən daha yüksək f.i.ə-na (10%-ə qədər) malikdir və buna görə də günəş enerjisini elektrik enerjisinə çevirən günəş batareyalarında geniş istifadə edilir, məsələn, kosmik gəmilərdir.

Son zamanlar yeni tip fotoelementlər – fototriodlar hazırlanır ki, bunların vasitəsilə fotocərəyanın daxili gücləndirilməsi əldə edilir.

10.9. Fototranzistorlar

Fototranzistor iki n-p keçidindən ibarətdir. Onun baza oblastı gövdədə açılmış xüsusi pəncərədən işıqlandırılır.

Fototranzistorun şərti işarəsi, quruluşu və qoşulma sxemi şəkil 9.37-də göstərilmişdir.



Şəkil 10.34. Fotodiodun quruluşu və şərti işarəsi

Fototranzistorlara elektron keçiricilikli germanium kriсталı (1) deşik keçiricilikli emitter oblastını (2) təşkil edib, adi tranzistorlarla müqayisədə kiçik sahəyə malikdir.

Emitter sahəsi bazaya işıq düşən şüşə pəncərə (3) tərəfdədir. Kollektor (4) isə n-p keçidindən ibarət böyük sahəyə malikdir. Işıq təsirindən cihazın baza sahəsində elektron-deşik buludu yaranır, p-n-p tranzistorunun bazasında deşiklər əsas yükdaşıyıcılar olmadı-ğından, onlar xarici e.h.q. mənbəinin sahəsi istiqamətində kollektora doğru hərəkət edərək, bağlı n-p kollektor keçidindən keçir, bazanın işıqlandırılmasına mütənasib olaraq, tranzistorun kollektor cərəyanının artmasına səbəb olur.

Fototranzistorun birləşmə sxemi şəkil 10.37-də göstərilmişdir. Burada baza dövrəsi birbaşa, yaxud e.h.q. mənbəi vasitəsilə emitter dövrəsinə birləşdirilə bilər. Baza dövrəsinə e.h.q. mənbəi qoşulduqda $E_{c,b}=8\div 6\text{ V}$ olmalıdır, çünki $E_{c,b}$ -nin qiyməti çox olsa, n-p keçidi işıq təsirindən deşilə bilər, $E_{c,b} = 0$ olduqda qaranlıq cərəyanı $I_{c,b}$ kollektor keçidindəki istilik cərəyanının uyğun olur və Φ işıq selinin müəyyən qiymətində kollektor cərəyanı artmağa başlayır.

Ümumi emitterli sxemlə birləşmiş fototranzistorun kollektor cərəyanı aşağıdakı kimi təyin edilir:

$$I_c = I_{cB0} + I_f + h_{21e} I_B + I_i \quad (10.1)$$

burada I_i – cərəyanın istilik təşkiledicisi olub, E_{cc} -dən asılıdır.

Generasiya nəticəsində baza dövrəsində işıq təsirindən yaranan yükdaşıyıcı elektron buludu emitter dövrəsinə keçir və baza cərəyanını artırır. Odur ki, $\Delta I_c = \Delta I_f$ qəbul edilərsə,

$$I_k = I_{cB0} + (1 + h_{21e})I_f + I_i \quad (10.2)$$

$I_f = k\Phi$ olduğunu nəzərə alsaq

$$I_k = I_{cB0} + I_i + (1 + h_{21e})k\Phi$$

olur. Burada k – integral oblastıdır.

$I_B > 0$ olduqda sükutluq baza cərəyanının I_{B0} ilkin qiymətini seçməklə, kollektor cərəyanını geniş hədlərdə tənzim etmək və onun «ikiqat» idarə edilməsini almaq olar.

İkiqat idarəolunma halında

$$I_k = I_{cB0} + I_i + h_{21e}I_{B0} + (1 + h_{21e})k\Phi$$

Fototranzistorlar fotodiodlardan böyük integral həssaslığı ilə ($K = 0,5 \text{ A/Lm}$) fərqlənir.

10.10. Tranzistorlarda gurultular

Tranzistorlarda sayrışma effekti, məxsusi və istilik gurultuları nəzərə çarpır.

İstilik gurultuları tranzistorun emitter, baza və kollektor sahələrinin paylanmış müqavimətlərində meydana çıxır. Emitter və kollektor sahələrinin paylanmış müqavimətləri baza ilə müqayisədə çox kiçik olduğundan nəzərə alınmaya bilər. istilik gurultularının qiyməti baza müqavimətinə görə belə təyin edilir:

$$U_{g.b.}^2 = 4kTr_b\Delta f \quad (10.3)$$

Məxsusi gurultular emitter və kollektor keçidlərindən cərəyan keçdikdə və həmçinin emitter cərəyanının baza ilə kollektor arasında paylanması zamanı yaranırlar.

Kollektor keçidinin gurultuları:

$$I_{g.k}^2 = 2e_0 I_{k_0} \Delta f \quad (10.4)$$

Emitter keçidinin gurultuları:

$$I_{g.e}^2 = 2e_0 I_e \Delta f \quad (10.5)$$

Emitter cərəyanının paylanması effekti gurultuları:

$$I_{g.pay}^2 = 2e_0 I_e (1 - \alpha) \Delta f \quad (10.6)$$

burada r_b – bazanın paylanmış müqaviməti; I_{k_0} – baza cərəyanının sıfır qiymətində kollektor cərəyanı; I_k – kollektor cərəyanı; I_e – emitter cərəyanı; $\alpha = \frac{I_k}{I_e}$ – cərəyanı ötürmə

əmsalıdır.

Sayışma effekti gurultuları yarımkeçiricinin kristalik qəfəsində pozuntular və müxtəlif qeyri-ardıcılıqlar nəticəsində yaranırlar. Ümumiyyətlə, sayışma effekti gurultuları tranzistorların hazırlanma texnologiyasının qüsurları ilə əlaqədardır.

Sayışma effekti gurultularının qiyməti tezliklə tərs mütənasibdir:

$$I_{g.s}^2 = A I_k^\alpha f^{-\beta} \Delta f \quad (10.7)$$

burada $\alpha=1-2$; $\beta=0,5-1,5$

Gurultu faktoru müxtəlif tipli tranzistorlar üçün 1-3 db qiymətində olur.

Sahə tranzistorlarının ən yaxşı nümunələrindən 100-1000 Hs tezliklərdə gurultu əmsalı 0,5 db qiymətindən çox olmur.

10.11. Yarımkeçirici cihazların etibarlılığı

Elektron cihazlarının etibarlılığı dedikdə onun verilmiş zaman intervalında iş qabiliyyətini mühafizə etmək ehtimalı nəzərdə tutulur. Bu halda məlum sərhədlərdə əsas parametrlərin dəyişməsinə yol verilir: gücləndirmə əmsalının azalması, giriş və çıxış müqavimətlərinin dəyişməsi, gurultuların artması və s. Ümumi halda cihazın sıradan

çıxması, parametrlərinin kəskin dəyişməsi təsadüfi hadisə sayılır.

Verilmiş zaman müddətində inkar ehtimalı eksponensial qanuna tabedir:

$$B(t) = e^{-\frac{t}{t_{or}}}$$

t_{or} – orta fasiləsiz etibarlı iş müddəti olub, sınaqlar nəticəsində müəyyən edilir:

$$t_{or} = t_0 \left[\ln \frac{N-n}{N} \right]^{-1}$$

burada t_0 – sınaq müddəti, saat; N – sınıanan cihazların ümumi sayı; n – inkar etmiş cihazların sayıdır.

$\lambda = [t_{or}]^{-1}$ kəmiyyəti inkarların intensivliyi adlanır. M sayda eyni cihazlardan ibarət aparatın inkar intensivliyi M dəfə artmış olur:

$$\lambda_{\Sigma} = M\lambda$$

Beləliklə, aparatın bütövlüklə etibarlı olması onun hər bir elementinin nə dərəcədə etibarlılığından asılıdır. Məsələn, aparat 10^3 sayda eyni cihazdan ibarət olmaqla, hər birinin orta inkarsız iş müddəti 10^3 saat isə, aparat orta hesabla hər saatda sıradan çıxacaqdır. Cihazın işdən çıxması ehtimalının eksponensial asılılığı ona gətirib çıxarır ki, orta inkarsız iş müddəti bitdikdə cihazların yalnız 80-10% işləmə qabiliyyətini mühafizə etmiş olur.

Müasir yarımkeçirici cihazların orta inkarsız iş müddəti 10^8 saata (10^4 -ə ilə yaxın) çatır. Yarımkeçirici cihazların 4 növ inkarları mövcuddur: elektrodlar arasında qısaqapanma, n-p keçidinin dəşilməsi, elektrodların dövrəsində qırıq, elektrik parametrlərinin dəyişməsi. Bütün bunlar yarımkeçirici kristallarda baş verən müxtəlif fiziki-kimyəvi proseslərlə əlaqədardır. Yarımkeçirici cihazı sıradan çıxaran prosesləri sürətləndirən əsas faktor temperaturdur; belə ki, temperaturun 40^0 -dən 80^0C qədər yüksəlməsi inkarların orta hesabla 10 dəfə

artmasına səbəb olur. İnkərlər çox vaxt kristal strukturun səthində qüsurlar yaradır. Rütubət və qazların təsiri ilə yarımkeçirici kristalın səthi dağılır, mənfi və ya müsbət yüklər təbəqələri yaranmaqla n-p keçidi yaxınlığında yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının dəyişməsinə səbəb olur. Bu, keçidin əks cərəyanını kəskin artırır, tranzistorların dəşilmə gərginliyi və gücləndirmə əmsalını azaltmaqla, onun tez sıradan çıxmasına gətirib çıxarır.

Müasir yarımkeçirici cihazların etibarlılığını artırmaq üçün kristal xarici mühit təsirindən mühafizə etmək məqsədi ilə xüsusi kip qapalı metal və ya plastik kütlədən hazırlanmış gövdə içərisində yerləşdirilir. Bundan əlavə kristallar müxtəlif mühafizə lakları ilə örtülür.

Mənbəin gərginliyinin kəskin dəyişməsi ilə əlaqədar olan qısamüddətli artıq yüklənmələr və zərbə mexanizmi deformasiyalar da inkarlara səbəb olur.

10.12. Yarımkeçirici cihazlara aid sərbət işlər

1. Hansı materiallar yarımkeçirici adlanır?
2. Yarımkeçirici maddənin elektrik keçiriciliyinin fiziki mahiyyətini izah edin.
3. Aşqarlı yarımkeçiricinin elektron və müsbət keçiriciliyini izah edir.
4. p-n keçidinin ventilləşməsi necə yaranır?
5. Yarımkeçirici nöqtə kontaktlı germanium diodunun quruluşunu və volt-ampere xarakteristikasını izah edin.
6. Müstəvi kontaktlı yarımkeçirici diodun quruluşunu izah edin.
7. Yarımkeçirici stabiltronun iş prinsipi hansı hadisələrə əsaslanır?
8. Mis oksidi və selen ventillərinin quruluşunu izah edin.
9. Tranzistorun iş prinsipini izah edin.
10. Tranzistorun hansı qoşulma sxemlərindən istifadə edilir?
11. Ümumi emitterli sxem ilə qoşulmuş tranzistorun parametrlərini və xarakteristikalarını göstərin.
12. Tiristorun quruluşunu və iş prinsipini izah edin.
13. Mikro sxemlərin seriyasını və tipini göstərən şərti iharələrini izah edin.
14. K224 seriyalı mikro sxemlərin iş prinsipini və konstruktiv quruluşunu izah edin.

15. K118 seriyalı mikrosxemlərini iş prinsipini və konstruktiv quruluşunu izah edin.

16. K140 seriyalı mikrosxemlərini iş prinsipini və konstruktiv quruluşunu izah edin.

17. K113 seriyalı mikrosxemlərini iş prinsipini və konstruktiv quruluşunu izah edin.

18. Fotomüqavimətin quruluşunu və iş prinsipini izah edin.

19. Fotodiodun quruluşunu və iş prinsipini izah edin.

20. Fototranzistorun quruluşunu və iş prinsipini izah edin.

21. Tranzistorlarda yaranan gurultuları izah edin.

22. Məişət cihazlarının: a) televizor; b) radioqəbuledicinin orta inkarsız iş müddətini təyin edin ki, inkarlar yalnız tranzistorlar tərəfindən yaranır, qalan hissələr isə etibarlıdır.

11-cü fəsil

ELEKTRİK RƏQSLƏRİNİN ELEKTRON GÜCLƏNDİRİCİLƏRİ

11.1. Gücləndiricilərin təsir prinsipi və təsnifatı

Əsas element kimi tərkibində elektrovakuum, ion və yarımkeçirici cihaz daxil olan və girişində elektrik kəmiyyətlərinin cüzi dəyişmələri, çıxışında bu və ya başqa elektrik kəmiyyətlərinin böyük dəyişmələrinə səbəb olan quruluşa elektron gücləndiricisi deyilir.

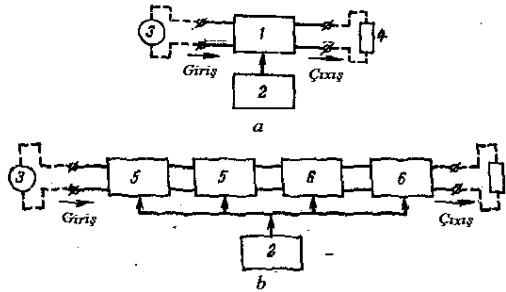
İdarəedici giriş kəmiyyəti kimi (giriş signalı) gərginlik, cərəyan və gücdən istifadə edilir ki, bunlar verici adlanan (3) az güclü elektrik mənbəyindən alınır (şəkil 11.1,a). Gücləndiricinin çıxışında idarəolunan kəmiyyət müstəqil mənbədən (2) alınan gərginlik, cərəyan və ya güc ola bilər.

Elektronika quruluşlarında giriş və çıxış kəmiyyətləri zamana görə eyni qanunla dəyişir (mütənasib surətdə) elektron gücləndiricilərindən daha geniş istifadə edilir. Bu gücləndiricilər idarəedici toru olan elektron lampalarında və tranzistorlarda qurulur. Çox yüksək tezliklərdə tunnel diodlarından da istifadə edilir.

Elə gücləndirici quruluşlar da vardır ki, bunlarda giriş kəmiyyəti müəyyən qiymətə çatdıqda çıxış kəmiyyəti sıçrayışla dəyişir və yaxud giriş kəmiyyətinin ani qiymətinin deyil, orta qiymətinin dəyişməsi təmin edilir. Belə gücləndiricilərdən ion cihazlarında və tiristorlarda istifadə edilir.

Neft və qaz sənayesində istifadə olunan elektron quruluşlarında ən geniş yayılan elektron gücləndiriciləridir. Elektron gücləndiriciləri müxtəlif ölçü cihazlarının və avtomatik tənzimləyicilərin, məsələn, müqavimət termometrli, termocütlü, pirometrli temperatur tənzimləyicilərinin, nəmlikölçən, səviyyəölçən cihazların, pH-metrlərin, manometrlərin, vakuummetrlərin və b. cihazların tərkibinə daxil olur.

Gücləndiricilər bir (şəkil 11.1,a) və ya çoxkaskadlı (şəkil 11.1,b) olur. Hər bir kaskad gücləndirici cihazdan (elektron lampasından, tranzistorlardan) və başqa sxem elementlərindən (müqavimətlərdən, kondensatorlardan, transformatorlardan və s.) ibarətdir.



Şəkil 11.1. Birkaskadlı və çoxkaskadlı gücləndiricilərin quruluş sxemi

Gücləndiricilər vəzifələrinə, işçi tezlik diapazonuna, kaskadlararası rabitəyə və başqa əlamətlərə görə təsnif edilir. Vəzifəsinə görə cərəyan, gərginlik və güc gücləndiricilərini fərqləndirirlər. Hər bir elektron gücləndiricisində güc də müəyyən dərəcədə gücləndirilir.

Gərginlik gücləndiricisinin giriş müqaviməti siqnal mənbəyinin müqavimətindən, çıxışa qoşulmuş yük müqaviməti çıxış tərəfdən gücləndiricinin daxili müqavimətindən dəfələrlə böyük olmalıdır. Belə halda giriş və çıxış dövrələrində cərəyanların kiçik dəyişmələri gərginliklərin böyük dəyişmələrinə səbəb olur.

Cərəyan gücləndiricisində giriş müqaviməti vericinin müqavimətindən, yük müqaviməti isə çıxış müqavimətindən çox kiçik olmalıdır. Belə şəraitdə gərginliyin çox kiçik dəyişmələri cərəyanların çox böyük nisbi dəyişmələrinə imkan yaradır.

Gücün gücləndirilməsi rejimində gücləndirici mümkün qədər yüksək f.i.ə. ilə yükə verilmiş gücün ayrılmasını təmin etməlidir. Bu şərait giriş və çıxış dövrələrində daxili və xarici müqavimətlərin bərabərliyi zamanı yarana bilər.

Gücləndirilən signalın zamandan asılı olaraq dəyişmə xarakterinə görə gücləndiricilər iki qrupa ayrılır:

1. Dəyişən cərəyan gücləndiriciləri.
2. Sabit cərəyan gücləndiriciləri.

Dəyişən cərəyan gücləndiriciləri kaskadlararası rabitəyə görə aşağıdakı növlərə ayrılırlar:

1. **Reostat-tutum rabitəli** (RC rabitəli); bu rabitəni yaradan dövrədə R aktiv müqavimət sonrakı kaskadın girişinə paralel, C kondensatoru isə ardıcıl birləşdirilir.

2. **Transformator rabitəli**; bu rabitədə sonrakı kaskadın girişi ilə əvvəlki kaskadın çıxışı transformatorla əlaqələndirilir.

3. **Rezonans rabitəli**; burada kaskadlararası rabitə rəqs konturu təşkil edən induktivlik və tutumla yaradılır.

Sabit cərəyan gücləndiricilərində kaskadlararası rabitə reaktiv elementləri olmayan naqıl dövrələrlə təşkil olunur.

Anod dövrəsində aperiodik yük müqavimətinə malik gücləndiricilərə **aperiodik gücləndiricilər** deyilir.

Kiçik işçi tezliklər diapazonunda rəqsləri gücləndirmək üçün **seçici gücləndiricilərdən** istifadə edilir. Yüksək tezlikli seçici gücləndiricilərin kaskadları arasında rezonans rabitədən istifadə olunur. Alçaq tezlikli seçici gücləndiricilər aperiodik olur və xüsusi elektrik süzgəci ilə təmin edilir.

11.2. Gücləndiricilərin əsas xarakteristikaları

Gücləndiricinin *gücləndirmə əmsalı* onun əsas göstəricilərindən biridir. Gücləndirmə əmsalı gücləndiricinin çıxışındakı gərginliyin və ya cərəyanın girişindəki uyğun gərginliyə və ya cərəyana olan nisbəti ilə ifadə edilən kompleks kəmiyyətdir:

$$\dot{K} = \frac{\dot{A}_{333}}{\dot{A}_{\text{gir}}} \quad (11.1)$$

burada $\dot{A}_{\text{gir}} = A_{\text{gir}} e^{j\varphi_{\text{gir}}}$ – gücləndiricinin girişindəki gərginlik və ya cərəyan; $\dot{A}_{333} = A_{333} e^{j\varphi_{333}}$ – gücləndiricinin çıxışında gərginlik və ya cərəyan; φ_k , $\varphi_{\text{çix}}$ – gücləndiricinin girişində və çıxışındakı gərginlik və ya cərəyanın eyni zaman anına görə faza bucaqlarıdır.

Ümumi halda $\varphi_{\text{gir}} \neq \varphi_{\text{çix}}$ olduğuna görə yaza bilərik:

$$\dot{K} = K e^{j\varphi} \quad (11.2)$$

burada $K = \frac{A_{333}}{A_{\text{gir}}}$ – gücləndirmə əmsalının modulu; $\varphi = \varphi_{\text{çix}} - \varphi_{\text{gir}}$ – faza bucaqlarının fərqi.

(4.2) ifadəsindən istifadə edib gərginliyin, cərəyanın və gücün gücləndirmə əmsalları üçün yaza bilərik:

$$\dot{K}_u = \frac{\dot{U}_{333}}{\dot{U}_{\text{gir}}}, \quad \dot{K}_i = \frac{\dot{I}_{333}}{\dot{I}_{\text{gir}}}, \quad \dot{K}_p = \frac{\dot{P}_{333}}{\dot{P}_{\text{gir}}} \quad (11.3)$$

Çoxkaskadlı gücləndiricilərin ümumi gücləndirmə əmsalı ayrı-ayrı kaskadların gücləndirmə əmsallarının hasilinə bərabərdir:

$$\dot{K} = \dot{K}_1 \cdot \dot{K}_2 \dots \dot{K}_n \quad (11.4)$$

Əksər hallarda gücləndirmə əmsalını loqarifmik kəmiyyətlərlə göstərirlər. Belə kəmiyyətin vahidi **detsibel** adlanır. Bir detsibel gücləndirmə gərginlik və ya cərəyanın gücləndirmə əmsalı modulunun 1.12 ədədi qiymətinə bərabərdir. Misal üçün, gərginliyin gücləndirilməsində gücləndirmə əmsalı belə ifadə olunur:

$$K_{u(db)} = 20 \lg \frac{U_{3\text{v}}}{U_{\text{gir}}} = 20 \lg K_u \quad (11.5)$$

Doğrudan da $K_{u(db)} = 1$ olarsa, onda $\lg K_u = \frac{1}{20}$ və $K_u = 1,12$ olar.

Gücün gücləndirmə əmsalı detsibellərlə göstərilə, belə ifadə edilməlidir:

$$K_{u(db)} = 10 \lg \frac{P_{3\text{v}}}{P_{\text{gir}}} = 10 \lg K_p \quad (11.6)$$

Gücləndirmə əmsalı modulunun (K) qiyməti gücləndirilən siqnalların tezliyindən asılı olaraq dəyişir. Vericinin siqnalının tezliyini elə diapazonda seçmək olar ki, gücləndirmə əmsalının dəyişməsi 1÷6 db-dən artıq olmasın. Bu tezliklər diapazonuna gücləndiricinin *buraxma zolağı* və yaxud işçi *tezliklər diapazonu* deyilir.

Gücləndiricinin çıxış gücü onun çıxışına qoşulmuş yük müqavimətində ayrılan faydalı gücə deyilir:

$$P_{\text{cix}} = \frac{U_{\text{cix.m}}^2}{2} \cdot \frac{1}{Z_y \cos \varphi_y} \quad (11.7)$$

burada $U_{\text{cix.m}}$ – çıxış gərginliyinin amplituda qiyməti; Z_y – yükün müqaviməti; φ_y – gərginlik və cərəyan arasındakı faza fərqi bucağıdır.

Xalis aktiv yük halında $Z_y = R_y$, $\cos \varphi_y = 1$ və

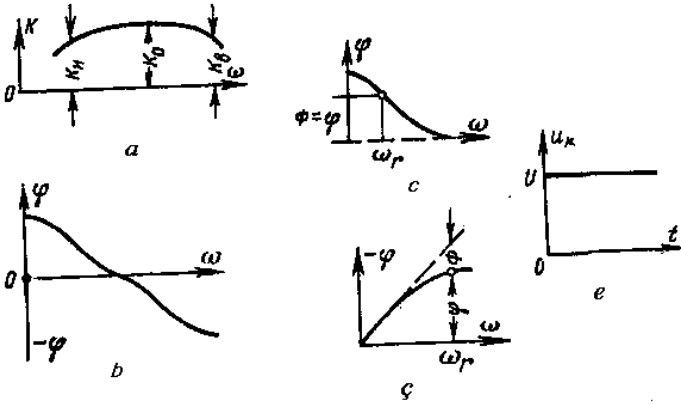
$$P_{\text{cix}} = \frac{U_{\text{cix.m}}^2}{2R_y} \quad (11.8)$$

Gücləndiricinin f.i.ə. onun yük müqavimətinə verdiyi çıxış gücünün mənbədən tələb etdiyi ümumi gücə ($P_{\text{mənbə}}$) olan nisbətində deyilir:

$$\eta = \frac{P_{cix}}{P_{menbe}} \quad (11.9)$$

Gücləndirici gücləndirilən siqnalı müəyyən qədər təhrif edir. *Tezlik, faza və qeyri-xəttilik təhrifləri* vardır.

Müxtəlif tezliklərdə gücləndirmə əmsalı sabit qalmadığından (buna səbəb kondensator və induktiv sargıqlardır) tezlik təhrifləri yaranır. Tezlik təhriflərini qiymətləndirmək üçün tezlik xarakteristikasından istifadə olunur. Gücləndirmə əmsalı modulunun gücləndirilən siqnalın tezliyindən asılılığına $K = F(\omega)$ gücləndiricinin **tezlik xarakteristikası** deyilir (şəkil 11.2,a).



Şəkil 11.2. Gücləndiricinin xarakteristikaları:

a – tezlik xarakteristikası; b – faza xarakteristikası; c – aşağı tezlikdə faza təhrifləri; ç – yüksək tezlikdə faza təhrifləri; e – giriş gərginliyi

Tezlik təhrifini kəmiyyətcə qiymətləndirmək üçün *tezlik təhrifi əmsalından* (M) istifadə olunur. Orta tezliklərdə gücləndirmə əmsalı modulunun (K_0) verilən tezlikdən gücləndirmə əmsalı moduluna (K) olan nisbətinə *tezlik təhrifi əmsalı* deyilir:

$$M = \frac{K_0}{K} \quad (11.10)$$

Tezlik təhrifləri destibellərlə ifadə edilir:

$$M_{(db)} = 20 \lg \frac{K_0}{K} \quad (11.11)$$

Gücləndiricinin elektrik sxemində tutum və induktivliyə malik elementlərin olması faza təhriflərinin yaranmasına səbəb olur ki, bunlar da özlərini mürəkkəb siqnalın harmonikləri arasındakı faza münasibətlərinin pozulmasında göstərir.

Gücləndiricinin girişinə verilən periodik siqnalın gərginliyini sıra şəklində göstərmək olar:

$$u_{gir} = \sum_{i=1}^n U_{gir.m.i} \sin(\omega_1 t + \psi_1) \quad (11.12)$$

burada $U_{gir.m.i}$ – harmonik sıranın i -ci toplananının amplitudası; ω_1 – onun tezliyidir; ψ_1 – onun başlanğıc fazasıdır.

Əgər gücləndirmə əmsalının modulu (K) tezlikdən asılı deyildirsə, onda çıxış gərginliyi üçün yaza bilərik:

$$u_{cix} = K \sum_{i=1}^n U_{cix.m.i} \sin(\omega_1 t + \varphi_i + \psi_1) \quad (11.13)$$

burada φ_1 – gücləndiricinin yaratdığı faza fərqi bucağıdır.

$\varphi_1 = -\omega_1 t_{keç}$ qəbul etsək, alarıq ki,

$$u_{cix} = K \sum_{i=1}^n U_{cix.m.i} \sin[\omega_1 (t - t_{keç}) + \psi_1] \quad (11.14)$$

burada $t_{keç}$ – tezlikdən asılı olmayan və siqnalın çıxışında girişdəkinə nisbətən gecikmə müddətini ifadə edən sabit kəmiyyətdir.

Gücləndiricinin yaratdığı faza fərqi bucağı tezliyə mütənəşib olduqda faza təhrifləri əmələ gəlmir.

φ – bucağının tezlikdən asılılığına gücləndiricinin **faza xarakteristikası** deyilir (şəkl 11.2,c). İdeal faza xarakteristikası düz xətt olur.

Faza təhriflərini qiymətləndirməkdən ötrü **aşağı və yuxarı tezliklər üçün faza xarakteristikaları** qurulur (şəkil

11.2, c,ç,e). Aşağı tezliklərdə faza təhrifi Φ gücləndiricinin yaratdığı faza fərqi bucağına (φ) bərabərdir. Yuxarı tezliklərdə isə $\Phi < \varphi$.

Gücləndiricinin girişinə sinusoidal gərginlik verildikdə onun çıxışında, *qeyri-xətti təhrif* nəticəsində, qeyri-sinusoidal gərginlik alınır. Buna səbəb gücləndiricinin sxemində qeyri-xətti voltamper xarakteristikalı elementlərin olmasıdır.

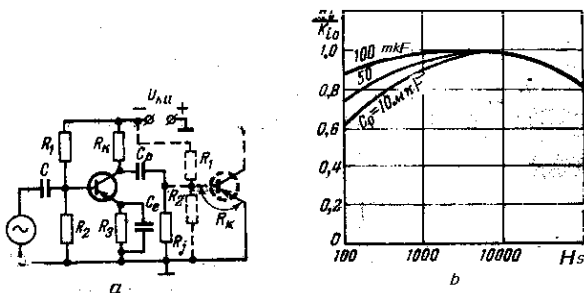
Qeyri-xəttilik təhrifi əmsalı ($K_{q.x}$) belə ifadə olunur:

$$K_{q.x} = \frac{\sqrt{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots + U_{jm}^2}}{U_{1m}} = \frac{\sqrt{I_{2m}^2 + I_{3m}^2 + \dots + I_{jm}^2}}{I_{1m}} \quad (11.15)$$

burada $I_{1m}, I_{2m}, \dots, I_{jm}$ – cərəyanların amplitudaları; $U_{1m}, U_{2m}, \dots, U_{jm}$ – gərginliyin amplitudalarıdır.

11.3. Reostat-tutum RC rabitəli kaskadlı tranzistorlu gərginlik gücləndiriciləri

Müasir dəyişən siqnal gücləndiricilərindən gərginliyi gücləndirmək üçün əksər hallarda kaskadlar arasında RC rabitəsindən istifadə olunur.



Şəkil 11.3. İkikaskadlı ümumi emitterli transformatorun gücləndiricinin sxemi (a) və onun tezlik xarakteristikası (b)

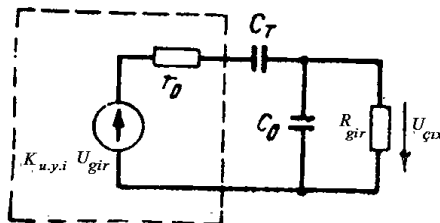
Reostat-tutum rabitəli yarımkəçirici tranzistor gücləndiricilərində kaskadlararası rabitə kondensator vasitəsilə həyata keçirilir. Şəkil 11.3,a-da ikikaskadlı tranzistorlu gücləndiricinin sxemi verilmişdir. Tranzistor ümumi emitter sxemi ilə qoşulmuşdur. Birinci tranzistorun kollektoru ilə ikinci tranzistorun bazası arasında C_r rabitə kondensatoru qoşulmuşdur. Həmin kondensator birinci kaskaddan ikinci kaskada gərginliyin sabit toplananını buraxmır.

Tranzistorlu gücləndirici kaskadın ekvivalent sxemi şəkil 11.4-də göstərilmişdir. Bu sxemdə C_0 tutumuna ikinci kaskadın giriş tutumu və montaj tutumu C_m daxildir:

$$C_0 = (1 + k_2)C_{\delta e2} + C_m \quad (11.16)$$

burada k_2 – ikinci kaskadın gücləndirmə əmsalıdır, 2 indeksi ikinci kaskada aid olmasını göstərir.

Ekvivalent sxemdə gücləndirici kaskad ekvivalent generatorla əvəz edilmişdir. Ekvivalent generatorun e.h.q. $u_{\text{çix.y.t}} = k_{u.y.i}$. U_{gir} daxili müqaviməti isə kaskadın çıxış müqavimətinə bərabərdir: $R_{\text{dax}} = R_{\text{çix}}$.



Şəkil 11.4. Transformatorlu gücləndirici kaskadın ekvivalent sxemi

Tranzistorlu gücləndirici kaskadın yük qoşulmamış rejimdə gücləndirmə əmsalını tapmaq üçün ümumi emitterli sxemin tənliklərindən istifadə edirik (şəkil 11.4)

$$\begin{aligned} u_{gir} &= h_{11} i_{gir} \\ i_{cix.y.i} &= h_{21} i_{gir} + h_{22} u_{cix.y.i} \end{aligned} \quad (11.17)$$

Tənliklər dəyişən toplananlar üçün yazılmışdır və $h_{12} = 0$ götürülmüşdür. Yüklənməmiş iş rejimində $i_{cix.y.i} = \frac{u_{cix.y.i}}{R_k}$

olduğunu nəzərə alsaq (mənfi işarəsi çıxış gərginliyinin giriş gərginliyinə nisbətən əks fəzada olduğunu göstərir). (11.17) tənliklərinin birgə həllindən alırıq:

$$u_{cix.y.i} = -u_{gir} \frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot \frac{R_k}{1 + h_{22} R_k} \quad (11.18)$$

burada R_k – kollektor dövrəsinin müqavimətidir.

(11.18) ifadəsindən yüklənməmiş kaskadın gücləndərmə əmsalı üçün alırıq:

$$K_{i.y.i} = \left| \frac{U_{cix.y.i}}{U_{gir}} \right| = \frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot \frac{R_k}{1 + h_{22} R_k} \quad (11.19)$$

Lampalı gücləndiricidə olduğu kimi, tranzistorlu gücləndiricinin gücləndirmə əmsalı üçün yazı bilərik:

$$\dot{K}_i = \frac{\dot{U}_{cix}}{\dot{U}_{gir}} = \frac{K_{i.y.i} \cdot \frac{R_{gir}}{R_{gir} - R_{cix}}}{1 + j \left(\omega \tau_y - \frac{1}{\omega \tau_3} \right)} \quad (11.20)$$

burada R_{cix} – baxılan kaskadın çıxış müqavimətidir, təxminən R_k -ya bərabərdir; R_{gir} – sonrakı kaskadın giriş müqavimətidir;

$\tau_y = C_0 \frac{R_{gir} R_{cix}}{R_{gir} + R_{cix}}$ – yuxarı tezliklərdə kaskadın zaman

sabiti; $\tau_a = C_0(R_{gir} + R_{cix})$ – aşağı tezliklərdə kaskadın zaman sabitidir.

Gücləndirmə əmsalının modulu və argumenti üçün alırıq:

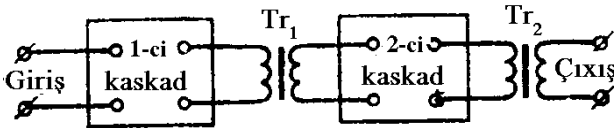
$$K_u = \frac{K_{i,y,i} \cdot \frac{R_k}{R_{gir} + R_{cix}}}{\sqrt{1 + \left(\omega \tau_y - \frac{1}{\omega \tau_a} \right)^2}} \quad (11.21)$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{1}{\omega \tau_a} - \omega \tau_y \right) \quad (11.22)$$

Tranzistorlu gücləndiricinin tezlik xarakteristikaları şəkil 11.3,b-də verilmişdir. Bunlar lampalı gücləndiricinin xarakteristikalarına oxşardır.

11.4. Transformator rabitəli tranzistorlu gərginlik gücləndiriciləri

Kaskadlar arasındakı rabitə transformator vasitəsilə olan gərginlik gücləndiricilərinə *transformator rabitəli gücləndiricilər* deyilir (şəkil 11.5). Transformatorla gərginliyin yüksəlməsi nəticəsində kaskadın gücləndirmə əmsalı artır.

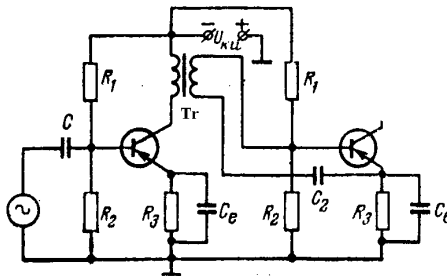


Şəkil 11.5. Transformator rabitəli gücləndiricilərin quruluş sxemi

Transformator rabitəli gücləndiricinin RC-rabitəli gücləndiricilərlə müqayisə etdikdə onun bir çox nöqsan cəhətlərini görmək olar:

1. Aşağı tezliklər oblastında gücləndirmə əmsalının çox kəskin dəyişməsi.
2. Kondensatora nisbətən transformatorun çəkisinin, ölçülərinin və qiymətinin böyüklüyü.
3. Yüksək tezliklərdə gücləndirmə əmsalının artması.

İkikaskadlı tranzistorlu transformator rabitəli gücləndiricinin sxemi şəkil 11.6-da göstərilmişdir. Lampalı gücləndiricilərdən fərqli olaraq burada transformatorun transformasiya əmsalı vahiddən kiçik götürülür. Bu vəziyyət sonrakı kaskadın kiçik giriş müqavimətini əvvəlki kaskadın böyük çıxış müqaviməti ilə əlaqələndirməyin vacibliyindən irəli gəlir. Sxemdə yerdəyişmə dövrəsinin R_1 , R_2 , R_3 , C_e elementləri qoşulmuşdur. Birinci kaskadın çıxışına kollektor dövrəsinə – transformatorun birinci dolağı birləşdirilmişdir. Transformatorun ikinci dolağı C_2 kondensatoru vasitəsilə ikinci kaskadın girişinə qoşulmuşdur. C_2 kondensatorunun vəzifəsi sabit cərəyanın transformator dolağına daxil olması qarşısını almaqdır.



Şəkil 11.6. İkikaskadlı tranzistorlu transformator rabitəli gücləndiricilərin sxemi

Çoxkaskadlı yarımkeçiricili gücləndiricilərdə müqavimətlərin tam əlaqələndirilməsinə yalnız kiçik cərəyanlı ilk kaskadlarda nail olmaq olur. Gücləndiricinin girişindən uzaqlaşdıqca belə əlaqələndirmə mümkün deyil, çünki tranzistorun çıxış müqaviməti çox böyük, mənbələrin gərginliyi isə kiçik olur.

Orta tezliklər oblastında reaktiv müqavimətlər özlərini aşkar etmir və cərəyanın gücləndirmə əmsalı belə tapıla bilər:

$$K_{i.or} = \frac{\dot{I}_k}{\dot{I}_b n} \quad (11.23)$$

burada $\dot{I}_k$ – kollektor cərəyanı; $\dot{I}_b$ – baza cərəyanı; n – transformatorun transformasiya əmsalıdır.

Aşağı tezliklər oblastında L_0 induktivliyinin təsiri artır, bu da gücləndirmə əmsalının azalmasına səbəb olur. Yüksək tezliklər oblastında kollektor keçidinin C_k tutumunun və transformator dolaqlarının səpələnmə induktivliklərinin (L_s) təsiri aşkar olunur. Müəyyən tezlikdə C_k və L_s -ə görə gərginliklər rezonansının təsirindən tezlik xarakteristikasında artma müşahidə edilir. Tezliyin sonrakı artması gücləndirmə əmsalının azalmasına səbəb olur.

11.5. Güc gücləndiriciləri haqqında ümumi təsəvvür

Güc gücləndiricilərinin əsas vəzifəsi ona verilən gücü mümkün qədər böyük f.i.ə. ilə və minimal qeyri-xətti təhriflə gücləndirib yüklə verməkdir. Güc gücləndiricilərindən telefon, ucadanışan (reproduktor), qeydedici aparat və s. istifadə olunur.

İşləmə prinsiplərinə görə güc gücləndiriciləri birtaklı və ikitaklı olur. Güc gücləndiricilərində istifadə olunan lampalar və tranzistorlar, ondan tələb olunan çıxış gücünə görə

seçilir, Çıxış güc çox az olan güc gücləndiricilərində gərginlik gücləndiricilərində istifadə olunan lampalar və tranzistor tətbiq olunur. Orta güclü güc gücləndiricilərində xüsusi çıxış lampalarından (triody, şüa tetrodu və pentoddan) güclü müstəvikişli tranzistorlardan istifadə olunur. Güclü güc gücləndiricilərində isə xüsusi tipli generator lampalarından istifadə edilir. Güc gücləndiricilərinin işini xarakterizə edən əsas parametrlər aşağıdakılardır:

1. Gücləndiricinin çıxış gücü

$$P_{cix} = \frac{1}{2} I_{am} U_{am}$$

2. Gücləndiricinin mənbədən tələb etdiyi güc

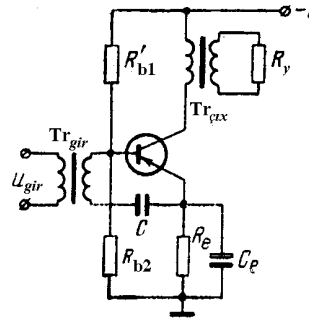
$$P_{menbe} = U_{a0} I_{a0}$$

3. Gücləndiricinin f.i.ə.

$$\eta = \frac{P_{cix}}{P_{menbe}}$$

4. Qeyri-xətti təhrif əmsalı.

Birtəktli güc gücləndiriciləri. Transformatorlu birtəktli ümumi emitterli güc gücləndiricilərində (şəkil 11.7) baza gərginliyinin böyük qiymətlərinə dözən və böyük qiymətli cərəyanı keçirə bilən yarımkeçirici triodlardan istifadə olunur. Lampalı güc gücləndiricilərindən fərqli olaraq, tranzistorlu güc gücləndiricilərində əsas məsələ kollektorun p-n keçidində yaranan istilik enerjisinin ətraf mühitə verməkdir. Əks halda lazımi çıxış gücü almaq olmur.



Şəkil 11.7. Birtəktli transformatorlu güc gücləndiriciləri

Tranzistorlu güc gücləndiricilərində çıxış xarakteristikasının qeyri-xəttilik daha çox olur. Çünki yarımkeçirici triod böyük qiymətli cərəyanla və gərginliklə işlədikdə onu

xarakterizə edən əsas parametrlər gücləndiricinin iş rejimindən asılı olur.

Birtəktli tranzistorlu güc gücləndiriciləri, adətən, A rejimində işləyir. Kiçik güclü gücləndiricilər üçün f.i.ə. həlledici amil olmadığından onlar birtəktli hazırlanır.

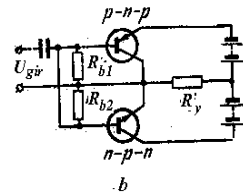
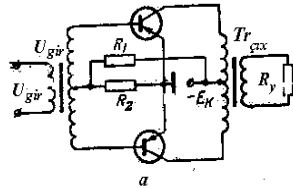
İkitəktli güc gücləndiriciləri. Lampalı ikitəktli gücləndiricilərdən fərqli olaraq analogi tranzistorlu güc gücləndiriciləri (şəkil 11.8,a) çox zaman transformatorlarsız hazırlanır (şəkil 11.8,b). Yarımkeçirici triodlardan biri p-n-p, o biri n-p-n tipli olur. p-n-p və n-p-n triodlarının sxemdəki kimi birləşməsi dövrəni transformatorlarsız qurmağa, həm də güc gücləndiricisinin B rejimində işləməsinə imkan verir.

Güç gücləndiricisinin girişinə verilən signalın sıfır qiymətində bazanın və emitterin potensialları bərabər olduğundan, hər iki yarımkeçirici triod bağlı olacaqdır.

Giriş signalı sıfırdan fərqli olduqda p-n-p tipli triod yalnız müsbət, n-p-n tipli triod isə yalnız mənfi yarımperiodda işləyir.

Dövrənin transformatorlarsız qurulması yarımkeçiricili güc gücləndiricilərinin üstün cəhətlərindən biri, çatışmayan cəhəti isə tranzistorların parametrlərinin mütləq eyni olmasının vacibliyidir.

Lampalı güc gücləndiricilərinə nisbətən tranzistorlu güc gücləndiricilərinin əsas üstünlüyü f.i.ə.-nin böyük olması, mənfi cəhəti isə qeyri-xətti təhriflərin yüksəkliyi.



Şəkil 11.8. İkitəktli transformatorlu güc gücləndiriciləri

11.6. Əks rabitəli gücləndiricilər

Gücləndiricilərin çıxışındakı enerjinin bir hissəsinin, onun girişinə verilməsi *əks rabitə* adlanır. Gücləndiricilərin çıxışı ilə girişini əlaqələndirən bu dövrə β dövrəsi adlanır

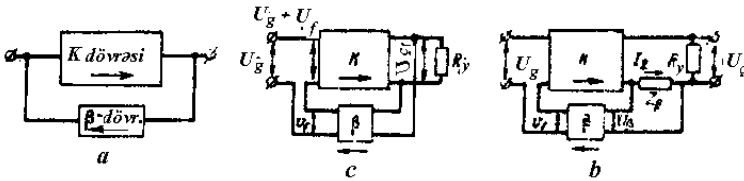
(şəkil 11.9,a). Gücləndiricilərin əks rəbitəsiz dövrəsi K dövrəsi adlanır.

Əks-rəbitənin növləri. Əks rəbitənin ən çox istifadə olunan növləri aşağıdakılardır:

1. Gərginliyə görə əks rəbitə (şəkil 11.9,c).
2. Cərəyana görə əks rəbitə (şəkil 11.9,b).

Gərginliyə görə əks-rəbitə yaratdıqda girişdəki $u_g + u_f$ gərginliyinin dəyişməsi $u_{çix}$ çıxış gərginliyindən asılı olur (şəkil 11.9,c). Cərəyana görə əks rəbitəli dövrələrdə isə $u_g + u_f$ giriş gərginliyi z_β müqavimətindəki I_2 cərəyanından asılı olur. u_t əks rəbitə gərginliyinin fazaca dəyişməsindən asılı olaraq $u_g + u_f$ də dəyişir.

Giriş gərginliyi u_g ilə əks rəbitə gərginliyi u_t eyni fazada olduqda, onların cəmi $u_g + u_f$ və çıxış gərginliyi $u_{çix}$ artır. Əmələ gələn belə rəbitə **müsbət rəbitə** adlanır.



Şəkil 11.9. Əks-rəbitəli gücləndiricilərin blok sxemi

Əgər giriş u_{gir} və əks-rəbitə u_f gərginlikləri əks fazada olarsa, girişdəki gərginliklərin cəmi və çıxış gərginliyi azalır. Yaranan rəbitə **mənfi rəbitə** adlanır.

Gücləndiricilərin girişinə əks rəbitə gərginliyinin verilməsi üsuluna görə **paralel və ardıcıl əks rəbitələri** fərqləndirirlər.

Gücləndiricinin keyfiyyəti mənfi əks rəbitənin düzgün seçilməsindən çox asılıdır. Təcrübədə gərginliyə görə ardıcıl əks rəbitədən geniş istifadə olunur.

Əksrəbitəli gücləndiricilərin əsas xassələri. Əksrəbitə gərginliyinin $\dot{U}_f$ çıxış gərginliyinə $\dot{U}_{çix}$ olan nisbətinə əksrəbitə dövrəsinin ötürmə əmsalı β deyilir:

$$\dot{\beta} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_{cix}} = \beta e^{j\varphi} \quad (11.24)$$

Ardıcıl əksrabitə olduqda gücləndiricinin girişinə

$$\dot{U}_{t1} = \dot{U}_{gir} + \dot{U}_f \quad (11.25)$$

gərginliyi təsir edir. Bu ifadənin hər tərəfini $\dot{U}_{cix}$ çıxış gərginliyinə bölək

$$\frac{\dot{U}_{t1}}{\dot{U}_{cix}} = \frac{\dot{U}_{gir}}{\dot{U}_{cix}} + \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_{cix}}$$

$$\frac{\dot{U}_{cix}}{\dot{U}_{gir}} = K - \text{əksrabitə olmadıqda,} \quad \frac{\dot{U}_{cix}}{\dot{U}_{t1}} = K - \text{əksrabi-}$$

tə olduqda (gücləndirmə əmsallarının ifadələridir).

$\dot{\beta} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_{cix}}$ - olduğunu nəzərə alsaq, yazmaq olar:

$$\frac{1}{\dot{K}_f} = \frac{1}{\dot{K}} + \dot{\beta}$$

buradan

$$\dot{K}_f = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{\beta} K} \quad (11.26)$$

$\dot{K} = K e^{j\varphi_k}$ və $\dot{\beta} = \beta e^{j\varphi_\beta}$ ifadələrini yerinə yazsaq, alarıq:

$$\dot{K}_f = \frac{ke^{j\varphi_k}}{1 - \beta Ke^{j(\varphi_k + \varphi_\beta)}} \quad (11.27)$$

$\varphi_k + \varphi_\beta = \pi$ olduqda əksrabitə mənfi olur və əksrabitə əmsalı üçün $\dot{\beta} \dot{K} = -\beta K$ alırıq. Bu zaman gücləndirmə əmsalının Modulu üçün

$$K_f = \frac{K}{1 + \beta K} \quad (11.28)$$

alırıq, yəni əksrabitə daxil etdikdə gücləndirmə əmsalı $(1 + \beta K)$ dəfə azalır.

Əgər $\varphi_k + \varphi_\beta = 0$ olsa, giriş gərginliyi $\dot{U}_g$ ilə əksrabitə gərginliyi $\dot{U}_f$ fazaca eyni olar. Bu zaman $\dot{\beta} \dot{K} = \beta K > 0$ və müsbət əksrabitə alınır. Müsbət əksrabitə gücləndirmə əmsalının modulu üçün yaza bilərik:

$$K_f = \frac{K}{1 - \beta K} \quad (11.29)$$

Müsbət əksrabitə zamanı gücləndirmə əmsalının artmasına baxmayaraq onun sabilliyi pisləşir. $\beta K \geq 1$ olduqda isə gücləndirici özünə təsirlənən generator rejiminə keçir. Özünə təsirlənmə rejimi gücləndirici üçün yolverilməzdir, çünki signalın gücləndirmə prosesi pozulur.

Mənfi əksrabitədə, gücləndirmə əmsalının azalmasına baxmayaraq, bu rəbitə elektron və yarımkeçirici gücləndiricilərdə geniş tətbiq edilir. Mənfi əksrabitə gücləndiricinin iş keyfiyyətini yaxşılaşdırmaq üçün təsirli vasitədir. Mənfi əksrabitə ilə:

- 1) Gücləndirmə əmsalının sabilliyini artırmaq, tezlik xarakteristikasını yaxşılaşdırmaq və bununla da buraxma zolağını genişləndirmək;
- 2) Qeyri-təhrifləri azaltmaq və maneələri zəiflətmək;
- 3) Giriş müqavimətini artırıb çıxış müqavimətini azaltmaq mümkündür.

$\beta K \gg 1$ götürdükdə güclü əksrabitə alınır. Bu zaman gücləndirmə əmsalının ifadəsi belə şəkil alır:

$$K_f \approx \frac{1}{\beta} \quad (11.30)$$

Göründüyü kimi, bu halda gücləndirmə əmsalı yalnız əksrabitə dövrəsinin parametrləri ilə təyin olunur, başqa faktorlar isə ona təsir etmir.

11.7. Elektrik rəqslərinin elektron gücləndiricilərinə aid sərbəst işlər

1. Gücləndiricilərin təsnifatını verin.
2. Gücləndiricilərin əsas xarakteristikalarını və parametrlərini göstərin və izah edin.
3. Gücləndiricinin iş prinsipini izah edin.
4. Gücləndiricilərin hansı iş rejimlərini fərqləndirirlər? Bu rejimləri izah edin.
5. Gücləndiricinin əvəz sxemini çəkin və ona daxil olan elementləri izah edin.
6. Gücləndiricinin tezlik və faza xarakteristikalarını izah edin.
7. İkikaskadlı tranzistorlu yarımkeçirici gücləndiricinin işini izah edin və əvəz sxemini çəkin.
8. Transformator rabitəli ikikaskadlı gücləndiricinin iş prinsipini izah edin.
9. Güc gücləndiricisinin iş prinsipini izah edin.
10. Gücləndiricidə əksrabitənin vəzifəsini və növlərini izah edin.

12-ci fəsil

ELEKTRİK RƏQSLƏRİNİN ELEKTRON GENERATORLARI. İMPULS ÇEVİRİCİLƏRİ

Sabit və dəyişən cərəyan enerjisinin müəyyən formalı və tezlikli rəqs enerjisinə çevirən qurğulara **elektron generatorları** deyilir.

Elektron generatorları iki qrupa bölünür:

1. Harmonik rəqs generatorları;
2. Relaksion generatorlar adlanan qeyri-sinusoidal rəqs generatorları.

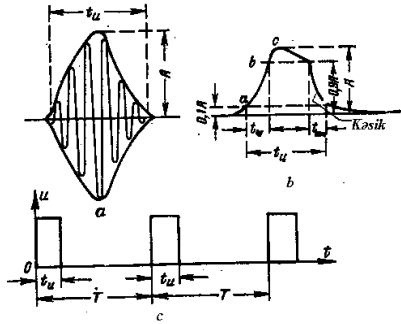
Generatorlar iş rejimlərinə görə müstəqil təsirlənən və özütəsirlənən (avtogeneratorla) olur. Neft və qazçıxarma sənayesində ölçmə və idarəetmə qurğularında və s. kiçik güclü harmonik rəqs generatorlarından geniş istifadə olunur.

12.1. İmpulsların formalaşması

Hal-hazırda neft və qazçıxarma sənayesinin qurğularında impuls texnikasından geniş istifadə olunur.

Gərginliyinin və cərəyanının davamiyyət müddətləri (i_p) onların periodlarından (T) çox-çox kiçik ($t_p \ll T$) olan qısamüddətli siqnallar impulsar adlanır (şəkil 12.1). İmpulsar, radioimpuls və videoimpuls kimi növlərə ayrılır. Yüksək tezlikli rəqslərin qısamüddətli verilişləri *radioimpulsar* adlanır (şəkil 12.1,a). Gərginliyin və cərəyanın eyni istiqamətli qısamüddətlə verilişləri isə *videoimpulsar* adlanır (şəkil 12.1,b).

Sənaye elektronikasında ən çox impulslardan istifadə olunur. Tənha impulsu təsvir edən əyrinin üç hissəyə ayırmaq olar: cəbhə, zirvə və kəsik (şəkil 12.1,b). Eyni formalı impulsar amplitudaları və davamiyyətləri ilə müqayisə edilir. İmpulsun hündürlüyünə müvafiq olan gərginlik və ya cərəyanın sıfırdan zirvəyə qədər ölçülmüş qiyməti bu impulsun *amplitudası* adlanır.



Şəkil 12.1. Görginlik (cərəyan) impulsları

İmpulsun t_u davamiyyəti bu impulsdakı gərginlik və ya cərəyanın iki qiyməti arasındakı müddətin amplitudanın onda bir hissəsinə müvafiq ($0,1 A$) zamana deyilir.

Cəbhənin davamiyyəti (t_c), adətən $0,1 A$ və $0,9 A$ səviyyələrində ölçülür. Kəsiyin davamiyyəti ($t_{kös}$) isə $0,9 A$ ilə $0,1 A$ səviyyələrində hesablanır. İmpulsların doldurma əmsalı impulsun t_u davamiyyətinin onun perioduna olan nisbətində deyilir (şəkil 12.1,c):

$$K_g = \frac{t_i}{T}$$

Doldurma əmsalının tərsi $q = \frac{T}{t_u} = \frac{1}{K_g}$ boşluq əmsalı

adlanır. Verilmiş formalı periodik təkrarlanan impulsları çox vaxt başqa formalı gərginlik və ya cərəyan əyrilərindən alırlar ki, buna da *formalaşdırma* deyilir. Bu məqsədlə xüsusi sxemlərdən istifadə olunur.

12.2. Harmonik rəqslərdən impulslar formalaşdırma sxemi

İmpulslar formalaşdırma sxemi üçün məhdudlaşdırıcılarından geniş istifadə olunur. Məhdudlaşdırıcı dəyişən gərginliyin ani qiymətlərinə təsir edərək u_g giriş gərginliyini formalaşdırır və çıxışında alınan $u_{çix}$ gərginliyinin formasını

yarımsinusoid, yaxud trapesiya şəklinə salır. Məhdudlaşdırıcının tərkibinə elektron lampası və ya yarımkeçirici cihaz kimi qeyri-xətti element daxildir. Çıxış ardıcıl birləşdirilmiş diod və buraya paralel qoşulmuş R müqavimətindən ibarət olan diod məhdudlaşdırıcısı sinusoidin mənfi hissəsini kəsir (şəkil 12.2,a). R müqavimətindəki gərginliyə bərabər olan $u_{\text{çix}}$ çıxış gərginliyi forma etibarilə həmin müqavimətdən müsbət yarımperiodda keçən cərəyan əyrisinin formasına uyğun olur. Müsbət hissədə gərginliyin maksimum qiymətini məhdudlaşdırmaq üçün çıxışa paralel olaraq diod və U_0 gərginlikli sabit cərəyan mənbəyi birgə qoşulur (şəkil 12.2,b). R müqaviməti periodun müsbət hissəsindən keçən i cərəyanını məhdudlaşdırır. Bu halda

$$u_{\text{çix}} = u_g - iR = u_g - \frac{u_g - U_0}{R + R_1} R$$

burada R_1 – diodun daxili müqavimətidir.

Adətən, $R \gg R_1$ və $u_{\text{çix}} \approx U_0$ olur.

Beləliklə, dayaq gərginliyi adlanan U_0 gərginliyinin qiyməti müsbət yarımperiodda çıxış gərginliyi əyrisinin düzxətli hissəsinin ordinatını müəyyən edir. $U=0$ olduqda çıxış gərginliyi əyrisində sinusoidin yalnız mənfi hissələri meydana çıxmaqla, müsbət hissələr tamamilə kəsilmiş olur.

Mənfi hissələrdə gərginliyin maksimal qiymətinin məhdudlaşdırılması analoji yolla əldə edilir. Bu məqsədlə diod və dayaq gərginliyi mənbəi elə qoşulur ki, mənfi giriş gərginliyində dioddan cərəyan keçsin. İkitərəfli məhdudlaşdırma üçün çıxışa paralel qoşulmuş iki budaqdan istifadə olunur. Bu budaqların diod və dayaq gərginlik mənbələri bir-birinin əksinə birləşdirilir. Çıxış gərginliyi bu halda trapesiya formasına malik olur (şəkil 12.2, c).

12.3. Diferensiallayıcı və inteqrallayıcı dövrlər

Diferensiallayıcı dövrə öz çıxışında u_g giriş gərginliyinin dəyişmə sürətinə, yəni onun zamana görə törəməsinə mütənasib olan $u_{\text{çix}}$ çıxış gərginliyi yaradır. Ən

sadə diferensiallayıcı özək (şəkil 5.3,a) aşağıdakı tənliklə təsvir edilə bilər:

$$u_g = iR + \frac{1}{C} \int i dt$$

C tutumunu və R aktiv müqavimətini kifayət qədər kiçik götürməklə, $RC < T$ (burada T – giriş gərginliyinin periodudur) münasibətinə riayət edərək, R müqavimətində gərginlik düşgüsünü çox kiçik qiymətdə almaq olar:

$$\frac{1}{C} \int i dt \gg iR$$

Bu halda

$$u_g \approx \frac{1}{C} \int i dt$$

diferensialladıqdan sonra isə

$$i \approx C \frac{du_g}{dt}$$

olur. Çıxış gərginliyi $u_{cix} = iR$ çox kiçikdir, lakin onun qiyməti

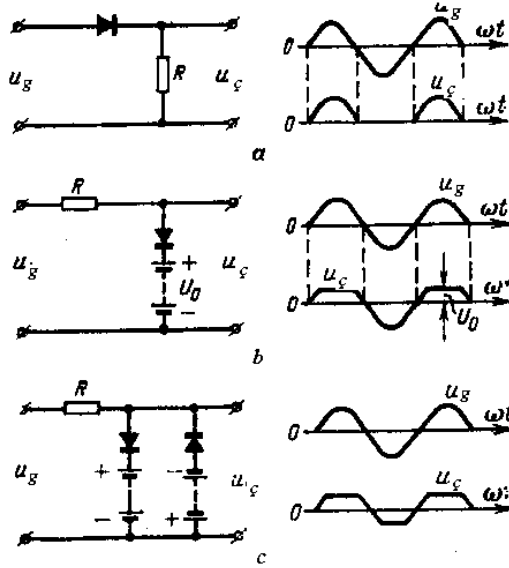
$$u_{cix} \approx RC \frac{du_g}{dt}$$

giriş gərginliyinin zamana görə törəməsinə mütənasibdir.

Diferensiallayıcı özəyin tətbiqinə misal olaraq, böyük davamiyyətli trapesiodal impulsların çox qısa impulslara çevrilməsini göstərmək olar. Şəkil 12.3,b-də giriş impulsları və özəyin çıxışında ideallaşdırılmış impulsların forması göstərilmişdir.

İnteqrallayıcı dövrə elə təsir göstərir ki, çıxış gərginliyi giriş gərginliyinin zamana görə inteqralına mütənasib olur. Sadə inteqrallayıcı özəyin sxemi şəkil 12.4,a-da verilmişdir. Bu sxemin diferensiallayıcı özəkdən fərqi ondan ibarətdir ki, burada çıxış gərginliyi kondensatorun sıxaclarından götürülür. Bu halda, həmçinin

$$u_{cix} = iR + \frac{1}{C} \int i dt$$



Şəkil 12.3. Diferensiallayıcı sxem (a), onun giriş və çıxış gərginliyinin qrafikləri (b)

R və C kəmiyyətləri kifayət qədər böyük seçilir. Odur ki, $RC \gg T$ və inteqrallayıcı dövrdə gərginlik əsasən aktiv müqavimətdə düşür

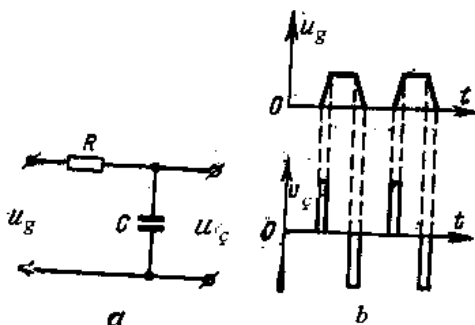
$$iR \gg \frac{1}{C} \int idt$$

Beləliklə, $u_{cix} \approx iR$ və $i = \frac{U_{cix}}{R}$. Odur ki, kondensatorda və ya özəyin çıxışında gərginlik

$$u_{cix} = \frac{1}{C} \int idt \approx \frac{1}{RC} \int u_{cix} dt$$

giriş gərginliyinin zamana görə inteqralı ilə mütənasibdir.

İnteqrallayıcı özəyin köməyi ilə, məsələn, düzbucaqlı impulsları mişarşəkilli impulslara çevirmək olar (şəkil 12.4,b).



Şəkil 12.4. İnteqrallayıcı özəyin sxemi (a), onun giriş və çıxış gərginliyinin qrafikləri (b)

12.4. Multivibratorlar

Forma etibarilə düzbucaqlıda yaxın gərginlik və ya cərəyan impulsları yaradan elektrik generatorlarının bir növü **multivibrator** adlanır. Multivibratorlar iki cür olur:

a) xarici işəsalma impulslarının təsiri olmadan fasiləsiz olaraq avtogenerator daxilində işləyən multivibratorlar;

b) xarici işəsalma impulsu verildikdə yalnız bir və ya bir neçə özünə-rəqslər yaradan multivibratorlar.

Şəkil 12.5-də p-n-p tranzistorlarında yığılmış və ümumi emitter sxemi ilə qoşulmuş multivibratorlar sxemlərindən biri verilir. Tranzistorlu multivibratorun iş prinsipi aşağıdakı kimidir. C_{T1} və C_{T2} rabitə kondensatorlarından hər biri periodun o hissəsində dolur ki, tranzistor bağlıdır və bu kondensator onun kollektor dövrəsinə qoşulmuş vəziyyətdədir. Məsələn, C_{T2} kondensatoru T_2 tranzistorunun bağlı vəziyyətində boşalır. Boşalma cərəyanı açıq, T_1 triodunun bazasından və R_{k2} kollektor müqavimətindən keçir. Eyni zamanda C_{T2} kondensatoru T_1 triodu və R_2

müqavimətindən boşalmaqla həmin müqavimətdə gərginlik düşgüsü yaradır. a_2 nöqtəsinin müsbət potensialı T_2 tranzistorunun bağlanması təmin edir, bu nöqtənin potensialı sıfıra qədər azaldıqda isə T_2 tranzistoru açılır. Bu tranzistorun R_1 müqavimətli dövrəsindən C_{T1} kondensatoru boşalır. a_1 nöqtəsinin potensialı yüksəlməklə T_1 tranzistoru bağlanır, T_2 isə tamamilə açılır. Nəticədə C_{T2} kondensatoru dolur.

12.5. Elektrik rəqslərinin elektron generatorları.

İmpuls çeviriciləri aid sərbəst işlər

1. Generatorun özünə-təsirlənmə şərtlərini izah edin.
2. LC tipli harmonik rəqs generatorunun iş prinsipini izah edin.
3. RC tipli harmonik rəqs generatorunda özünə-təsirlənmə necə gedir?
4. İmpuls nəyə deyilir?
5. İmpulsların formalaşdırılması sxemini izah edin.
6. Diferensiallayıcı və inteqrallayıcı özləklərdən hansı məqsədlər üçün istifadə edilir?
7. Multivibratorun quruluşunu və iş prinsipini izah edin.

13-cı fəsil

DÜZLƏNDİRİCİ QURULUŞLAR

Dəyişən cərəyanı düzləndirmək üçün müxtəlif tipli birtərəfli keçiriciliyə malik elektrik ventillərindən istifadə olunur. Düzləndirici quruluşlar transformatorlardan, bir və ya bir neçə ventildən, hamarlayıcı süzgəcdən, stabilizatorlardan və yükləndən ibarətdir. Düzləndirici quruluşların işini xarakterizə edən əsas göstəricilərinə düzləndirilmiş cərəyan və gərginliyin qiyməti, onun f.i.ə., düzlənmiş cərəyan və gərginliyin sabit və dəyişən toplananları arasında nisbət, buraxılan işçi temperaturalar diapazonu, çəkisi, qabarit ölçüləri, xidmət müddəti və qiyməti aiddir. Düzləndirici quruluşlarda elektron-ion və yarımkeçirici ventillərdən istifadə edilir.

Son zamanlar müxtəlif növlü güclü yarımkeçirici ventillərin yaradılması nəticəsində düzləndirici quruluşlarda elektron və ion ventillərdən çox az istifadə olunur və bunları yarımkeçirici ventillər sıxışdırıb aradan çıxarır. Yarımkeçirici ventillərin başlıca üstün cəhətlərindən biri odur ki, onlarda közərmə dövrəsi yoxdur və buna görə də iqtisadi cəhətdən əlverişlidir.

Yarımkeçirici ventillərin vacib üstünlüklərindən biri də onların yüksək etibarlılığa malik olması, xidmət müddətinin uzunluğudur.

Ventilin düzləndirmə xasiyyəti düz cərəyanın ($I_{düz}$) əks cərəyanına ($I_{əks}$) nisbəti ilə xarakterizə olunur və nisbət düzləndirmə əmsalı (K_d) adlanır:

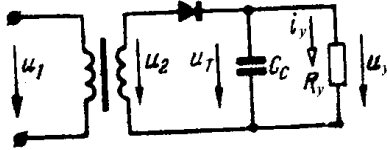
$$K_d = \frac{I_{düz}}{I_{əks}} \quad (13.1)$$

Düzləndirmə əmsalının ədədi qiyməti artdıqca düzləndiricinin keyfiyyəti yaxşılaşır.

Adi düzləndiricilərdən başqa tənzimlənən düzləndiricilərdən də geniş istifadə olunur. Bu düzləndiricilərdə idarə olunan ventillər tətbiq edilir.

13.1. Bifazlı dəyişən cərəyanın biryarımperiodlu düzləndiriciləri

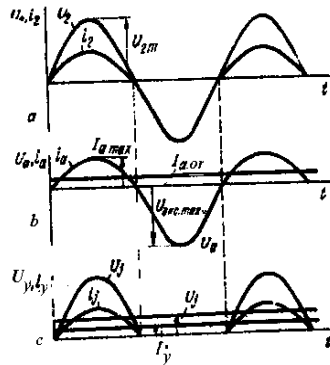
Bir yarımperiodlu dəyişən cərəyan düzləndiricisi transformator, bir ədəd yarımkeçirici ventildən və yük müqavimətindən ibarətdir (şəkil 13.1). Bir yarımperiodlu bifazlı dəyişən cərəyan düzləndiricisinin iş prinsipini izah etmək üçün (şəkil 13.1) ideal transformator



Şəkil 13.1. Bifazlı dəyişən cərəyanlı biryarımperiodlu düzləndiricinin sxemi

və ventil üzərində qurulmuş xalis aktiv yüklü düzləndirmə sxeminə baxaq. Transformator və ventili ideal götürmək onların müqavimətini nəzərdən atmağa imkan verir.

Şəkil 13.2-də düzləndiricinin cərəyan və gərginliklərinin zaman diaqramları verilmişdir. Transformator ideal olduğuna görə onun birinci dolağına verilmiş gərginlik (u_1) sinusoidal olsa, ikinci dolaqda da sinusoidal gərginlik (u_2) yaranır. İkinci dolaqda yaranan sinusoidal u_2 gərginliyinin yalnız müsbət yarımperiodunda dövrədən i_2 cərəyanı keçər (şəkil 13.2,a). Deməli, ventildən keçən i_2 cərəyanı sinusoidin müsbət yarım dalğalarından ibarət olacaqdır (şəkil 13.2,b).



Şəkil 6.2. Biryarımperiodlu düzləndiricinin zaman diaqramı

Qəbul etdiyimiz şərtə görə müsbət yarımperiodlarda ventildə gərginlik sıfır, mənfi yarımperiodlarda isə transformatorun ikinci tərəflərinin gərginliyinə bərabər olacaqdır. Yük müqaviməti (R_y) ventili ilə ardıcıl birləşdiyindən, yük cərəyanı (i_y) və yük gərginliyi (u_y) yalnız müsbət yarımperiodlarda yarana biləcəkdir (şəkil 13.2,c). Elə bu səbəbdən də baxılan sxemlər bir yarımperiodlu düzləndirici sxemlər adlanır.

Göstərilən zaman diaqramından istifadə edərək, düzləndirici sxeminin müxtəlif hissələrində, gərginlik və cərəyanlar arasındakı nisbətləri tapmaq olar.

Düzləndirici sxeminin hesabı üçün düzləndirilməsi lazım olan gərginliyin təsiredici qiyməti U_1 , yük müqavimətinin (R_y) tələb etdiyi düzləndirilmiş gərginliyin (U_y) və cərəyanın (I_y) orta qiymətləri verilir. Transformatorun transformasiya əmsalını və ventilin əsas parametrlərini (əks gərginliyin maksimal qiyməti $U_{\text{əks.m}}$, cərəyanın $I_{a \text{ or }} I_{a.m}$ qiymətlərini) tapmaq tələb olunur.

Transformatorun transformasiya əmsalını

$$n = \frac{W_2}{W_1} = \frac{U_2}{U_1} \text{ təyin etmək üçün onun ikinci tərəf gərginliyi}$$

(U_2) ilə düzləndirilmiş (U_y) gərginlik arasında münasibət yaratmaq lazımdır. Həmin münasibəti düzləndirilmiş biryarımperiodlu gərginliyin orta qiymətini təyin etməklə almaq olar:

$$U_y = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_{2m} \sin \alpha d\alpha = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \quad (13.2)$$

$$U_2 \approx 2,22 U_y \quad (13.3)$$

burada U_{2m} , U_2 – uyğun olaraq transformatorun ikinci dolağı gərginliyinin amplituda və təsiredici qiymətləri; $\alpha = \omega t$ – dəyişən gərginliyin faza bucağıdır.

Şəkil 13.2,b-dən göründüyü kimi, əks gərginliyin maksimal qiyməti transformatorun ikinci dolağındakı gərginliyin amplitudasına bərabərdir. (6.2) ifadəsini nəzərə alsaq, əks gərginlik üçün yaza bilərik:

$$U_{aks.m} = U_{2m} = \pi U_y \quad (13.4)$$

Ayındır ki, ventilin cərəyanının orta qiyməti düzləndirilmiş cərəyanın orta qiymətinə bərabər

$$I_{a\ or} = I_y$$

maksimal qiyməti isə

$$I_{a\ m} = \frac{U_{2m}}{R_y} = \frac{\pi U_y}{R_y} = \pi I_y \quad (13.5)$$

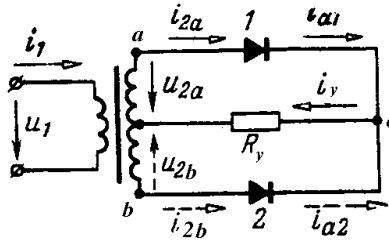
olacaqdır. Aldığımız ifadələr bir yarımperiodlu dəyişən cərəyan düzləndiricilərinin sxemlərində istifadə olunan ventillərin düzgün seçilməsinə imkan yaradır.

Qeyd etmək lazımdır ki, transformatorun ikinci dolağından keçən i_2 cərəyanında sabit toplanan yaranır. Cərəyanın sabit toplananından transformatorunda maqnitləşmənin əmələ gəlməsi nəticəsində onun xarakteristikası dəyişir. Nəticədə transformatorun induktiv müqavimətinin azalmasından yüksüz işləmə cərəyanı artır, transformatorun və deməli, bütövlükdə düzləndiricinin f.i.ə. azalır, düzləndiricinin keyfiyyəti pisləşir. Bundan əlavə, bir yarımperiodlu dəyişən cərəyan düzləndiricilərinin mənfi cəhətlərindən biri də düzləndirilmiş gərginlikdə döyünmələrin böyük olmasıdır.

13.2. Bifazlı dəyişən cərəyanın iki yarımperiodlu düzləndiriciləri

İki yarımperiodlu bir fazlı dəyişən cərəyan düzləndirici quruluşlar iki sxem üzrə qurulur:

1) transformatorun ikinci dolağında orta nöqtəsi olan sxemlə (şəkil 13.3);



Şəkil 13.3. İkinci dolaqda orta nöqtəsi olan transformatorlu sxem

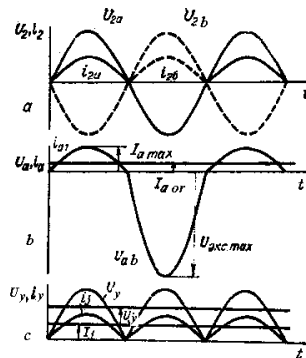
2) körpü sxemi ilə (şəkil 13.5).

Transformatorun ikinci dolağında orta nöqtəsi olan sxemdə iki ədəd ventillər olur. Bunun sayəsində yük müqavimətindən hər iki yarımperiodda cərəyan keçir.

Əgər transformatorun ikinci dolağının 0 nöqtəsinə nəzərən a nöqtəsi müsbət, b nöqtəsi isə mənfi potensiallı olarsa, onda 1 ventildən və yük müqavimətindən (R_y) cərəyan keçir. Nəticədə c nöqtəsinin potensialı müsbət, 0 nöqtəsinin potensialı isə mənfi olar.

Ventili ideal qəbul etsək, yəni $R_{\text{əks}} = \infty$ və $R_{\text{düz}} = 0$, onda 2 ventildə U_{ba} -ə bərabər əks gərginlik yaranır. Sonrakı yarımperiodda cərəyan 2 ventildən və R_y müqavimətindən keçir. 1 ventildə isə U_{ba} əks gərginliyi yaranır. Yenə də c nöqtəsi müsbət, 0 nöqtəsi mənfi potensiallı olur.

Göstərilən sxemin müxtəlif hissələri üçün gərginlik və cərəyanın zaman diaqramları şəkil 13.4-də göstərilmişdir.



Şəkil 6.4. İkinci dolağında orta nöqtəsi olan transformatorlu ikiyarımperioddlu düzləndiricinin zaman diaqramları

Transformatorun ikinci dolağının 0 və ab hissələrindəki gərginlik sinusoidal qanunla dəyişir. Onların hər birindən cərəyan növbə ilə, uyğun yarımperiod ərzində ventillərdə olduğu kimi axır (şəkil 13.4,a).

Ventildəki u_a gərginliyi keçirici yarımperiodlarda sıfır, qeyri-keçirici yarımperiodlarda isə transformatorun ikinci dolağının gərginliyinə (U_{ab}) bərabər olur (şəkil 13.4,b).

Düzləndirilmiş gərginliyin və cərəyanın qrafikləri (şəkil 13.4,c), bir yarımperiodlu sxemə görə iki yarımperiodlunun üstün cəhətlərini göstərir. Göründüyü kimi, I_a or-
nının eyni qiymətlərində düzləndirilmiş cərəyanın orta qiyməti bir yarımperiodluda olduğundan iki dəfə çoxdur.

Transformatorun ikinci dolağının 0a, 0b hissələrindən birinci və ikinci yarımperiodlarda cərəyanlar müxtəlif istiqamətlərdə keçdiyindən, onun maqnit selində sabit toplananlar olmur. Nəticədə onun maqnit keçiricisində sabit toplanandan maqnitlənmə yaranmır.

Ventilin parametrləri ilə yük müqavimətindəki cərəyan və gərginliyin orta qiymətləri arasındakı əlaqəni göstərən ifadələri təyin edək.

İki yarımperiodlu sxemdə düzləndirilmiş gərginliyin orta qiyməti:

$$U_y = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \alpha d\alpha = \frac{2U_{2m}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2} U_2}{\pi} \quad (13.6)$$

olduğundan transformatorun ikinci dolağının yarısında gərginliyin təsiredici qiyməti üçün yazı bilərik:

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_y \approx 1,11 U_y \quad (13.7)$$

Əks gərginliyin maksimal qiyməti

$$U_{aks.m} = U_{ab.m} = 2U_{2m} = \pi U_y \quad (13.8)$$

hər bir ventillə cərəyanının orta qiyməti

$$I_{a.or} = 0,5 I_y \quad (13.9)$$

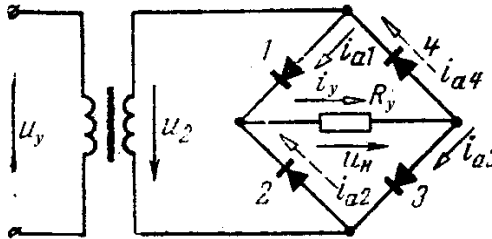
maksimal qiyməti isə

$$I_{a.m} = \frac{U_{2m}}{R_y} = \frac{\pi U_y}{2 R_y} \approx 1,57 \quad (13.10)$$

İki yarımperiodlu düzləndirici sxemin müsbət cəhətlərindən biri döyünmələrin sayının az olmasıdır; digər tərəfdən eyni ventillərdə qurulan bir yarımperiodlu düzləndiricilərə nisbətən iki yarımperiodluda yük cərəyanı iki dəfə çox olur.

Göstərilən iki yarımperiodlu düzləndiricilərin mənfi cəhəti odur ki, onları yalnız xüsusi tipli transformatorlarla hazırlamaq olur.

Körpü sxemli iki yarımperiodlu bir fazalı dəyişən cərəyan düzləndiricisinin sxemlərində dörd ədəd ventildən istifadə olunur (şəkil 13.5).



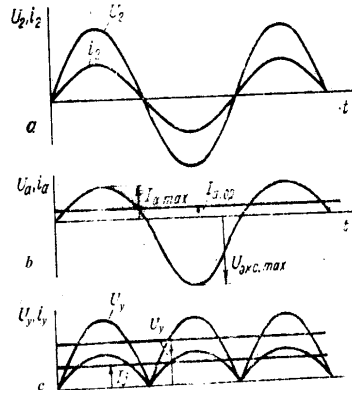
Şəkil 13.5. İkiyarımperiodlu düzləndiricilərin körpü sxemi

Sxemdəki ventillər növbə ilə cüt-cüt işləyirlər. Əgər birinci yarımperiodda u_2 gərginliyinin istiqaməti sxemdəki kimi olarsa, onda cərəyan 1 ventildən, R_y müqavimətindən və 3 ventildən keçər, 2 və 4 ventillərindən isə cərəyan keçməz. Sonrakı yarımperiodda cərəyan 2 ventildən, R_y müqavimətindən və 4 ventildən keçər. 1 və 3 ventilləri bağlı olduğundan oradan cərəyan keçməz. Körpü sxemi üçün

cərəyan və gərginliklərin zaman diaqramları şəkil 13.6-da göstərilmişdir.

Transformatorun u_1 gərginliyi sinusoidal olduğundan, onun i_2 cərəyanı da sinusoidal olacaqdır (şəkil 13.6,a). Qeyri-keçirici yarımperiodda ventilin u_a gərginliyi transformatorun u_2 gərginliyinə bərabər olacaqdır (şəkil 13.6,b). Ventilin cərəyanı, yükün cərəyanı və gərginliyinin forması əvvəl baxdığımız ikiven-tili iki yarımperiodlu sxemlərdəki kimi olacaqdır (şəkil 13.6,b,c).

Transformatorun ikinci gərginliyinin təsiredici qiyməti belə olar:



Şəkil 13.6. İkiyarımperiodlu düzləndiricinin körpü sxeminin zaman diaqramları

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_y \approx 1,11 U_y \quad (13.11)$$

Zaman diaqramından görüldüyü kimi əks gərginliyin maksimal qiyməti

$$U_{aks.m} = U_{2m} \sqrt{2} U_2 = \frac{\pi}{2} U_y \approx 1,57 U_y \quad (13.12)$$

Hər bir ventilin cərəyanının orta və maksimal qiymətləri üçün yazı bilərik:

$$I_{a.or} = 0,5 I_y \quad (13.13)$$

$$I_{a.m} = \frac{U_{2m}}{R_y} = \frac{\pi U_y}{2 R_y} \approx 1,57 I_y \quad (13.14)$$

Alınan nəticələr göstərir ki, əvvəlki sxemə nəzərən körpü sxemində əks gərginlik kiçik qiymətə malikdir. Odur ki, düzləndirilmiş gərginlik əvvəlki sxemə nəzərən iki dəfə çox olur.

Körpü sxeminin mənfə cəhəti odur ki, onun ventillərində gərginlik düşgüsünün qiyməti böyükdür. Buna səbəb düz cərəyanın iki ventildən keçməsidir.

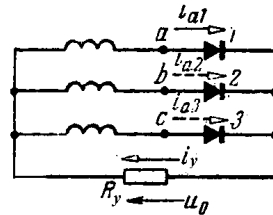
Körpü sxemlərindən ölçü texnikasında və sənaye elektronikasının kiçik güclü quruluşlarında geniş istifadə olunur.

13.3. Üçfazlı dəyişən cərəyan düzləndiriciləri

Hal-hazırda neft və qazçıxarma sənayesində ən çox üçfazlı dəyişən cərəyan düzləndiricilərindən istifadə edilir.

Üçfazlı dəyişən cərəyan düzləndiricilərinin iş prinsipini öyrənmək üçün şəkil 13.7-dəki sadə sxemə baxaq.

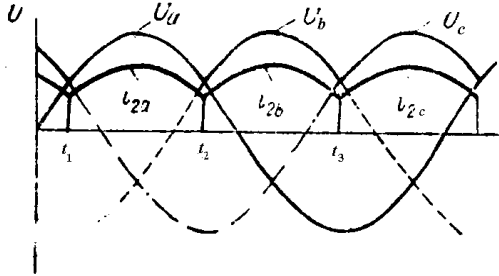
Sxemdən göründüyü kimi düzləndiricidə üç ədəd ulduz birləşmiş ventillərdən istifadə olunur. Ventillər transformatorun ikinci tərəf dolaqlarına birləşdirilir. Transformatorun birinci tərəfini həm ulduz, həm də üçbucaq birləşdirmək olar.



Şəkil 13.7. Sıfır nöqtəsi olan üçfazlı düzləndiricinin sxemi

Yük müqaviməti transformatorun sıfır nöqtəsi ilə ventillərin birləşdiyi ümumi nöqtəyə bağlanır. Göstərilən sxemdə ventillər hər üçdə bir yarımperiodda növbə ilə işləyirlər (şəkil 13.8). Məsələn, u_3 gərginliyinin müsbət u_B , u_C -nin mənfə və ya kiçik qiymətli müsbət halında. $t_1 - t_2$ zaman intervalında cərəyan transformatorun ikinci tərəf dolağından 1 ventildən və R_y müqavimətindən keçir. 2 və 3 ventillərindən cərəyan keçmir. Çünki onların anoduna keçirici istiqamətdə uyğun dolaqlardan mənfə potensiallar daxil olur. Sonrakı üçdə bir perioda, yəni $t_2 - t_3$ zaman intervalında 2

ventili işləyir. b fazasından və R_y müqavimətindən əvvəlki istiqamətlə cərəyan keçir. 1 və 3 ventilləri bağlı olur. Sonradan isə 3 ventili işləyir, 1 və 2 ventilləri bağlı olur və s.



Şəkil 13.8. Sıfır nöqtəsi olan üçfazlı düzləndiricinin zaman diaqramları

Göründüyü kimi, üçfazlı dəyişən cərəyan düzləndiricilərində cərəyanın döyülmələri bir fazalıya nisbətən çox azdır. Bu halda düzləndirilmiş gərginliyin orta qiyməti faza gərginliyindən az fərqlənir:

$$U_y = 0,827 U_{f.m} \quad (13.15)$$

Göründüyü kimi, ventilin əks gərginliyinin maksimum qiyməti xətt gərginliyinin amplitudasına bərabərdir:

$$U_{aks.m} = U_{x.m} = \sqrt{3} U_{f.m} \approx 2,09 U_y \quad (13.16)$$

Düzləndirilmiş cərəyanın orta qiyməti

$$I_{a.or} = \frac{I_y}{3} \quad (13.17)$$

maksimal qiyməti isə

$$I_{a.m} = \frac{U_{f.m}}{R_y} = \frac{U_y}{0,827 R_y} = 1,21 I_y \quad (13.18)$$

olur. Üçfazlı dəyişən cərəyan düzləndiricilərinin müsbət cəhətlərindən biri də onun f.i.ə.-nın böyük olmasıdır. Düzlənmiş gərginliyin döyünmələri sayını azaltmaq üçün üçfazlı körpü sxemlərindən istifadə edilir.

13.4. Hamarlayıcı süzgəclər

Məlum olduğu kimi, yük müqavimətinə verilən düzləndirilmiş gərginlik döyünən olur, tərkibində sabit, həm də dəyişən toplananlar vardır. Düzləndirilmiş gərginlik periodik qeyri-sinusoidal olduğundan, onları Furiye sırası şəklində sabit və harmonik toplananlara ayırmaq olar:

1) birfazlı dəyişən cərəyanın bir yarımpériodlu sxemi üçün:

$$u = U_y \left(1 + \frac{\pi}{2} \cos \omega t + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \dots \right) \quad (13.19)$$

2) birfazlı dəyişən cərəyanın ikiyarımpériodlu sxemi üçün:

$$u = U_y \left(1 + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \dots \right) \quad (13.20)$$

3) üçfazlı dəyişən cərəyanın düzləndirici sxemi üçün:

$$u = U_y \left(1 + \frac{1}{4} \cos 3\omega t - \frac{2}{35} \cos 6\omega t + \frac{1}{40} \cos 9\omega t - \dots \right) \quad (13.21)$$

Düzləndiricilərin müxtəlif sxemləri üçün yazılmış yuxarıdakı ifadələrdən göründüyü kimi, hər bir sxemdə düzləndirilmiş gərginliyin sabit və dəyişən toplananlarının nisbəti müxtəlifdir.

Düzləndirilmiş gərginliyin dəyişən toplananının sabit toplananına olan nisbəti onun döyünmələrini xarakterizə edir. *Döyünmə əmsalı* düzləndirilmiş gərginliyin əsas harmonikası amplitudasının (U_m) onun orta qiymətinə (U_y) olan nisbəti ilə xarakterizə edilir və belə yazılır:

$$p = \frac{U_m}{U_y} \quad (13.22)$$

(13.19), (13.20) və (13.21) ifadələrindən göründüyü kimi:

1) birfazlı dəyişən cərəyanın bir yarımperiodlu sxemi üçün döyünmə əmsalı $p = 1,57$;

2) birfazlı dəyişən cərəyanın iki yarımperiodlu sxemi üçün $p = 0,67$;

3) üçfazlı dəyişən cərəyan düzləndiricisinin sxemi üçün $p = 0,25$ alırıq.

Sabit cərəyanla işləyən qurğulara döyünmələri olan düzləndirilmiş gərginlik verdikdə onların iş rejimləri pozulur. Döyünmələri azaltmaq məqsədi ilə işlədilən xüsusi sxemlər *hamarlayıcı süzgəclər* adlanır. Hamarlayıcı süzgəcin əsas elementləri kondensatorlar və induktivliklərdir. Reaktiv elementlərdən istifadə olunmasına görə *induktiv, tutum və qarışıq* hamarlayıcı süzgəc sxemləri əmələ gəlir.

Hamarlayıcı süzgəclərin təsirinin effektivliyini *hamarlama əmsalı* ilə xarakterizə edirlər. Hamarlama əmsalı (q) süzgəcin çıxışındakı döyünmə əmsalının ($p_{çix}$) girişindəki (p_{gir}) döyünmə əmsalına olan nisbətində bərabərdir:

$$q = \frac{p_{çix}}{p_{gir}} \quad (13.23)$$

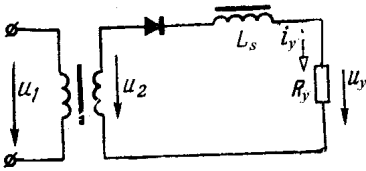
İnduktiv süzgəc birfazlı dəyişən cərəyanın bir yarımperiodlu sxemində yük müqaviməti ilə ventillə arasına ardıcıl birləşdirildikdə (şəkil 13.9) yük müqavimətindən keçən cərəyanın forması xeyli dəyişir (şəkil 13.10).

İkinci dövrənin zaman sabitindən $\left(\tau = \frac{L_s}{R_s} \right)$ asılı

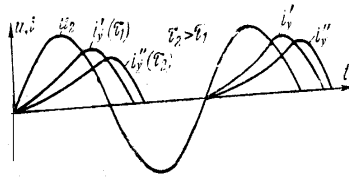
olaraq cərəyan impulsunun davamiyyət müddəti və forması dəyişir. Düzləndirilmiş cərəyanın dəyişən toplananı xeyli azalır (şəkil 13.10).

lakin eyni zamanda sabit toplananlarda azaldığına görə döyünmə əmsalı praktik olaraq azalmır. Odur ki, bir fazlı

dəyişən cərəyanın bir yarımperiodlu düzləndiricilərinə induktiv süzgəcdən istifadə edilmir.



Şəkil 13.9. İnduktiv süzgəcli sxem

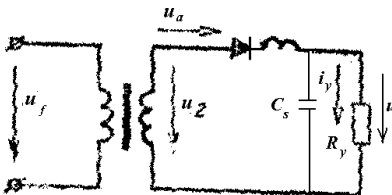


Şəkil 13.10. İnduktiv süzgəcin cərəyan və gərginliyin formasının zaman sabitindən asılılığı

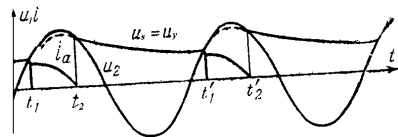
Birfazlı dəyişən cərəyanın iki yarımperiodlu və üçfazlı düzləndiricilərdə induktiv süzgəclər tətbiq etdikdə düzləndirilmiş cərəyanın sabit toplananı azalmır. Döyülmə əmsali isə bir neçə dəfə azaldıla bilər.

Tutum süzgəcindən müxtəlif tipli düzləndiricilərin sxemində istifadə edilir. Birfazlı dəyişən cərəyanın bir yarımperiodlu düzləndirici sxemində tutum süzgəcinin tətbiqinə baxaq (şəkil 13.11)

Tutum süzgəcinin iş prinsipini aydınlaşdırmaq üçün gərginliyin və cərəyanın zaman diaqramını nəzərdən keçirək (şəkil 13.12). Transformatoru və ventili ideal qəbul edək. Onda qərarlaşmış iş rejimində C_s kondensatoru müsbət yarımperiodlarda transformatorun ikinci dolağındakı gərginliyin amplitudasına qədər dolur.

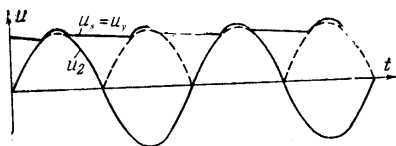


Şəkil 13.11. İnduktiv tutum süzgəcli sxem

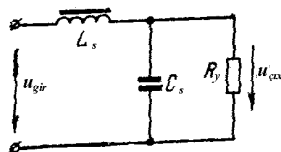


Şəkil 13.12. Biryarımperiodlu tutum süzgəcli düzləndirici üçün gərginlik və cərəyanın zaman diaqramı

u_2 gərginliyi azaldıqda kondensatorun u_s gərginliyi də azalır. Əvvəlcə boşalma sürətli olur və t_2 zaman anında (şəkil 13.12) boşalma sürəti ən böyük qiymətə çatır. u_s gərginliyinin sonrakı azalması kondensatorun R_y müqavimətinə $\tau = R_y C_s$ zaman sabiti ilə boşalması hesabına baş verir. Ventildən keçən i_a cərəyanı sıfıra bərabər olur. t_2 anından başlayaraq ventillə o vaxta qədər bağlı vəziyyətdə qalır ki, katodun potensialı anodun potensialından çox az olsun. Birləşən cərəyanın bir yarımperiodlu düzləndiricilərinə kondensatorun boşalma müddətinin intervalı yarımperioddan çox olur. Sonrakı müsbət yarımperiodda t_1 zaman momentində u_s gərginliyi transformatorun ikinci dolağındakı gərginliyə bərabər olur və kondensator yenidən gərginliyin amplituda qiymətinə (U_{2m}) qədər dolur. Beləliklə, ventildən i_2 cərəyanı $t_1 - t_2$ zaman müddətində impuls şəklində keçir. Yük müqaviməti C_s kondensatoruna paralel birləşdiyindən $u_y = u_s$ olur. Əgər transformatorun və ventilin müqavimətlərini nəzərə alsaq, onda yük müqavimətində gərginlik bir qədər az olar. Zaman diaqramında bu qırıq-qırıq xətlərlə göstərilmişdir ($t_1 - t_2$ və $\dot{t}_1 - \dot{t}_2$).



Şəkil 13.13. İkiyarımperiodlu tutum süzgəcli düzləndiricinin gərginliyinin zaman diaqramı



Şəkil 13.14. Γ – şəkilli LC süzgəcinin sxemi

Birləşən iki yarımperiodlu dəyişən cərəyan düzləndiricilərini tutum süzgəclə işlətdikdə zaman diaqramı şəkil 13.13-dəki kimi olur. Şəkil 13.12 və 13.13-də göstərilmiş zaman diaqramlarından tutum süzgəclərinin tətbiqi

ilə yük müqavimətindəki gərginliyin orta qiymətinin çoxalması və dəyişən toplananının azalması aydın görünür. Nəticədə düzləndirilmiş gərginliyin döyünmə əmsalı bir neçə dəfə kiçilir.

Qarışıq hamarlayıcı süzgəclərdən ən sadəsi Q-şəkillidir. Q-şəkilli qarışıq hamarlayıcı süzgəclər LC və RC tipli olur.

Tutum süzgəcinə görə, qarışıq LC tipli Γ -şəkilli süzgəclər daha effektivdir (şəkil 13.14). Dövrədə L_c induktivliyinin olması cərəyanın dəyişən toplananını xeyli azaldır. Sabit toplananına isə demək olar ki, heç bir təsir göstərmir (çünki sarğacın aktiv müqaviməti olduqca azdır). Γ -şəkilli LC tipli hamarlayıcı süzgəcin hamarlama əmsalı üçün yaza bilərik:

$$q = \frac{p_{cix}}{p_g} = \frac{U_{cix.m}}{U_{g.m}} \quad (13.24)$$

Adətən, $x_c \ll R_y$ götürülür. Buna görə də hamarlama əmsalı üçün ifadəni aşağıdakı şəkildə yaza bilərik:

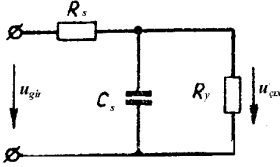
$$q = \frac{Z_{cix}}{Z_g} \approx \frac{x_{L_s} - x_s}{x_{C_s}} = \frac{\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s}}{\frac{1}{\omega C_s}} = \omega^2 L_s C_s - 1 \quad (13.25)$$

Hamarlama əmsalı (q) məlum olarsa, onda LC süzgəcinin parametrlərini

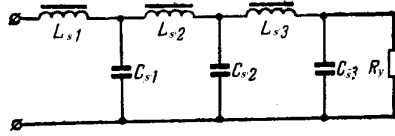
$$L_s C_s = \frac{q + 1}{\omega^2} \quad (13.26)$$

ifadəsinə görə hesablamaq olar. Praktiki hesabatlarda (L_s və C_s) parametrlərdən biri qabaqcadan verilir. Γ -şəkilli LC süzgəclərinin hamarlama əmsalı yüksək olduğundan onlardan dəyişən cərəyan düzləndirici quruluşlarında geniş istifadə olunur.

Bəzən LC süzgəcinin əvəzinə RC tipli süzgəcdən də istifadə olunur (şəkil 13.15). Bu süzgəclərdə L_s əvəzinə R_s qoşulur. Bu süzgəclərin hamaralama əmsalının qiyməti çox kiçikdir (şəkil 13.16).



Şəkil 13.15. Γ – şəkilli LC süzgəcinin sxemi



Şəkil 13.16. Çoxpilləli süzgəcin sxemi

Əgər yük müqavimətinə verilən düzləndirilmiş gərginlikdə döyülmə əmsalını minimuma çatdırmaq lazım gəlsə, onda bir neçə Γ -şəkilli süzgəclərdən təşkil olunmuş daha mürəkkəb süzgəclərdən istifadə edilir (şəkil 13.15).

13.5. Düzləndirici quruluşların xarici xarakteristikası

Düzləndirilmiş gərginliyin yük cərəyanından asılılığı $U_y = f(I_y)$ düzləndirici quruluşunun **xarici xarakteristikası** adlanır. Bu xarakteristika düzləndiricinin əsas xarakteristikalarından biridir.

Real transformatorun dolağı müəyyən r_{tr} , ventil isə r_v müqavimətinə malikdir. Yük cərəyanı artdıqda bu müqavimətlərdəki gərginlik düşgülləri də artır.

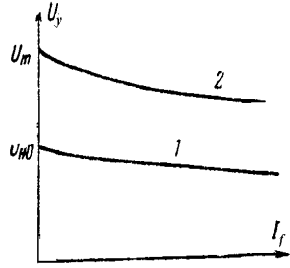
Məlumdur ki, gərginlik düşgüsünün artmağı bilavasitə r_{tr} və r_v müqavimətlərinin qiymətlərindən asılıdır. Ventilin müqaviməti isə onun cərəyanından da asılıdır. Odur ki, düzləndiricilərin xarici xarakteristikası qeyri-xətti alınır.

Hamarlayıcı süzgəclər olduqda düzləndiricinin xarici xarakteristikasının şəkli dəyişir.

Şəkil 13.17-dəki 2 əyrisi tutum süzgəcləri olan hala aiddir.

Yüksüz işləmə rejimində ($I_y=0$) süzgəc olan halda düzləndirilmiş gərginlik (2 – əyrisi) süzgəcinin olmadığı (1 – əyrisi) hala nisbətən böyük olur (şəkil 13.17, 1 və 2 əyriləri). Lakin yük artdıqda süzgəcli düzləndiricidə gərginlik daha sərt azalır. Buna səbəb transformator dolağının və ventilin müqavimətlərindəki gərginlik düşgüllərinin artmasından əlavə, $\tau = C_s R_y$

zaman sabitinin azalması nəticəsində kondensatorun daha sürətlə boşalmasıdır.



Şəkil 13.17. Düzləndirici quruluşun xarici xarakteristikaları
1 – süzgəcsiz; 2 – tutum süzgəcli

13.6. Düzləndirici quruluşlar aid sərbəst işlər

1. Bir yarımperiodlu düzləndiricinin sxemini çəkin və izah edin.
2. Orta nöqtəsi olan və körpü sxemli iki yarımperiodlu düzləndiricilərin müsbət və nöqsan cəhətlərini göstərin.
3. Üçfazlı dəyişən cərəyanın düzləndiricinin sxemini çəkin və izah edin.
4. Hamarlayıcı süzgəclərin vəzifəsini izah edin.
5. Hansı növ hamarlayıcı süzgəcləri tanıyırsınız? Onların sxemlərini çəkin.

Yarımkeçirici və vakuum triodlarının xüsusiyyətlərinin müqayisəsi

Tranzistor quruluşuna və elektrik xassələrinə görə vakuum trioduna uyğundur. Tranzistor və triod lampasının elektrodları arasında aşağıdakı oxşarlığı göstərmək olar.

Tranzistor	Emitter	Baza	Kollektor
Lampa	Katod	Tor	Anod

Bu qayda ilə tranzistor və lampa triodunun üç birləşmə ədədi vardır (Əlavədə tranzistor və lampa triodunun birləşmə sxemlərinin şəkilləri verilmişdir).

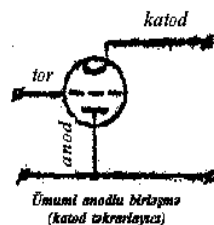
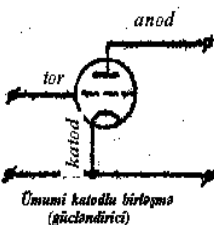
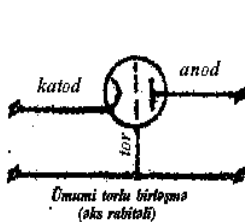
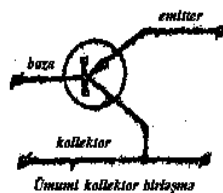
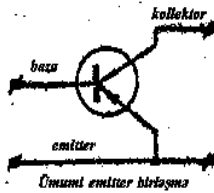
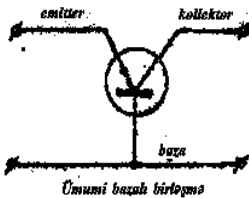
Tranzistorun üstün və çatışmayan cəhətlərinin elektrovakuum lampaları ilə müqayisəsi aşağıdakı cədvəldə göstərilmişdir. Burada cihazların ən yaxşı istismar parametrləri verilmişdir, lakin eyni tipli cihazda həmin parametrlər müxtəlif ola bilər.

Cədvəldən görünür ki, tranzistorların iş müddəti uzun zərbəyə qarşı dayanıqlığı yüksəkdir. Çatışmayan cəhəti xarakteristikalarının temperaturadan asılılığı və buraxıla bilən işçi temperaturunun (germanium üçün) kiçik olmasıdır.

Vakuum lampasının tranzistorla müqayisə etdikdə görünür ki, onlar sxem elementi kimi tamamilə lampaların funksiyasını yerinə yetirmirlər, lakin çox hallarda onları əvəz edə bilərlər.

Cədvəl

Elektrik xüsusiyyətləri (parametrləri)	Gücləndirmə			Sərhəd tezliyi, mHz	Çıxış- dakı güc, mW	Çıxışda- kı mak- simal güc, W
	U	I	P			
Tranzistor Vakuum lampası	10 ⁴ 10 ³	10 ² 10 ⁷	10 ⁵ 10 ⁸	2%10 ³ 10 ⁴	100 10	<100 10 ⁶
İstismar xüsusiyyətləri	T _{max} , °C		İş müddəti	Zərbəyə qarşı dayanıqlığı	İşə hazır olması, san	Ölçüləri, sm ⁸
Tranzistor Vakuum lampası	Ge:75 Si:150 100		>10 10 ⁴	30000 1000	10 ⁻⁴ Bir neçə saniyə	0,1 >1



ƏDƏBİYYAT

1. K.Quluzadə, M.Ağaməmmədov, N.Axundov, R.Babayev, C.Əsgərov. Elektrotexnika, elektrik avadanlığı və sənaye elektronika. Maarif nəşriyyatı, Bakı, 1977, 435 səh.

2. K.Quluzadə, C.Əsgərov, R.Babayev, N.Axundov, O.Hacıyev. Radiotexnika və elektronika. I hissə, Azərbaycan NKİ nəşri, 1979, 128 səh.

3. R.Z.Kazımzadə, C.S.Əsgərov. Elektrotexnika. Bakı, 2008, 345 səh.

4. C.S.Əsgərov, M.Ş.Ağaməmmədov, T.Ə.Əhmədova. Elektrotexnika və elektrik maşınları. Bakı, 2010, 437 səh.

5. Л.З.Бобровников. Радиотехника и электроника. Изд-во Недра, 1974, 269 стр.

MÜNDƏRİCAT

		Səh
1-ci fəsil	SABİT CƏRƏYAN ELEKTRİK DÖVRƏLƏRİ	3
	1.1. Sadə və mürəkkəb sabit cərəyan elektrik dövrələri	3
	1.2. Sadə və mürəkkəb sabit cərəyan dövrələrinə aid sərbəst işlər üçün məsələlərin həlli metodikası	26
	1.3. Sabit cərəyan elektrik dövrələrinə aid sərbəst işlər	42
2-ci fəsil	KONDENSATORLU ELEKTRİK DÖVRƏLƏRİ	44
	2.1. Dielektriklər	44
	2.2. Kondensatorlar	47
	2.3. Kondensatorlu elektrik dövrələrinə aid sərbəst işlər üçün məsələlərin həlli metodikası	52
	2.4. Kondensatorlu elektrik dövrələrinə aid sərbəst işlər	53
3-cü fəsil	ELEKTROMAQNİT HADİSƏLƏRİ. MAQNİT DÖVRƏLƏRİ	55
	3.1. Maqnit sahəsinin elektromexaniki təsiri və maqnit sahəsinə xarakterizə edən əsas kəmiyyətlər	55
	3.2. Maqnit sahəsinin induksion təsiri. Elektromaqnit induksiya qanunu	58
	3.3. Elektrik generatorunun və mühərrikinin iş prinsipi	60
	3.4. Maqnit dövrələri	62
	3.5. Ferromaqnit materiallar və onların xassələri.	65
	3.6. Budaqlanmayan maqnit dövrələrinin hesabı	66
	3.7. Budaqlanan maqnit dövrələrinin hesabı	69
	3.8. Özünəinduksiya	73
	3.9. Qarşılıqlı induksiya	76
	3.10. Maqnit dövrələri və elektromaqnit hadisələrinə aid sərbəst işlər üçün məsələlərin həlli metodikası	78
	3.11. Maqnit dövrələri və elektromaqnit hadisələrinə aid sərbəst işlər	85

DÖVRƏLƏRİ	86
4.1. Əsas anlayışlar	86
4.2. Bırfazlı dəyişən cərəyan elektrik dövrələri ...	99
4.3. İnduktiv sarğaclı sinusoidal cərəyan dövrəsi	100
4.4. Kondensatorlu sinusoidal cərəyan dövrəsi ...	103
4.5. Elementləri ardıcıl birləşdirilmiş sinusoidal cərəyan dövrəsi	106
4.6 Sinusoidal dəyişən cərəyan dövrəsinin gücü ..	109
4.7. Sinusoidal cərəyan dövrəsində elementlərin ardıcıl birləşdirilməsinin ümumi halı	111
4.8. Sinusoidal cərəyan dövrəsində elementlərin paralel birləşdirilməsi	113
4.9. Sinusoidal cərəyan dövrəsində elementlərin qarışıq birləşdirilməsi	115
4.10. Sinusoidal cərəyan dövrələrində rezonans hadisələri	117
4.11. Qurğunun güc əmsalının artırılması	123
4.12. İnduktiv rabitəli sinusoidal cərəyan dövrələri	124
4.13. Passiv xətti dördqütblülər haqqında anlayış	127
4.14. Fazfırladan quruluş	129
4.15. Bırfazlı dəyişən cərəyan elektrik dövələrinə aid sərbəst işlər üçün məsələlərin həlli metodikası	130
4.16. Bırfazlı dəyişən cərəyan elektrik dövrələrinə aid sərbəst işlər	148
4.17. Üçfazlı dəyişən cərəyan elektrik dövrələr	150
4.18. “Ulduz” sxemi üzrə birləşmə	152
4.19. “Üçbucaq” sxemi üzrə birləşmə	154
4.20. Üçfazlı şəbəkəyə bırfazlı və üçfazlı işlədicilərin qoşulma üsulları	156
4.21. Simmetrik yüklü üçməftilli dövrənin hesabı	157
4.22. Qeyri-simmetrik yüklü üsfazlı dövrənin hesabı	159
4.23. Üçfazlı dövrənin gücü	162
4.24. Üçfazlı dəyişən cərəyan dövrəsinə aid sərbəst işlər üçün məsələlərin həlli metodikası	164

4.25.	Üçfazlı dəyişən cərəyan elektrik dövrələrinə aid sərbəst işlər	171
4.26.	Qeyri-sinusoidal dəyişən cərəyan elektrik dövrələri	172
4.27.	Qeyri-sinusoidal kəmiyyətin təsiredici və orta qiymətləri	173
4.28.	Qeyri-sinusoidal cərəyan dövrələrinin analizi və hesabi	175
4.29.	Qeyri-sinusoidal dəyişən cərəyan dövrələrinə aid sərbəst işlər üçün məsələ həlli metodikası	178
4.30.	Qeyri-sinusoidal dəyişən cərəyan dövrələrinə aid sərbəst işlər	179
5-ci fəsil	XƏTTİ ELEKTRİK DÖVRƏLƏRİNDƏ KEÇİD PROSESLƏRİ	181
5.1.	Ümumi anlayışlar	181
5.2.	Tutumlu sadə dövrələrdə keçid prosesləri	183
5.3.	İnduktivli sadə dövrələrdə keçid prosesləri	186
5.4.	Kondensatorun induktivliyə və müqavimətə boşalması	191
5.5.	Xətti elektrik dövrələrində keçid proseslərinə aid sərbəst işlər	195
6-cı fəsil	TRANSFORMATORLAR	196
6.1.	Əsas anlayışlar	196
6.2.	Transformatorun yüksüz işləmə rejimi	197
6.3.	Transformatorun yüklü rejimi	200
6.4.	Üçfazlı transformatorlar	207
6.5.	Transformatorun parametrlərinin və faydalı iş əmsalının təyini	211
6.6.	Transformatorlara aid sərbəst işlər	214
7-ci fəsil	ASİNXRON MAŞINLAR	216
7.1.	Asinxron mühərrikin vəzifəsi və iş prinsipi	216
7.2.	Fırlanan maqnit sahəsinin alınması	218
7.3.	Asinxron mühərrikin quruluşu	221
7.4.	Asinxron mühərrikin yüksüz işləmə rejimi	222
7.5.	Asinxron mühərrikin dövrələrində gedən elektromaqnit proseslər	225
7.6.	Yüklü asinxron mühərrikin əvəz sxemi	229

7.7. Asinxron mühərrikin fırlandırıcı momenti və mexaniki xarakteristikası	231
7.8. Asinxron mühərrikin energetik göstəriciləri	239
7.9. Asinxron generator	241
7.10. Asinxron mikromühərriklər	242
7.11. Müxtəlif iş rejumləri üçün elektrik mühərrikinin gücünün seçilməsi	245
7.12. Asinxron maşınlar və müxtəlif iş rejumləri üçün elektrik mühərrikinin gücünün seçilməsinə aid məsələlərin həlli metodikası	249
7.13. Asinxron maşınlar və müxtəlif iş rejimlərinə uyğun mühərrikin gücünün seçilməsinə aid sərbəst işlər	255
8-ci fəsil	
SİQNALLAR NƏZƏRİYYƏSİNİN ELEMENTLƏRİ	257
8.1. Periodik siqnallar	257
8.2. Kvazi-periodik siqnallar	261
8.3. İmpuls siqnallar	262
8.4. Təsadüfi siqnallar	269
8.5. Siqnalların çevrilməsi	274
8.6. Siqnallar nəzəriyyəsinin elementlərinə sərbəst işlər	275
9-cu fəsil	
RADİOELEKTRON QURĞULARIN ÜMUMİLƏŞDİRİLMİŞ XARAKTERİSTİKALARI	277
9.1. Xətti qurğular	278
9.2. Xətti qurğularda siqnalların təhrifsiz çevrilməsi şərtləri	286
9.3. Qeyri-xətti qurğular	288
9.4. Parametrik qurğular	291
9.5. Radioelektron qurğularının ümumiləşdirilmiş xarakteristikalarına aid sərbəst işlər	293
10-cu fəsil	
YARIMKEÇİRİCİ CİHAZLAR	294
10.1. Yarımkeçiricilərin elektrik keçiriciliyi	294
10.2. Yarımkeçirici diod. Stablitrond	296
10.3. Yarımkeçirici triodlar	302
10.4. Sahə effektiv tranzistorlar	309
10.5. Tristorlar	313

	10.6. Mikromodullar və integral sxemləri.	314
	10.7. Fotomüqavimətlər	318
	10.8. Yarımkeçirici fotoelementlər	320
	10.9. Fototranzistorlar	321
	10.10. Tranzistorlarda gurultular	323
	10.11. Yarımkeçirici cihazların etibarlılığı	324
	10.12. Yarımkeçirici cihazlara aid sərbəst işlər	326
11-ci fəsil	ELEKTRİK RƏQSLƏRİNİN ELEKTRON GÜCLƏNDİRİCİLƏRİ	328
	11.1. Gücləndiricilərin təsir prinsipləri və təsnifatı	328
	11.2. Gücləndiricilərin əsas xarakteristikaları	330
	11.3. Reostat-tutum RL rəbitəli tranzistorlu gərginlik gücləndiriciləri	335
	11.4. Transformator rəbitəli tranzistorlu gərginlik gücləndiriciləri	338
	11.5. Güc gücləndiriciləri haqqında ümumi təsvir	340
	11.6. Əks rəbitəli gücləndiricilər	342
	11.7. Elektrik rəqslərinin elektron gücləndiricilərinə aid sərbəst işlər	346
12-ci fəsil	ELEKTRİK QÜVVƏLƏRİNİN ELEKTRON GENERATORLARI. İMPULS ÇEVİRİCİLƏRİ	347
	12.1. İmpulsların formalaşması	347
	12.2. Harmonik rəqslərin impuls formalaşdırma sxemi	348
	12.3. Diferensiallayıcı və integrallayıcı dövrələr	349
	12.4. Multivibratorlar	352
	12.5. Elektrik rəqslərinin elektron generatorları impuls çeviriciləri aid sərbəst işlər	353
13-cü fəsil	DÜZLƏNDİRİCİ QURULUŞLAR	354
	13.1. Bifazalı dəyişən cərəyanın biryarımperiodlu düzləndiricisi	355
	13.2. Bifazalı dəyişən cərəyanın ikiryarımperiodlu düzləndiricisi	357
	13.3. Üçfazlı dəyişən cərəyanın düzəldiriciləri	362

13.4. Hamarlayıcı süzgəclər	364
13.5. Düzləndirici quruluşların xarici xarakteristikaları	369
13.6. Düzləndirici quruluşlar aid sərbəst işlər.	370
ƏLAVƏ	371
ƏDƏBİYYAT	372

**KAZIMZADƏ RƏNA ZƏKİ QIZI,
ƏSGƏROV CAVİD SƏLİMXAN OĞLU,**

ELEKTROTEHNİKA, RADIOTEHNİKA VƏ ELEKTRONİKA

ali texniki məktəblər üçün dərslik

Yığılmağa verilib: 07.01.2013, Çapa imzalanıb: 28.01.2013,
Format: 60x84 1/16. Çap vərəqi: 23,5. çapı ofset üsulu ilə,
Kağız əla növ, Sayı: 200, Qiyməti müqavilə ilə

**ADNA-nın mətbəəsi
Bakı, Azadlıq pr.20**