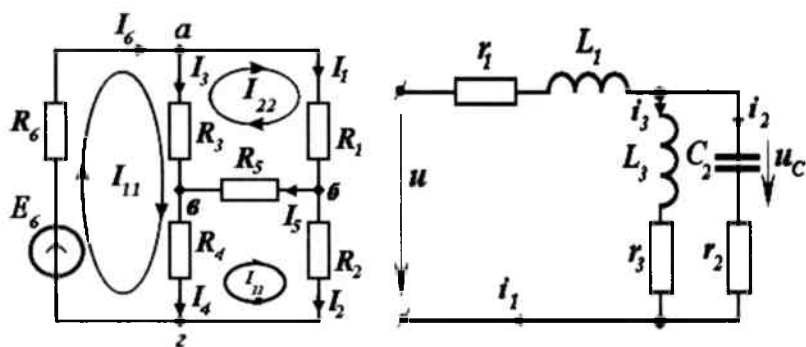


ELEKTR TEXNIKANING NAZARIY ASOSLARI



TOSHKENT

**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI**

ELEKTR TEXNIKANING NAZARIY ASOSLARI

1-qism

*O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi
tomonidan 5310200 – «Elektr energetikasi», 5310700 – «Elektr
texnikasi, elektr mexanikasi va elektr texnologiyalar» ta'lim
yo'nalishi talabalari uchun darslik sifatida tavsiya etilgan*

TOSHKENT – 2015

UO'K: 665.62 (075)
KBK 31.2ya7
E-45

E-45 Elektr texnikaning nazariy asoslari. 1-qism. – T.: «Fan va texnologiya», 2015, 320 bet.

ISBN 978–9943–990–72–2

«Elektr texnikaning nazariy asoslari» darsligining 1-qismida elektr zanjirlarining elementlari va asosiy tushunchalari, o'zgaras va o'zgaruvchan tok zanjirlarini tahlil qilishdagi asosiy qonunlar va hisoblash usullari hamda rezonans hodisalari, o'zaro induktivlik, uch fazali zanjirlar mavzulari batafsil yoritilgan. Darslik texnika oliy o'quv yurtlarining bakalavriatura, magistratura talabalari hamda katta ilmiy xodim-izlanuvchilar uchun mo'ljallangan, bundan ishlab chiqarish sohasining mutaxassislari, muhandislar, ilmiy texnik xodimlar ham foydalanishlari mumkin.

В первой части учебника «Теоретические основы электротехники» изложены основные понятия электрических цепей и элементов. подробно рассматриваются основные законы и методы расчета при анализе электрических цепей постоянного и переменного тока. явления резонанса, взаимная индуктивность, трехфазные цепи. Учебник предназначена для студентам бакалавриатуры, магистратуры и старшим научным исследователям, а также может быть полезным специалистам производства, инженерам, научно-техническим сотрудникам.

In the first part of the textbook «Theoretical bases electrical engineers» are stated the basic concepts of electric chains and elements, are in detail considered organic laws and calculation methods at the analysis of electric chains constant and an alternating current, the resonance phenomenon, mutual inductance, three-phase chains. The textbook it is intended for students bachelors, masters and we will pull down to scientific researchers; and also can be to useful experts of manufacture, engineers, scientifically - to technical employees.

UO'K: 665.62 (075)
KBK 31.2ya7

Mualliflar:

**K.ALIMXODJAYEV, B.ABDULLAYEV,
K.ABIDOV, M.IBADULLAYEV**

Taqrizchilar:

**F.A. Xoshimov – texnika fanlari doktori, professor;
A.M.Nazarov – texnika fanlari doktori, professor**

ISBN 978–9943–990–72–2

© «Fan va texnologiya» nashriyoti, 2015.

KIRISH

Elektr texnikaning nazariy asoslari (ENA) fanining rivojlanishi jamiyat hayotining barcha sohalariga jadal kirib borishi – elektr energiyasini ishlab chiqarish, uni uzoq masofalarga uzatish va ta'minlash, signallar turini ham qayta o'zgartirish muammolarini yechishga imkon berishi bilan izohlashi mumkin. Kompyuter texnologiyalarining juda katta tezlikda murakkab matematik amallarni va tenglamalarni yechishida, murakkab ishlab-chiqarish jarayonlarini avtomatik boshqarishda signallar, tasvir va axborotning boshqa har xil turlarini (telegraf, radio, televidenie va h.k.) qayta ishlash, uzatish jarayonlarida elektr signallardan foydalaniladi.

Hozirgi zamon elektr energetikasi, axborotni, signallarni uzatish, qayta ishlash tizimlari shunday murakkab texnik qurilmalar bo'lib, elektrotexnika nazariy asoslari, radiotexnika, elektronika va hisoblash texnikasining eng oxirgi ilmiy texnik yutuqlarini o'z ichida mujassamlantirgandir. Keyingi yillarda dunyoning bir qancha rivojlangan davlatlaridagi kabi, bizning davlatimizda ham, elektr energiyasini ishlab chiqarishning bir qancha usulari, uzoq va yaqin masofalarga uzatish, elektr energiyasini boshqa turdagi energiyalarga aylantirib, foydaliy ish bajarib, inson faoliyatining barcha sohalarida tadbiiq etish, raqamli avtomatik kommutatsiya stansiyalari, raqamli va tolali uzatish tizimlari, raqamli televideniye. sputnik aloqa tizimlari bilan jihozlangan har xil xarqaro telekommunikatsiya tarmoqlari ishlab chiqarishga joriy etilmoqda va ekspluatatsiya qilinmoqda.

XIX asr boshlarida magnetizm va elektr sohalaridagi bajarilgan ilmiy tadqiqotlar elektr va magnit hodisalarining muhim xususiyatlarini, ya'ni elektr zaryadlangan zarrachalarning harakati doimo magnit hodisalari bilan birgalikda sodir bo'lishini va ularning mutloq bog'liqligini ochib berdi. Bu bilan 1600-yilda Gilbert tomonidan ta'kidlangan elektr va magnit hodisalarining har biri mustaqil va o'zaro bog'liq bo'lmagan jarayonlar ekanligi haqidagi tushuncha mutlaqo noo'rin ekanligi isbotlandi. 1831-yilda Faradey

elektromagnit induksiyasi hodisasini ochishi magnit maydoni yoki tokli konturga nisbatan harakat qilayotgan boshqa konturda tok hosil bo'lishi mumkinligini aniqladi, elektr va magnit hodisalari o'zaro bog'liq va ajralmas jarayonlar ekanligi ko'rsatib berildi.

Barcha qilingan ihtirolar elektr va magnetizm hodisalari orasida chuqur bog'liqliklar mavjudligini ko'rsatadi. Elektromagnit hodisalar sohasiga taalluqli bo'lgan nazariy tushunchalarning umumiy majmuasida elektr va magnit zanjirlari nazariyasi ko'proq rivojlanishga erishmoqda. Elektrotexnikaning nazariy asoslarining poydevorida Om (1827-y), Joul (1841-y), Lens (1842-y) va Kirxgof (1847-y) asos solgan qonunlar yotadi. Uning keyingi rivojlanishida ko'pgina olimlar o'z hissalarini qo'shganlar.

Elektr texnikasi va elektr o'lchash texnikasi, sanoat korxonalarini elektr energiyasi bilan ta'minlash tizimlari, tezkor elektron hisoblash mashinalari, axborot texnologiyalari, avtomatik boshqaruv va nazorat tizimlarining mislsiz murakkablanishi va rivojlanishi natijasida ularning elektr zanjirlarini tahlil qilish uchun umumlashtirilgan uslublarni ishlab chiqish zaruriati tug'ilmoqda. Ular vositasida shu murakkab tizimlarning alohida qismlari bo'lgan va ma'lum vazifani bajaruvchi elektr zanjirlarining bir qancha elementlari o'zlarining umumlashtirilgan parametrlari orqali qoraladi. Zanjirning bunday elementlari kompleksi tarkibiga, masalan, simli aloqa tizimlaridagi, radio-, teleuzatishlardagi, elektr o'lchashlar, avtomatik boshqarish va nazoratidagi signallar generatorlari, kuchaytirgichlari, energiya manbalari, kompyuter texnologiyalaridagi mantiqiy vazifalarni bajaruvchi bloklari, diskret raqamli o'zgartkichlari va h.k. kirishi mumkin.

Murakkab tizimlarni tahlil qilishning umumlashtirilgan usullari tizimning bir qismi bo'lgan ushbu alohida komplekslarning o'zaro ta'sirini tadqiqot qilish imkonini beradi. Bunday umumlashtirilgan uslublarni qurishning boshlang'ich asoslari sifatida, nisbatan murakkab bo'lmagan elektr zanjirlarini hisoblashda qo'llanilgan, elektrotexnika nazariy asoslarining fizik qonuniyatlari ishlatiladi.

Shuningdek, kosmik radioaloqa va radioastronomiya hamda yangi elektrofizik va elektrotexnologik qurilmalarda elektr, magnit maydonlarini va elektromagnit nurlanishlarini yanada tezkorlik bilan va keng qo'llanilishi natijasida elektromagnit maydonlari va

elektr zanjirlar nazariyalarining kelgusidagi yanada rivojlanishi kutilmoqda.

Bayon qilingan fikrlar hamma vaqt, ayniqsa, hozirgi kunda oliy elektrotexnik ta'limning nihoyatda yuqori ilmiy darajada tashkil etilishi zaruriyatini taqozo etadi. Bu yo'nalishda XX asrda O'FAning akademigi G'ofur Rahimovich Rahlmov asos solgan va hozirgi kunda uning shogirdlari va davomchilari tomonidan rivojlantirilayotgan «Elektr texnikaning nazariy asoslari» (ENA) fanining o'qitilishi katta ahamiyatlidir.

Darslik bakalavriatura yo'nalishlari, magistratura talabalari va «Elekt texnikaning nazariy asoslari» sohasida ilmiy tadqiqotlar olib borayotgan katta ilmiy-xodim izlanuvchilar uchun mo'ljallangan, undan ishlab chiqrish sohalarining mutaxassislari, muhandislar, ilmiy texnik xodimlar ham foydalanishlari mumkin.

ASOSIY BELGILAR

- α - kuchsizlanish, ishchi kuchsizlanish
- b - kompleks o'tkazuvchanlikning reaktiv tashkil etuvchisi
- C - sig'im
- E - o'zgarmas elektr yurituvchi kuch (EYK), garmonik EYK ning ta'sir etuvchi (effektiv) qiymati
- $\dot{E}$ - kompleks EYK
- E_m - garmonik eyuk amplitudasi
- $\dot{E}_m$ - garmonik eyukning kompleks amplitudasi
- f - tebranish chastotasi
- G - rezistiv o'tkazuvchanlik
- g - kompleks o'tkazuvchanlikning aktiv tashkil etuvchisi
- $g(t)$ - zanjirning impuls tavsifi
- $\dot{H}, H(j\omega)$ - kompleks uzatish funksiyasi
- $H(p)$ - operator uzatish funksiyasi
- $i, i(t)$ - tokning oniy qiymati
- I - tokning ta'sir etuvchi (effektiv) qiymati, o'zgarmas tok qiymati
- $\dot{I}$ - kompleks tok
- I_m - garmonik tokning amplitudasi
- $\dot{I}_m$ - tokning kompleks amplitudasi
- $j = \sqrt{-1}$ mavxum son
- k - kuchaytirish koeffitsiyenti
- $h(t)$ - zanjirning o'tkinchi tavsifi
- L - induktivlik
- l - liniya simini va boshqa miqdorlarning uzunligi
- M - o'zaro induktivlik koeffitsiyenti
- P - aktiv (o'rtacha) quvvat
- p - oniy quvvat, operator belgisi
- Q - asillik, reaktiv quvvat
- q - zaryad miqdori
- R - Omik (rezistiv) qarshilik

- r - aktiv qarshilik
- T - tebranish davri
- t - vaqtning oniy qiymati
- U - kuchlanishning ta'sir etuvchi qiymati
- $\dot{U}$ - kompleks kuchlanish
- U_m - garmonik kuchlanish amplitudasi
- $u, u(t)$ - kuchlanishning oniy qiymatlari
- x - qarshilikning reaktiv tashkil etuvchisi
- $Y(p)$ - ikki qutblikning operator o'tkazuvchanligi
- $\underline{Y}$ - ikki qutblikning kompleks o'tkazuvchanligi
- $Z(p)$ - ikki qutblikning operator qarshiligi
- $\underline{Z}$ - ikki qutblikning kompleks qarshiligi
- z - ikki qutblik kompleks qarshiligining moduli
- φ - ikki qutblik kompleks qarshiligining argumenti
- β - faza koeffitsiyenti
- γ - liniya tarqalish koeffitsiyenti, solishtirma o'tkazuvchanlik
- $\varphi(\omega)$ - faza-chastotaviy tavsif
- ρ - solishtirma qarshilik, liniya to'liq qarshiligi
- τ - yagona reaktiv elementli zanjirning vaqt doimiysi
- ψ - garmonik tebranishning boshlang'ich fazasi
- F - magnit oqimi
- φ - fazalar siljishi
- φ_B - liniya to'liq qarshiligining argumenti
- φ_Y - ikkiqutblik kompleks o'tkazuvchanligi argumenti
- φ_Z - ikkiqutblik kompleks qarshiligi argumenti
- ω - doiraviy (davriy) chastota

1. ELEKTR VA MAGNIT MAYDON XUSUSIYATLARI, TOK VA KUCHLANISHLAR TAVSIFLARI

1.1. Zaryadlangan zarrachalar va elektromagnit maydon, elektr maydonining o'tkazgichdagi tok bilan bog'liqligi

Elektromagnit hodisalari sohasidagi tadqiqotlar modda tuzilishi haqidagi hozirgi zamon tasavvurini hosil qilish uchun asosiy g'oya va vositalarni berdi. Ushbu tadqiqotlarda asosiy va muhim o'rinni zaryadlangan elementar zarrachalar – musbat elementar zaryadli (masalan, proton va pozitron) va manfiy elementar zaryadli (masalan, elektron) zarrachalar tashkil etadi. Zaryadlangan elementar zarrachalar moddaning atomlari va molekulalari tarkibiga kirishi, shuningdek, erkin holatda bo'lishi mumkin. Ular uzluksiz harakatda bo'lib, shu harakatning xarakteriga ko'ra elektr maydoni yoki magnit maydoni (elektromagnit maydoni) sifatida bo'lishi mumkin. Elektr zaryadiga ega bo'lgan zarrachalar va ularning elektromagnit maydonlari materiyaning alohida turini tashkil etadi. Chunki materiya harakatining boshqa shakllarida, masalan, mexanik harakat shaklida e'tiborga olinmagan xususiyatlar, elektr zaryadli zarrachalarda mavjud.

Bunday zarrachalarning elektr zaryadi ularning muhim fizik xususiyatidir. Bu xususiyat zarracha va uning elektromagnit maydoni orasidagi o'zaro bog'liqlikni hamda tashqi elektromagnit maydon bilan o'zaro ta'sirini xarakterlaydi. Elektr zaryadlari – shu materiya zarrachalarining asosiy farqlantiruvchi xususiyatlaridir, ular yana materiyaning boshqa, masalan, mexanikada o'rganiladigan harakatning shakllariga xos bo'lgan xususiyatlarga ham ega: massa, energiya va h.k.

Mexanika fanida moddiy jismning harakatini massa, uzunlik va vaqt orqali ifodalansa, elektromagnit hodisalarini tasvirlashda, elektromagnit hodisalarining mohiyatini ifodalovchi to'rtinchi asosiy qiymatni kiritish zarur. Bu qiymat ixtiyoriy elektromagnit

miqdor, masalan, zaryadning qiymati bo'lishi mumkin. Qiymat jihatdan materiya yoki jism zarrachasining elektr zaryadi faqat boshqa elektr zaryadlangan zarracha yoki boshqa zaryadlangan jism bilan yoki ularning tashqi elektr maydoni bilan o'zaro ta'siri orqali aniqlanishi mumkin.

Shunga o'xshash, elektromagnit maydoni tushunchasini aniqlashda zaryadlangan zarracha tushunchasini ishiatmasdan ham biror natijaga erishib bo'lmaydi. Chunki boshqa turdagi materialarga nisbatan elektromagnit maydonining farqli xususiyati - uning zaryadlangan zarrachalarga bo'lgan ta'siridir. Elektromagnit maydonining zaryadlangan zarrachalarga bo'lgan kuch ta'siri vektor xarakteriga ega va zarrachaning harakat tezligiga va ular elektr zaryadlari miqdoriga bog'liq. Yuqorida keltirilgan fikrlar asosida quyidagi ta'riflarni keltirish mumkin.

***Elektromagnit maydon** deb zaryadlangan zarrachalarga ularning tezligi va qiymatiga bog'liq ravishda kuch ta'sirini o'tkazadigan, uning barcha nuqtalarida «elektr maydoni» va «magnit maydoni» deb nomlangan ikki tomonini xarakterlovchi ikki vektor qiymatlari bilan aniqlanadigan materiyaning turiga aytiladi. **Elementar elektr zaryadi** deb elektron yoki protonning shunday xususiyatiga aytiladiki, unda xususiy elektr maydoni va tashqi elektr maydoni bilan ularning o'zaro ta'sirini son qiymati jihatidan absolyut miqdorga teng, ishorasi teskari (hunda elektronga shartli ravishda manfiy ishora, protonga – musbat ishora beriladi) bo'lgandagi xususiyatini aniqlaydi.*

Ushbu ta'riflar asosida bir yoki birnecha elementar elektr zaryadlaridan iborat bo'lgan ixtiyoriy zaryadlangan zarracha – zaryad tashuvchi bo'ladi. Masalan, elektron, proton, ion, shuningdek, yarim o'tkazgichlardagi shartli «teshik» zaryad tashuvchi hisoblanadi.

Aslida, zaryadlangan elementar zarrachalar va ularning elektromagnit maydonlari bir butundir. Ikkinchi tomondan, elektr zaryadlangan zarracha va uning elektromagnit maydoni orasidagi aniq chegarani ko'rsatib bo'lmaydi. Shu bilan birga, shunday faraz qilish mumkin-ki, zarracha va uning elektr zaryadi, masalan, elektron, proton va h.k. zaryadi, fazoning juda kichik sohasida mujassamlangan. Fazoning aynan shu juda kichik sohasi uchun

materiyaning shunday harakat shakli xarakterliki, u bilan elektr zaryadlangan zarracha tushunchasi bog'langan bo'ladi. Moddaning zarrachalari bilan bog'lanmagan erkin holatidagi elektromagnit maydoni juda kuchli gravitatsiya maydonlari mavjud bo'lmagan vaziyatda bo'shliqda $s=2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ tezlikda tarqaladi.

Elektromagnit qiymatlar uchun xalqaro birliklar tizimidan (XT yoki SI) foydalaniladi. Bu tizim yetti asosiy birliklardan tashkil topgan: *metr* – uzunlik birligi, *kilogramm* – massa birligi, *sekund* – vaqt birligi, *amper* – elektr toki kuchi birligi, *kelvin* – termodinamik harorat birligi, *mol* – modda miqdori birligi, *kandela* – yorug'lik kuchi birligi.

Elektromagnit qiymatlarni hisoblash uchun, yuqorida keltirilganlardan to'rtta (*metr*, *kilogramm*, *sekund*, *amper*) asosiy birliklarni olish zarur va kifoyadir. Qolgan elektromagnit qiymatlar, ularga mos ravishda, ularning birliklari olingan to'rtta asosiy birliklardan kelib chiqadi, ya'ni u yoki bu qonuniyatlar asosida aniqlanishi mumkin. XT birliklar tizimida elektromagnit qiymat uchun to'rtinchi asosiy birlik sifatida *elektr toki kuchining birligi* – *Amper* qabul qilingan.

Birlik tizimi MKSA (*metr*, *kilogramm*, *sekund*, *amper*) XT tizimining bo'lagidir. MKSA birlik tizimi elektromagnit maydoni rasional tizimi tenglamalari bilan bog'langan bo'lib, unda 4π ko'paytma tenglamalarda tushunishga oson bo'lgan holatlarda uchraydi, ya'ni sferik simmetriyalar bilan xarakterlanuvchi bog'lanishlar tarkibiga kiradi.

Elektr zaryadining birligi (elektr miqdori) *Kulondir*(Kl).

Har qanday umumlashtirilgan elektromagnit hodisasi ikki tomonlama xarakterlanadi – elektr hodisasi va magnit hodisasi hamda ular orasida uzviy aloqa mavjudligidir. Xususan, elektromagnit maydoni ikki o'zaro bog'langan maydonlardan iborat – *elektr maydoni* va *magnit maydoni*.

Elektr maydoni – elektr zaryadlari va o'zgarayotgan magnit maydoni yordamida hosil bo'ladi. Magnit maydoni esa harakatlanayotgan zaryadlangan zarrachalar va o'zgarayotgan elektr maydoni yordamida hosil bo'ladi.

Elektr maydoni deb, elektr zaryadlangan zarrachaga bo'lgan ta'siri zarrachaning zaryadiga proporsional va uning tezligiga bog'liq bo'lmagan kuch bilan xarakterlanadigan elektromagnit maydonining ikki holatlaridan biriga aytiladi.

Elektr maydoni fazoda uzluksiz taqsimlanganligi sababli, fazoning har bir nuqtasida va vaqtning har bir onida zaryadlangan sinov jism ma'lum qiymatga ega va ma'lum yo'nalishda bo'lgan mexanik kuch ta'sirida bo'ladi. Bu ikki elementar elektr zaryadi orasidagi hosil bo'ladigan kuchni aniqlovchi Kulon qonunidan aniqlanadi. **Kulon qonuni deb ikki qo'zg'almas elementar elektr zaryadi orasidagi o'zaro ta'sir etuvchi kuchning miqdori, zaryadlar miqdorlari ko'paytmasiga to'g'ri va ular orasidagi masofaga teskari proporsionaldir.**

Bundan foydalanib, elektr maydonini uning har bir nuqtasida xarakterlovchi *elektr maydonining kuchlanganligi* deb nomlangan asosiy fizik qiymatning ta'rifini aniqlash mumkin.

Elektr maydoni kuchlanganligi deb elektr maydonini xarakterlovchi va elektr maydoni tomonidan zaryadlangan zarrachaga ta'sir etayotgan kuchni xarakterlovchi vektor qiymatga aytiladi.

(Quyida uchraydigan barcha vektor qiymatlarni ifodalovchi harflar quyuq shrift bilan belgilanadi).

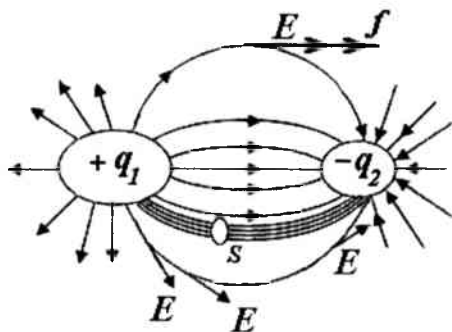
Yo'nalishi bo'yicha musbat zaryadli sinov jismga ta'sir etuvchi mexanik kuch f bilan mos keluvchi elektr maydon kuchlanganligi E quyidagicha ifodalanadi:

$$E = \frac{f}{q_0}$$

O'rganilayotgan maydon taqsimlanishiga q_0 zaryadning ta'sirini butkul yo'qotish uchun q_0 ning qiymati nolga intilishi zarur. Shu sababli, elektr maydoni kuchlanganligi uchun quyidagi aniqroq bo'lgan ta'rifni keltirish mumkin: ***elektr maydoni kuchlanganligi deb, elektr maydonining ko'rilayotgan nuqtasiga kiritilgan zaryadlangan qo'zg'olmas nuqtaviy jismga ta'sir etayotgan kuch miqdorini shu zaryad nolga intilgandagi miqdoriga nisbatining, nuqtaviy jismga ta'sir etayotgan musbat kuch yo'nalishi bilan mos bo'lgan vektor miqdoriga aytiladi.***

$$E = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{f}{q_0}$$

Elektr maydonining barcha nuqtalaridagi kuchlanganlikni aniqlab, shunday chiziqlarni o'tkazish mumkinki, bu chiziqlarning har qanday nuqtalaridan o'tkazilgan urinmalar yo'nalishi maydon kuchlanganligi yo'nalishi bilan mos bo'lsin (1.1-rasm). Bu chiziqlar *elektr maydoni kuchlanganlik chiziqlari* deyiladi. Chizmalarda ularni Ye vektorining yo'nalishini ko'rsatuvchi strelkalar bilan keltiriladi. Bunday chiziqlar majmuasi elektr maydoni tasvirini ifodalaydi.



1.1-rasm. Qarama-qarshi zaryadli ikki jism yaqinidagi elektrostatik maydon.

Biror yuzani cheklaydigan berk konturni faraz qilib, shu konturning barcha nuqtalaridan elektr maydoni kuchlanganlik chiziqlarini o'tkazamiz. Bunday chiziqlar majmuasi naysimon yuzani hosil qiladi. Shunday naysimon yuza bilan cheklangan elektr maydoni sohasi *maydon kuchlanganligi naychasi* deyiladi.

1.1-rasmda miqdorlari teng va qarama-qarshi zaryadli ikki jism yaqinidagi elektrostatik maydon tasviri keltirilgan. Rasmda s yuza bilan cheklanuvchi va maydon kuchlanganligi naychasini hosil qiluvchi kontur nuqtalari orqali o'tayotgan maydon kuchlanganligining bir necha chiziqlari ham ko'rsatilgan.

Yuqorida bayon qilingan fikrlarga ko'ra q zaryadli ixtiyoriy qo'zg'almas tuqtaviy jism elektrostatik maydonda

$$f_l = q \cdot E$$

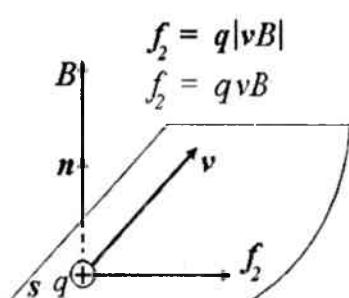
kuch ta'sirida bo'ladi.

Bu kuch, yuqorida keltirilgan ta'rifga ko'ra, elektrostatik maydon vujudga keladi.

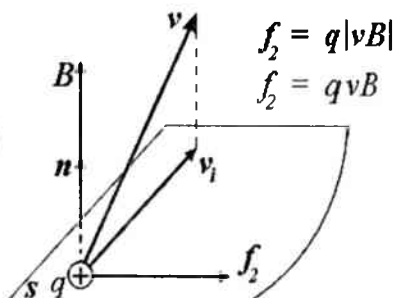
Agar harakatlanayotgan zaryadlangan zarrachaga ta'sir etayotgan kuch harakat tezligiga ham bog'liq bo'lsa, bu hodisa shuni anglatadiki, zarrachaga elektr maydoni kuchi ta'siridan tashqari, magnit maydoni mavjudligi sababli hosil bo'layotgan qo'shimcha f_2 kuch ham ta'sir etar ekan.

Shunga ko'ra, *magnit maydoni* deb harakatlanayotgan zaryadlangan zarrachaga uning zaryadi va tezligiga proporsional bo'lgan kuch ta'siri bilan xarakterlanuvchi elektromagnit maydonning ikki tomonlaridan biriga aytiladi.

Bundan shu ma'lum bo'ladiki, magnit maydoni faqat harakatlanayotgan zaryadlangan zarracha va jismlarga ta'sir etadi.



1.2-rasm. $\mathbf{p}$ ga perpendikulyar bo'lgan s tekislik.



1.3-rasm. $\mathbf{v}$ vektorining shu tekislikka proektsiyasi.

Qo'shimcha kuch f_2 ning qiymati harakatlanuvchi q zaryad qiymatiga proporsional bo'lib va uning yo'nalishi tezligi vektori $\mathbf{v}$ yo'nalishiga bog'liq. Magnit maydonining har bir nuqtasida vaqtning har onida shunday yo'nalish (uni birlik vektori $\mathbf{p}$ bilan belgilaymiz) mavjudki, vektor $\mathbf{v}$ vektor $\mathbf{p}$ ga perpendikulyar bo'lganda f_2 kuch eng katta qiymatiga erishadi (1.2-rasm), ya'ni $\mathbf{p}$ ga perpendikulyar bo'lgan s tekislikda yotadi. Tezlik $\mathbf{v}$ vektorining barcha boshqa yo'nalishlarida f_2 kuch kichik - u $\mathbf{v}$ vektorning shu tekislikka proektsiyasi $\mathbf{v}_1$ ga (1.3-rasm) proporsional bo'ladi. Tezlik vektori $\mathbf{f}_2$ ushbu yo'nalishga perpendikulyar, ya'ni $\mathbf{p}$ vektoriga va, yuqorida aytilganidek, $\mathbf{v}$ vektoriga perpendikulyar.

Magnit maydonining har bir nuqtasida uni tavsiflovchi asosiy fizik qiymat - *magnit induksiyasidir*. U vektor qiymat bo'lib, p yo'nalishi (1.2 va 1.3-rasm) bilan mos keluvchi yo'nallishli V vektor bilan belgilanadi. Kuch f_2 magnit induksiyasi qiymatiga proporsional. Ularni ifodalovchi

$$f_2 = q \cdot |vE|$$

mavjud, bunda $|vE|$ - vektorlar v va E ning vektor ko'paytmalaridir.

Elektr maydoni va o'tkazgichdagi tok bog'liqligi. O'tkazgich orqali tok o'tganda, uning atrofida magnit maydon hosil bo'ladi. Magnit maydon to'yinmagan holatda uning miqdori tok miqdoriga proporsional bo'ladi:

$$F = L \cdot i.$$

Bundan quyidagi xulosa kelib chiqadi:

o'tkazgichdan tok oqishida uning atrofida albatta magnit maydoni mavjud bo'ladi va aksincha, o'tkazgich atrofida magnit maydoni mavjud bo'lsa, albatta magnit maydonni hosil qilgan shu o'tkazgichda tok mavjud bo'ladi.

1.2. O'tkazuvchanlik, ko'chirish va siljish toklari, tokning uzluksizligi

Erkin zaryadlarning yo'naltirilgan harakat jarayoni va /yoki/ magnit maydoni mavjudligida elektr siljishi vektorining vaqt bo'yicha o'zgarishi, *to'la elektr toki* deyiladi.

«Elektr toki» atamasi na faqat hodisani tavsiflash uchun, balki shu hodisaning jadalligini aniqlash uchun ham «elektr toki kuchi» atamasining sinonimi sifatida ishlatiladi.

«Elektr toki» atamasini ikki xil ta'riflashga barham berish uchun «Elektr» atamasini faqat hodisani ifodalash uchun ishlatiladi.

To'la elektr tokini quyidagi asosiy turlarga ajratish qabul qilingan: o'tkazuvchanlik toki, ko'chirish toki va siljish toki.

O'tkazuvchanlik elektr toki, *biror V hajmda $\sum q_i v_i \neq 0$ bo'lgandagi elektr zaryadi erkin tashuvchilarining yo'naltirilgan harakati hodisasidir.* Bunda, q_i va v_i - jism V hajmining N erkin zaryadlar to'plamiga kiruvchi i -zaryadining qiymati va harakat tezligi.

Ba'zi moddalar elektr o'tkazuvchanlik, deb nomlangan, vaqt bo'yicha o'zgarmaydigan elektr maydon ta'sirida vaqt bo'yicha o'zgarmaydigan tok o'tkazish xususiyatiga ega bo'ladilar. Demak, bunday xususiyatga ega bo'lgan moddalar o'tkazgichlar yoki o'tkazgich moddalari, deb nomlanganlar. Ular uchun asosiy elektrik xususiyat - elektr o'tkazuvchanlikdir. Bir qator moddalar mavjudki, ular uchun elektr o'tkazuvchanlikning tashqi omillarga (masalan, harorat, yorug'lik, elektr va magnit maydonlar va h.k.) bog'liqligi xarakterlidir.

O'tkazuvchanlik toki miqdori biror yuza s orqali vaqt birligida o'tayotgan zaryad miqdori q bilan o'lchanadi. Vaqtning ixtiyoriy onida o'tkazuvchanlik toki ko'rilyotgan s yuzadan zaryad tashuvchilar bilan ko'chirilyotgan elektr zaryadining vaqt bo'yicha hosilasiga teng, ya'ni

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

Elektr toki skalyar qiymatdir. Yuza s ning har xil elementlarida zaryadlangan zarrachalarning harakatlanish yo'nalishiari har xil bo'lishi mumkin. Biroq, ko'rilyotgan yuzaning juda kichik elementi Δs ning barcha nuqtalarida zaryadlangan zarrachalar yo'nalishi bir xil deb hisoblash mumkin. Bu holat Δs miqdorning kamayishi bilan, ya'ni $\Delta s \rightarrow 0$, yanada qat'iylashadi. Shu sababli, tekshirish jarayoniga vektor qiymat kiritiladi - zaryadlangan zarrachalar harakati yo'nalishiga normal bo'lgan Δs yuza elementi orqali oqayotgan Δi tokning shu element nolga intilyotgandagi nisbatining limitiga, yo'nalishi zarrachalar musbat yo'nalishi bilan mos kelgan yoki, mos ravishda, manfiy zaryadlangan zarrachalar yo'nalishi bilan mos kelmagan

$$J = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta i}{\Delta s} = \frac{di}{ds}.$$

Agar J vektori yuzaga musbat normal bilan β burchak hosil qilsa, u holda quyidagi ifoda mavjud bo'ladi:

$$di = J \cos \beta ds = J ds.$$

Tok chekli o'lchovlardagi s yuzadan o'tganligi uchun

$$i = \int_S J \cos \beta ds = \int_S J ds.$$

Faqat yuzaning barcha nuqtalarida tok zichligining qiymatlari bir xil bo'lib, shu yuzaga normal bilan bir xil burchak hosil qilgandagina quyidagini yozish mumkin:

$$i = J \cos \beta \int_S ds = J \cos \beta s.$$

Tok birligi sifatida *Amper (A)* va tok zichligi birligi sifatida *Amper bo'lingan kvadrat metr (A/m²)* ishlatiladi.

O'tkazgichlardagi o'tkazuvchanlik tokining boshqa turdagi toklardan farqi shundaki, o'tkazgich harorati o'zgarmas bo'lganda o'tkazuvchanlik toki zichligi elektr maydoni kuchlanganligiga proporsional bo'ladi. Bunda izotrop muhitda tok zichligi vektori J yo'nalishi elektr maydoni kuchlanganligi E vektori bilan mos bo'ladi va tok chiziqlari elektr maydoni kuchlanganligi chiziqlari bilan mos bo'ladi. Shu sababli o'tkazuvchanlik toki zichligi uchun o'tkazgich muhitida quyidagini yozish mumkin:

$$J = \gamma E.$$

Bunda γ kattalik *moddaning solishtirma o'tkazuvchanligi* deyiladi.

Unga teskari bo'lgan qiymat $\rho = 1/\gamma$ *moddaning solishtirma elektr qarshiligi* deyiladi.

Demak, elektr maydon kuchlanganligi va tok zichligi orasidagi bog'lanishni quyidagicha yozish mumkin:

$$E = \rho J.$$

Solishtirma qarshilikning birligi *Om·metr (Ω·m)*. Darhaqiqat, $\rho = E/J$ bog'lanishdan, uning birligi uchun $1 \frac{V}{m} \cdot \frac{m^2}{A} = 1 \frac{V \cdot m}{A} = 1 \Omega \cdot m$ chunki $1 V/A = 1 \Omega$ qarshilik birligidir. Shuningdek, solishtirma o'tkazuvchanlikning birligi *Simensni metrga nisbati (Sm/m)* bo'ladi.

O'tkazuvchi moddalarni biror qiymat γ (yoki ρ) bilan tavsiflash imkoniyati shuning natijasida paydo bo'ldiki, o'tkazuvchi moddalarda berilgan haroratda zaryadlangan zarrachalarning o'rtacha tezligi, demak, tok zichligi o'zgarmas magnit maydonida o'zgarmas bo'lib qoladi, chunki bu zarrachalar elektr maydonida tezlanishidan hosil bo'lgan kinetik energiya modda atomlariga uzatiladi va issiqlik harakatiga aylanadi.

Metallarda elektr toki o'tkazuvchanligi elektronlarning harakatini tasvirlaydi. Metallardan tashqari, o'tkazuvchi moddalarga ko'mir va elektrolitlar ham kiradi. Elektrolitlarda o'tkazuvchanlik musbat va manfiy ionlar bilan amalga oshiriladi.

O'tkazuvchi moddalarda solishtirma o'tkazuvchanlik γ va, demak, solishtirma qarshilik ρ modda haroratiga bog'liq.

Ko'chirish elektr toki deganda elektr zaryadlarini erkin fazoda harakatlanayotgan zaryadlangan zarrachalar yoki jismlar bilan ko'chirish hodisasi tushuniladi. Ko'chirish toki o'tkazgichlardagi o'tkazuvchanlik tokidan shu bilan farqlanadiki, uning zichligini $J = \gamma E$ bog'lanish bilan ifodalab bo'lmaydi, undagi solishtirma o'tkazuvchanlik γ tok o'tkazuvchi muhitni xarakterlovchi kattalik. Elektr zaryadli zarrachalar yoki jismlarning elektr maydonida erkin harakatida ularning tezliklari E maydon kuchlanganligiga proporsional emas. Darhaqiqat, elektr maydonida q zaryadli zarrachaga ta'sir etayotgan kuch qE ga teng. Bunday zarrachaning tezlanishi maydon kuchlanganligiga proporsional. Demak, uning erkin fazodagi harakati tekis tezlanuvchan bo'ladi, chunki muhitning qarshiligi bo'lmaydi.

Ko'chirish elektr tokining muhim turlaridan biri – zaryadga ega bo'lgan elementar zarrachaning bo'shliqdagi harakatidir. Ko'chirish elektr tokining yana bir turi – gazdagi elektr tokidir. Ko'chirish toki zichligini v tezlikda harakatlanayotgan zarrachalar o'rtacha hajm zaryadi ρ bilan ifodalaymiz. Shu maqsadda fazoda hajmi $dl \cdot ds$ bo'lgan to'g'ri burchakli paralelepiped ajratamiz. Uning dl qirrasi tezlik vektoriga parallel bo'lsin. Paralelepiped ichidagi zaryad $dq = \rho \cdot dl \cdot ds$. Shu zaryadning barchasi ds yuzadan shunday dt vaqt oralig'ida o'tadiki, bu vaqt oralig'ida zaryadlangan elementar zarrachalar dl masofani o'tsin. Bu vaqt oralig'i $dl = v dt$ sharti orqali aniqlanadi. Demak, ds yuza orqali oqayotgan tok $di = dq/dt = \rho v ds$, va tok zichligi quyidagicha bo'ladi: $J = di / ds = \rho v$. Manfiy zaryadli zarrachalar harakatida ($q < 0$), tokning shartli musbat yo'nalishi harakat yo'nalishiga qarama-qarshi bo'ladi, va J bilan v orasida $J = -\rho v$ bog'lanish mavjud bo'ladi. Ikkala ifoda ρ ning ixtiyoriy ishorasida quyidagi vektor shaklida birlashtiriladi:

$$J = \rho v.$$

Agar, $\rho > 0$ bo'lsa J va v vektorlar yo'nalishlari mos bo'ladi. Agar, $\rho < 0$ bo'lsa, ular qarama-qarshi yo'nalishda bo'ladi.

Agar bir vaqtning o'zida zaryadlarning ρ_+ hajm zichligi, v_+ tezlikda musbat zaryadlangan zarrachalar harakati va zaryadlarning ρ_- hajm zichligi, v_- tezlikda manfiy zaryadlangan zarrachalar harakati mavjud bo'lsa, u holda ko'chirish toki zichligi

$$J_{ko'ch} = \rho_+ v_+ + \rho_- v_-.$$

Siljish elektr tokini dielektrlarda o'zgaruvchan elektr maydoni mavjud bo'lganda e'tiborga olish zarur bo'ladi.

Asosiy elektr hususiyati - elektr maydoni ta'sirida qutblanish (polarizatsiya) qobiliyatiga ega bo'lgan modda dielektrik deyiladi.

Dielektriklar maxsus turlari mavjud bo'lib, ular segnetoelektrik deb nomlanadi. Segnetoelektrlarda χ koeffitsiyentining qiymati maydon kuchlanganligiga kuchli bog'liqlikda bo'lib, maydon kuchlanganligi va haroratning ba'zi qiymatlarida juda katta miqdorlarga erishishi mumkin. Koeffitsiyent χ moddaning *absolyut dielektrik ta'sirchanligi* deyiladi.

Dielektrikning qutblanish jarayonini maydon ta'siridagi musbat va manfiy zaryadlangan zarrachalarning siljishi bilan tushuntirish mumkin. Agar, q – dipolning musbat zaryadi va N_1 – birluk hajmdagi dipollar soni bo'lsa, u holda maydonning s yuza orqali o'tishi jarayonida E vektor yo'nalishida $q \cdot N_1 \cdot x \cdot s$ musbat zaryad siljiydi va qarama-qarshi yo'nalishda – manfiy zaryad $-q N_1 (d-x)s$ siljiydi. Manfiy zaryadning maydoniga teskari yo'nalishda siljishiga, musbat zaryadning maydoni yo'nalishida siljishi ekvivalent bo'lganligi uchun, s yuzadan o'tgan umumiy zaryad

$$Q' = q N_1 x s + q N_1 (d-x)s = N_1 q d s = P s,$$

bunda, $N_1 \cdot q \cdot d = P$ bo'lganligi uchun $P = \frac{Q'}{s}$.

Umumiy holatda bir jinsli bo'lmagan maydon uchun

$$P = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta Q'}{\Delta s} = \frac{dQ'}{ds}, \quad (1.1)$$

ya'ni, *qutblanganlik - zarrachalar siljishi yo'nalishiga normal bo'lgan element yuzasi orqali maydon o'rnatilishi jarayonida dielektrik moddasidagi siljigan zaryadlangan zarrachalar olib o'tadigan elektr zaryadining, shu element yuzasi nolga intilgandagi nisbati limitiga teng.*

Elektr maydonining vaqt bo'yicha har qanday o'zgarishida dielektrikning qutblanganligi R o'zgaradi. Bunda dielektrik moddasida atomlari va molekullari tarkibiga kiruvchi elektr zaryadli elementar zarrachalar harakatlanadilar. Dielektrikdagi elektr tokining bu turi *qutblanganlik (polyarizatsiya) elektr toki* deyiladi. Dielektrikda zaryadlangan zarrachalar erkin bo'lmaganligi va elektr maydoni ta'sirida siljishi mumkin bo'lganligi uchun, qutblanganlik tokini siljish elektr toki ham deb ataladi. aniqrog'i, u siljish tokining bir tashkil etuvchisidir. Bu tokning siljishini J' modda qutblanishining o'zgarishi P bilan bog'lash qiyin emas.

Agar biror yuza elementi ds zaryadlangan zarrachalar siljish yo'nalishida ixtiyoriy o'rnatilgan bo'lsa, u holda $P_n = dQ'/ds$, bunda, P_n – yuqoridagi R vektorining ds yuza elementiga normal o'tkazilgan tashkil etuvchisi.

R vektori vaqt bo'yicha o'zgarishida ds yuza elementidan quyidagi tok o'tadi.

$$di = \frac{d}{dt} (P_n ds) = \frac{dP_n}{dt} ds.$$

Ikkinchi tomondan, $di = J'_n ds$, bunda J'_n - tok zichligi J' vektorining ds elementiga normal tashkil etuvchisi. Shunday qilib,

$$J' = \frac{dP_n}{dt}.$$

Yuza elementi ds ning vaziyatini ixtiyoriy olish mumkin bo'lganligi uchun, tok zichligi vektori J' ning tashkil etuvchisi biror yo'nalishda modda qutblanganligi R vektorining vaqt bo'yicha hosilasiga teng bo'ladi, degan hulosaga kelamiz. Xususan, J' ning OX, OY, OZ o'qlariga proeksiyalari quyidagicha:

$$J'_x = \frac{dP_x}{dt}; \quad J'_y = \frac{dP_y}{dt}; \quad J'_z = \frac{dP_z}{dt}.$$

Tok zichligi vektori

$$J' = i \frac{dP_x}{dt} + j \frac{dP_y}{dt} + k \frac{dP_z}{dt} = \frac{d}{dt} (iP_x + jP_y + kP_z),$$

bunda i, j, k – koordinata ox, oy, oz o'qlari bo'ylab yo'nalgan vektorlar.

$iP_x + jP_y + kP_z = P$, bo'lganligi uchun

$$J' = dP/dt.$$

Demak, siljish elektr toki vektorining ko'rilayotgan qismi modda qutblanganligi vektorining vaqt bo'yicha hosilasiga teng ekan.

Yuqorida ta'kidlanganidek, modda qutbianganligining o'zgariishi sababli hosil bo'lgan siljish toki va, demak, siljish toki zichligi J' , dielektrikdagi to'la siljish toki va, demak, to'la siljish toki zichligining bir qismini tashkil etadi. Darhaqiqat, dielektriklardagi elektr siljish vektori D ikki D_0 va P tashkil etuvchilardan iborat:

$$D = D_0 + P,$$

Bunda, proeksiya $D_0 = \epsilon_0 E$. Elektr maydoni o'zgarganda ikkala tashkil etuvchilar ham o'zgaradi. Shunday qilib,

$$dD/dt = dD_0/dt + dP/dt.$$

Keyingi ifodaning ikkinchi tashkil etuvchisi, yuqorida hozirgina aniqlanganidek, dielektrik moddasida zaryadlangan elementar zarrachalar harakati natijasida hosil bo'lgan siljish elektr toki zichligi vektoridir. Ifodaning birinchi tashkil etuvchisi ham tok zichligi birligiga ega. U elektr maydoni vaqt bo'yicha o'zgargandagi fizik jarayonni xarakterlaydi. Yuqorida, materiyaning maydon sifatida mavjudlik shaklini ifodalaydigan fazoni, ya'ni bizga ma'lum bo'lgan materiya zarralari bo'lmagan sohani bo'shliq, deb atasak, unda birinchi tashkil etuvchini *bo'shliqdagi siljish tokining zichligi*, deb nomlash mumkin. Uning belgilanishi quyidagicha bo'ladi:

$$dD_0/dt.$$

Shunday qilib, dielektrikdagi to'la *siljish toki* zichligining J_y vektori:

$$J_y = dD/dt = J_0 + J' = dD_0/dt + dP/dt.$$

Elektr siljishi D vektorining vaqt bo'yicha hosilasini vektor tushuncha sifatida ko'rish shart.

Siljish toki zichligi vektorining tashkil etuvchilari uchun barcha holatlarda

$$J_{x/y} = \frac{D_x}{dt}, J_{y/y} = \frac{dD_y}{dt}, J_{z/y} = \frac{dD_z}{dt}.$$

O'zgaruvchan tok bo'lganda, ayniqsa, axborot tizimlarida uchraydigan yuqori va o'ta yuqori chastotalarda siljish toki, na faqat dielektriklarda mavjud bo'ladi, balki yarim o'tkazgich va o'tkazgich moddalarda ham paydo bo'ladi. Darhaqiqat, tashqi maydon ta'sirida ushbu moddalar molekullari, dielektriklardagidek qutblanishi

zarur. Bundan tashqari, bo'shliqdagi siljish ham paydo bo'lishi shart. Yarim o'tkazgich moddalarda siljish toklarini yuqori chastota bilan o'zgaradigan maydonlarda e'tiborga olish zarur. O'tkazgich moddalarda esa, katta chastotalarda siljish toklari o'tkazuvchanlik toklariga nisbatan sezilarli bo'ladi, biroq ularni, aksariyat, e'tiborga olinmaydi.

Bu fikrlar asosida quyidagini ta'kidlash mumkin: elektr tokining eng muhim xususiyati – u bilan bog'liq bo'lgan magnit maydonining hosil bo'lishini – tokning barcha tashkil etuvchilari uchun ham bir xil tatbiq etish mumkin. Bu fikrlar tajribada to'raligicha tasdiqlandi.

Yuqorida keltirilgan mulohazalar asosida to'la elektr toki, yoki to'la tok skalyar qiymat bo'lib, ko'rilayotgan yuza orqali o'tayotgan o'tkazuvchanlik toki va siljish toki yig'indilariga teng, ya'ni,

$$i = \frac{dq}{dt} + \frac{d}{dt} \int_S D_n ds.$$

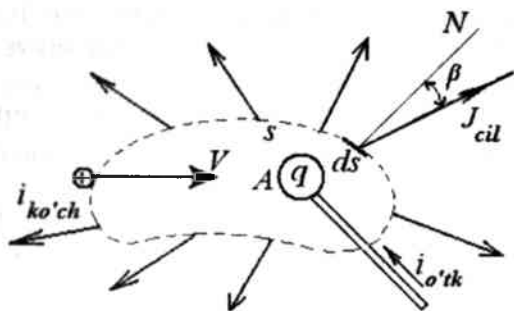
Ushbu ifodada q ning tarkibiga erkin tashuvchilarning zaryadlari ham, modda qutblanganidagi yuzadan o'tayotgan yig'indi bog'langan zaryadlar ham kiradi.

Dielektrikda biror s berk yuzani tasavvur qilaylik (1.4-rasm) va shu yuza ichida joylashgan A jism zaryadlanayapti, deb faraz qilaylik. Jismning zaryadi q ortganda uni o'rab turgan elektr maydoni kuchayadi va dielektrikda elektr siljishi ortadi. Shuning uchun s yuza orqali ichkaridan tashqariga tomon siljish toki oqadi. Yuza s orqali siljish vektorining oqimi yuza ichida joylashgan q erkin zaryadga teng.

$$\oint_S (dD/ds) dt = q$$

Shu tenglikdan vaqt bo'yicha hosila olamiz $\frac{dq}{dt} = i_{ni}$ $\oint_S J_{ni} ds = i_{ni}$

bunda, tenglikning o'ng qismi yuza s ichkarisidan tashqariga tomon oqayotgan siljish tokidir.



1.4-rasm. Dielektrikdagi s berk yuzani tasviri.

Qiymat dq/dt yuza s ichida joylashgan erkin zaryadning tezligi. Yuza s bilan cheklangan fazo hajmidagi musbat erkin zaryadning ortishi faqat tashqi fazodan hajm ichiga musbat zaryadlarning kiritilishi yoki manfiy zaryadlarning teskari yo'nalishda uzatilishi bilan bajarilishi mumkin. Bu uzatish yoki s yuzani kesib o'tuvchi o'tkazgichlardagi o'tkazuvchanlik toki $i_{o'tk}$ yordamida yoki yuza orqali zaryadlangan jismlarda yoki fazoda harakatlanayotgan zaryadlangan zarrachalar yordamida ko'chirish toklari $i_{ko'ch}$ bilan amalga oshirish mumkin. Agar, $dq/dt > 0$ bo'lsa, musbat zaryadlar tashqi fazodan s yuza chegaralagan hajm ichiga olib kiriladi, demak, $(i_{o'tk} + i_{ko'ch})$ toklar yig'indisi manfiy ishorali bo'ladi, chunki musbat ishorali deb tashqi normal qabul qilingan edi. Shunday qilib,

$$dq/dt = -(i_{o'tk} + i_{ko'ch}),$$

tenglik $\oint_S (dD/ds)dt = \frac{dq}{dt}$ quyidagicha qayta yozilishi mumkin:

$$i = -(i_{o'tk} + i_{ko'ch}) \text{ yoki } i + i_{o'tk} + i_{ko'ch} = 0.$$

Demak, ixtiyoriy berk yuza orqali oqayotgan barcha turdagi toklar yig'indisi (o'tkazuvchanlik, ko'chirish va siljish toklari) nolga teng ekan.

Agar δ orqali to'la tok zichligini ($\delta = J + J_c$) hamda i bilan yuzadan o'tayotgan barcha tokni belgilasak, u holda ixtiyoriy berk yuza uchun quyidagi qiymat

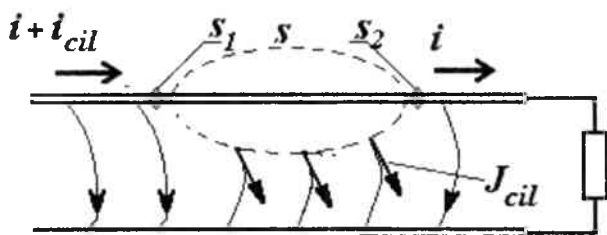
$$i = \oint_S \delta ds = 0$$

elektr toki uzluksizlik prinsipining umumiy ifodasi deyiladi. Ushbu muhim prinsip quyidagicha ta'riflanadi: *ixtiyoriy muhitda olingan berk yuza orqali o'tayotgan to'la elektr toki nolga teng*. Bunda yuzadan chiqayotgan tok musbat, kirayotgan – manfiy hisoblanadi.

Shunday qilib, tok chiziqlari hech qayerida na boshlanishi va na oxiri bo'lmaydigan, prinsipial ravishda berk chiziqlardir. Elektr toki har doim berk yo'ldan oqadi.

Barcha keltirilgan fikrlardan shu ayon bo'ladiki, tokning uzluksizlik prinsipi yoki berklik prinsipi faqatgina dielektriklardagi siljish toki va aynan bo'shliqdagi siljish toki tushunchasini kiritish bilan umum-tatbiq ahamiyatiga ega bo'ladi.

Misol sifatida signallarni uzatish liniyasini ko'raylik (1.5-rasm). O'zgaruvchan kuchlanish bo'lganda o'tkazgichlar orasidagi dielektrikda siljish toklari bo'ladi. Berk yuza s ni shunday o'tkazamizki, u liniyaning bitta o'tkazgichini qamrab olsin.



1.5-rasm. Signallarni uzatish liniyasi.

O'tkazgichdagi s_1 yuzaga kiruvchi $(i + i_{sj})$ va undan s_2 yuza orqali chiquvchi (i) toklar dielektrikdagi siljish toki miqdori bilan o'zaro farqlanadilar. Shu sababli o'tkazgichdagi o'zgaruvchan tok o'tkazgichning har xil kesim yuzalarlarida [masalan, s_1 yuzadagi tok $(i + i_{sj})$, s_2 yuzadagi tok (i)] vaqtning bir onida har xil bo'ladi. Ushbu fizik jarayonni o'tkazgichlar orasidagi kuchlanish tez o'zgaradigan (katta chastotali) zanjirlarda va uzun liniyalarda e'tiborga olinadi.

1.3. Kuchlanish, potensllar farqi, elektr yurituvchi kuch

Kuchlanish. Elektr zanjirlari va elektr maydoni bilan bog'liq bo'lgan eng muhim qiymatlardan bo'lgan elektr kuchlanishi, elektr potensllari farqi va elektr yurituvchi kuchlarni o'rganishga o'tamiz.

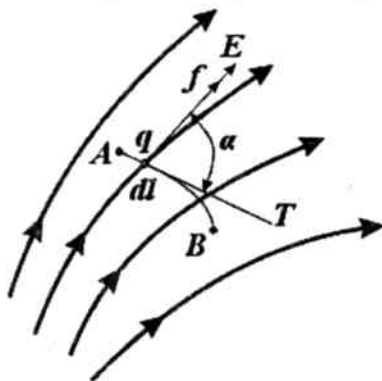
Agar q zaryadli zarracha elektr maydonida biror masofa bo'ylab ko'chirilsa, u holda unga ta'sir etuvchi kuchlar ish bajaradi. Bu ishning ko'chirilayotgan zaryadga nisbati *elektr kuchlanishi* deb atalmish, fizik qiymatga teng bo'ladi. Zarracha q ning dl masofaga (1.3-rasm) ko'chirilishini ko'raylik, bunda maydon kuchlari quyidagi ishni bajaradi:

$$dA = f \cdot \cos \alpha dl = qE \cos \alpha dl = qEdl$$

Yo'nalishi T urinmaga mos, uzunligi dl yo'l elementiga teng bo'lgan miqdor dl vektori bilan belgilangan. Bunda α vektorlar Ye va dl orasidagi burchakdir.

A nuqtadan (1.6-rasm) V nuqtagacha masofa bo'ylab zarrachani ko'chirishda maydon kuchlari bajarayotgan ish quyidagiga teng:

$$A = \int_A^B f \cos \alpha dl = q \int_A^B E \cos \alpha dl = q \int_A^B Edl$$



1.6-rasm. Maydon kuchlanganligi chiziqlari.

Bu ish berilgan masofa bo'ylab maydon kuchlanganligining chiziqli integral $\int_A^B E \cos \alpha dl$ ga proporsional. Bu chiziqli integral A dan

V gacha masofa bo'ylab elektr kuchlanishiga teng. Kuchlanishni u harfi bilan belgilash qabul qilingan.

Shunday qilib, ikki nuqtalar orasidagi elektr kuchlanish quyidagicha aniqlanadi

$$u_{AB} = \int_A^B E \cos \alpha dl = \int_A^B E dl$$

Demak,

$$A = q \cdot u_{AB}$$

Umumiy holda ko'rilayotgan masofa ixtiyoriy muhitdan o'tishi mumkin, xususan, u butunlay o'tkazgichdan o'tishi mumkin, butunlay yarim o'tkazgichdan va qisman o'tkazgichdan, qisman yarim o'tkazgichdan o'tishi mumkin.

Bayon etilganlarga muvofiq, **elektr kuchlanishi** - ko'rilayotgan masofa bo'ylab elektr maydonini xarakterlovchi va qiymati jihatidan elektr maydoni kuchlanganligining shu masofa bo'ylab chiziqli integraliga teng bo'lgan fizik kattalikka aytiladi. Aksariyat, biror masofa sohasi bo'ylab elektr kuchlanishi haqida gapirganda, soha bo'ylab kuchlanishlar pasayuvi atamasini ishlatadilar. Shu asosda, biror berk kontur bo'ylab elektr maydoni kuchlanganligining chiziqli integrali $\oint E dl$ shu kontur bo'ylab barcha bo'laklar elementi kuchlanishlar pasayuvining yig'indisiga teng bo'ladi.

Kuchlanishning birligi Volt $[V]$.

Keltirilgan fikrlardan shu kelib chiqadiki, **elektr maydonining kuchlanganligi** - kuchlanishlar pasayuvining maydon kuchlanganligi chizig'ining uzunlik birligiga nisbatiga teng. Darhaqiqat, agar masofa yo'nalishi maydon kuchlanganligi birligi bilan mos kelsa, dl masofadagi kuchlanishlar pasayuvi $du = E dl$, demak, $E = du/dl$. Shuning uchun, elektr maydoni kuchlanganligining o'lchov birligi Volt bo'lingan metr ($1 V/m$).

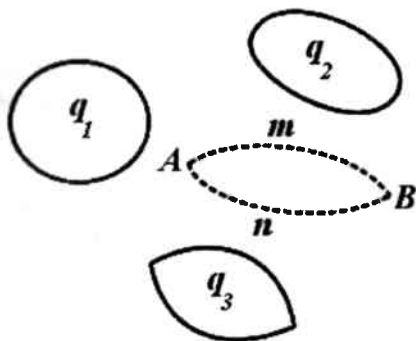
Elektr potentsiali va potentsiallar farqi. Yuqorida ta'kidlanganidek, o'tkazgich muhitida elektr maydon kuchlanganligi Ye tok zichiigi J bilan quyidagi bog'lanishda $E = \rho J$ bo'ladi, bunda, ρ - muhitning solishtirma qarshiligi. Oddiy holatda, o'zgarmas tokli i to'g'ri chiziqli l uzunlikdagi va kesim yuzasi s bo'lgan o'tkazgichda kuchlanishlar pasayuvi $u = El$ bo'ladi, tok esa $i = Js$ ga teng. Shunday qilib, $u = \rho J l = \rho l i / s = r i$. Qiymat $r = \rho l / s = u / i$

ko'rilayotgan o'tkazgich bo'lagining elektr qarshiligidir. Elektr qarshilik *Omda* (Ω) o'lchanadi. Ifoda $u = ri$ ko'rilayotgan o'tkazgich bo'lagi uchun *Om* qonuni deyiladi. O'tkazgichda vaqt birligida issiqlik sifatida ajralib chiqayotgan energiya miqdorini ifodalaydigan quvvat quyidagicha $p = A/t = uq/t = ui = r^2 i^2$ yoziladi. Bu hog'lanish Joul-Lens qonunini ifodalaydi. Quvvatning birligi *Vatt* (W).

Elektrostatik maydon, ya'ni zaryadlangan harakatsiz zarrachalar maydoni (1.4-rasm) mavjud bo'lsin. Elektrostatik maydonda ixtiyoriy berk kontur bo'yicha maydon kuchlanganligining chiziqli integrali nolga teng: $\oint E dl = 0$. Elektrostatik maydonning bu muhim xususiyati energiya saqlanish qonuni prinsipidan kelib chiqadi. Zaryadi q ga teng bo'lgan nuqtaviy jism $AmBnA$ (1.7-rasm) berk konturi bo'ylab ko'chmoqda, deb faraz qilaylik. Berk konturning bir qismida harakat maydon kuchlari yo'nalishida bo'ladi va maydon kuchlari hosil qilayotgan ish musbat bo'ladi. Berk konturning qolgan qismida harakat maydon kuchlari yo'nalishiga teskari bo'ladi va maydon kuchlari hosil qilayotgan ish manfiy bo'ladi. Maydon kuchlari q zaryadli jismni butun berk kontur bo'ylab ko'chirishda bajargan ish nolga teng bo'lishi shart.

$$q \oint E dl = 0, \quad \text{ya'ni} \quad \oint E dl = 0.$$

Darhaqiqat, agar shu shart bo'lmaganda edi, $AmBnA$ konturni aylanib o'tish yo'nalishini shunday tanlab olish mumkin bo'lar ediki, unda bajarilgan ish musbat bo'lar edi. Biroq, berk kontur bo'yicha aylanib o'tilgandan so'ng, tizim va q zaryadli jism yuqori aniqlikda boshlan-g'ich holatga qaytadi, demak, q zaryadli jism konturni birnecha (ixtiyoriy) marta 1.4-rasm. qayta aylanishi mumkin va har bir aylanishda musbat ishni hosil qilish mumkin bo'ladi. Bunday cheksiz energiya manbasini hosil qilish imkoniyatining mavjudligi energiya saqlanish qonuniga zid bo'ladi. Shunday qilib, elektrostatik maydonda ixtiyoriy kontur bo'ylab kuchlanganlikning chiziqli integrali nolga teng bo'lishi shart. Bundan, bevosita berilgan boshlanich va keyingi A va V nuqtalar tanlanishidan maydon kuchlanganligi chiziqli integralining bog'liq emasligi kelib chiqadi. Darhaqiqat,



1.7-rasm. Zaryadi q ga teng bo'lgan nuqtaviy jism $AmBnA$ berk konturi bo'ylab ko'chishi.

$$\int_{AmBnA} Edl = \int_{AmB} Edl + \int_{BnA} Edl = 0,$$

bundan

$$\int_{AmB} Edl = - \int_{BnA} Edl + \int_{AnB} Edl$$

integrallashdagi m va p yo'llar ixtiyoriy tanlangan va demak, elektrostatik maydonda integral $\int_A^B Edl$ qiymati integrallash yo'lini tanlashga bog'liq bo'lmaydi va faqat A va V koordinatalar tanlanishiga bog'liq ekan.

Shu integralga teng bo'lgan qiymatni A va V nuqtalar **potensiallari farqi** deyiladi va $\varphi_A - \varphi_B$ kabi belgilanadi. Demak,

$$\varphi_A - \varphi_B = \int_A^B Edl$$

kelib chiqadi.

Ikkinchi tomondan, ushbu integral A nuqtadan V nuqtagacha biror yo'l bo'ylab aniqlangan kuchlanishga teng. Demak, elektrostatik maydon uchun qo'llaganda «*kuchlanish*» va «*potensiallar farqi*» atamalari *bir hil qiymatga ega* ekan.

Bundan buyon potensiallar farqini, kuchlanishga o'xshash u harfi bilan belgilaymiz, shu sababli $\varphi_A - \varphi_B = u_{AB}$ belgilashni qabul qilamiz.

Yuqoridagilardan shu ma'lum bo'ladiki, *elektrostatik maydonning ikki nuqtasi potentsiallari farqi, qiymati birga teng bo'lgan musbat ishorali zaryadli nuqtaviy jismini bir nuqtadan ikkinchi nuqtaga ko'chirgandagi maydon kuchlari bajargan ishga teng ekan.*

Keyingi nuqta sifatida fazodagi R nuqtani olamiz. U holda integral $\int_A^P E dl$ ning qiymati faqat A nuqtaning x, y, z koordinatalari funksiyasi bo'ladi. Bu funksiyani U_A yoki $U(x, y, z)$ belgilasak, quyidagicha yozish mumkin bo'ladi:

$$\int_A^H E dl = \varphi_A = \varphi(x, y, z)$$

U qiymatni ko'rilayotgan maydon nuqtasining elektr potentsiali deyiladi. Berilgan nuqta R potentsiali nolga teng, chunki

$$\varphi_A = \int_A^H E dl = 0.$$

Berilgan maydonni xarakterlovchi elektr potentsialini, potentsiali nolga teng deb qabul qilinadigan ixtiyoriy R nuqtaning faqat ixtiyoriy o'zgarmas qiymatigacha aniqlikda hisoblash mumkin. Elektr potentsiali deb nomlangan, har bir nuqtasida skalyar qiymat bo'lgan ixtiyoriy kattalik bilan xarakterlanuvchi elektr maydoniga *potensial elektr maydoni* deyiladi. Ularga elektrostatik maydon, elektr yurituvchi kuch manbalari ta'sirida bo'lmagan va qo'zg'olmas o'tkazgichlardan o'tgan o'zgarmas tok elektr maydoni kiradi. Darhaqiqat, bu holda o'tkazgichlarda zaryadning taqsimlanishi, elektrostatikadagidek vaqt bo'yicha o'zgarmas bo'ladi. O'zgarmas tokli qo'zg'olmas o'tkazgichlar atrofidagi va ular ichidagi elektr maydoni *statsionar elektr maydoni* (E_{stat}) deb ataladi.

Elektrostatikaning real masalalarini yechishda, aksariyat yerning sathi potentsiali nolga teng deb qabul qilinadi. Fazoning cheklangan sohalarida joylashgan va cheksiz dielektrik muhit bilan o'ralgan zaryadlangan jismlar masalalarining nazariy tadqiqotlarida, aksariyat zaryadlangan zarrachalardan cheksiz uzoqlikda bo'lgan nuqtalarning potentsiallari nolga teng deb qabul qilinadi, ya'ni potentsialni quyidagi integral kabi aniqlanadi.

$$\varphi_A = \int_A^{\infty} E dl$$

Elektr maydoni kuchlanganligi chiziqlarini to'g'ri burchak ostida kesib o'tuvchi yuzalar *teng elektr potentsialli yuzalar* deyiladi. Darhaqiqat, bu yuzadagi ixtiyoriy chiziq bo'ylab $\oint E \cos \alpha dl = 0$ ga ega bo'lamiz, chunki $\cos \alpha = 0$. Demak, ushbu yuzada joylashgan ikki ixtiyoriy A va V nuqtalari potentsiallari farqi nolga teng. $U(x,y,z) = \text{const}$ tenglama teng potentsialli yuzada joylashgan nuqtalar majmuasini aniqlaydi, ya'ni shu yuza tenglamasidir. Teng elektr potentsialli yuzalarning chizma tekisligidagi izi *teng potentsiallar chizig'i* deyiladi. Ayonki, teng potentsiallar chiziqlari maydon kuchlanganligi chiziqlari bilan har qayerda to'g'ri burchak ostida kesishiadi.

Zaryadlarning statik holatida o'tkazgichlar ichidagi elektr maydon kuchlanganligi nolga teng bo'lishi kerak, chunki tokning ($J=0$) yo'qligida $E = \rho J = 0$ bo'ladi. Shu sababli, elektrostatik holatda har bir o'tkazgich jism o'zining barcha hajmida bir xil potentsialga ega bo'ladi: bu jismlar yuzalari teng elektr potentsialli yuzalar bo'lib, dielektrlardagi kuchlanganlik liniyalari ularga normal ekanini bildiradi.

Agar zaryadlangan o'tkazgich jismni o'rab olgan izolyatsiyalovchi muhitning dielektrik singdiruvchanligi elektr maydoni kuchlanganligiga bog'liq bo'lmasa, u holda dielektrikning hamma joyida ϵ qiymat ham, demak, jismning U potentsiali ham jismning q zaryadiga proporsional bo'ladi. Zaryad q ning U ga nisbati jismning *elektr sig'imi* deyiladi.

$$C = \frac{q}{U},$$

bunda, potentsial cheksiz katta bo'lganda $C=0$ bo'ladi. Alohida jismning elektr sig'imi jismni aniqlovchi g geometrik parametrlariga va uni o'rab turgan muhitning absolyut dielektrik ϵ singdiruvchanligiga bog'liq: $C = F'(g, \epsilon)$. Agar dielektrik bir jinsli bo'lsa, u holda $C = \epsilon f(g)$. Dielektrik singdiruvchanlik ϵ qiymati E ga bog'liq bo'lmasa, C ning qiymati q va U ga bog'liq bo'lmaydi.

Dielektrik bilan izolyatsiyalangan, zaryadlari teng va qarama-qarshi ishorali $q_1 = -q_2$ bo'lgan ikki o'tkazgich potentsiallari farqi zaryadlardan birining qiymatiga proporsional bo'ladi. Bunda quyidagi miqdor

$$C = \frac{q_1}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q_2}{\varphi_2 - \varphi_1},$$

shu jismlar orasidagi *elektr sig'imi* deyiladi. C jismning shakli, o'lchovlari va o'zaro joylashganligini ifodalovchi g geometrik parametrlarga, shuningdek, dielektrikning absolyut dielektrik ε singdiruvchanligiga bog'liq. Bir jinsli dielektrik uchun $C = \varepsilon f(g)$.

Elektr sig'imlarida ishiatish uchun maxsus tayyorlangan bunday ikki jismlar tizimi *kondensator* deyiladi. Ikki jism orasidagi sig'imning analitik ifodasi uchun potentsiallar farqi hisoblanishidagi qismining zaryadi olinadi. Bunda *doimo* $C > 0$. Sig'imning o'lchov birligi sifatida *Farada* (F) qabul qilingan.

Ifoda $\varepsilon = D / E$ dan ε qiymatning birligi

$$1 \frac{\text{Kl}}{\text{m}^2} : \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{Kl}}{\text{V} \cdot \text{m}} = 1 \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

Elektr yurituvchi kuch. Endi *elektr yurituvchi kuch* kattaligini o'rganaylik. Har qanday potentsial elektr maydonining, xususan, elektrostatik maydonining xarakterli xususiyati, aynan, maydon kuchlanganligining ixtiyoriy berk kontur bo'ylab chiziqli integrali nolga tengligi, *elektr yurituvchi kuch* (EYK) deb nomlangan manbai bo'lmagan fazo sohasiga taalluqlidir.

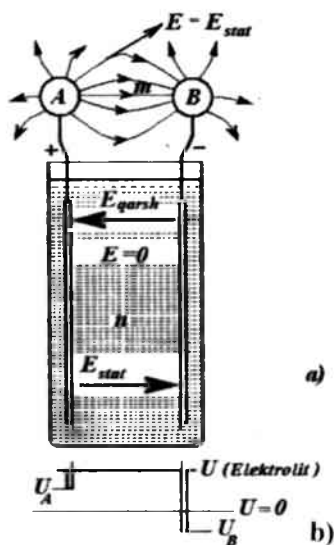
EYK tushunchasining paydo bo'lishi noelektrik va nopotensial xarakterdagi elektr maydonlarining mavjudligidan kelib chiqadi.

Umumiy holda quyidagicha talqin qilamiz: *agar berk kontur bo'ylab elektr maydon kuchlanganligining chiziqli integrali nolga teng bo'lmasa, berk konturda ya elektr yurituvchi kuch ta'sir etayotgan bo'ladi*, quyida ko'rsatganimizdek, bu chiziqli integral konturda ta'sir etayotgan EYK ga teng bo'ladi

$$\oint E dl = e \neq 0$$

EYK manbalari sifatida, masalan, elektr generatorlari, galvanik elementlar, akkumulyatorlar, termoelementlar ishiatilishi mumkin. «Elektr yurituvchi kuch» tushunchasi taalluqli bo'lgan miqdorning qanday ekanligini aniqlash uchun, 1.8-rasm misol tariqasida galvanik elementni ko'ramiz. Galvanik element klemmalariga ulangan A va B jismlar EYK ta'sirida zaryadlanadi. Dielektrikda A va B jismlar orasidagi ixtiyoriy yo'l bo'ylab E vektordan olingan integral ular potentsiallari farqiga teng.

$$\int_{AmB} E dl = \varphi_A - \varphi_B = u_{AB}$$



1.8-rasm. Galvanik element.

A dan B jisimgacha integrallash yo'lini ikki hil yo'nalishda bajarish mumkin: birinchisi ko'rsatilayotgan AmB yo'lini olsak – A jismdan ulanish o'tkazgichi – elementning musbat elektrodi – elektrolit – manfiy elektrod - ulanish o'tkazgichi – B jism; ushbu yo'l bo'ylab integral $\int_{AmB} E dl = 0$ nolga teng bo'ladi. Darhaqiqat, bu yo'l

to'laligicha o'tkazgich muhitidan o'tadi. Metallda o'tkazuvchanlik jarayoni elektron o'tkazuvchanligi bilan ta'minlanadi, elektrolitda – musbat va manfiy ionlar bilan ta'minlanadi. $J=0$ bo'lganligi uchun $E = \rho J = 0$.

Elektrodlarning yuzalaridagi yupqa qatlamda elektrod va elektrolit zaryadlari kuchlanganligi E_{stat} bo'lgan elektr maydoni va kuchlanganligi E_{qarsh} ga teng va unga qarshi yo'nalgan tashqi elektr maydoni hosil bo'ladi. Ular yig'indisi

$$E = E_{stat} + E_{qarsh} = 0 \text{ yoki } E_{stat} = - E_{qarsh}.$$

Bundan

$$\int_{A \rightarrow B} E_{stat} dl = - \int_{A \rightarrow B} E_{qarsh} dl = \int_{B \rightarrow A} E_{qarsh} dl$$

qiymat

$$\int_{B \rightarrow A} E_{kiritish} dl = e$$

galvanik elementning *EYK* ni ifodalaydi. Bu *EYK* element ichidagi zaryadli zarrachalarni elektrostatik maydon E_{stat} kuchlariga qarama-qarshi yo'nalishda harakatni amalga oshiradi.

E'tiborni shunga qaratish zarurki, agar manbaning ichida integrallash yo'li uning manfiy klemmasidan musbati tomon bo'lsa, *EYK* musbat bo'ladi.

Ushbu elektr yurituvchi kuchning paydo bo'lish tabiati shundaki, *erish bosimi* ostida musbat ionlar (o'tkazuvchanlik elektronlarisiz qolgan metall atomlari) elektroddan elektrolitga o'tishga intiladi. Bu o'tishga elektrolitdagi metall atomlarining musbat ionlari *osmotik bosim* bilan qarshilik ko'rsatadi. Bu ikki bosimlarning farqi ta'sirida musbat ionlarning elektroddan elektrolitga o'tishi yoki shu bosimdan qay biri kattaroqligi sababli, teskari yo'nalishda o'tishi (elektroliz jarayoni) sodir bo'ladi. Natijada, birinchi holatda - elektrod manfiy zaryadlanadi (metallda ortiqcha o'tkazgich elektronlari bilan), ikkinchi holatda - musbat zaryadlanadi, elektrolit esa qarama-qarshi zaryad oladi. Elektrod va elektrolit orasida potentsiallar farqi o'rnatiladi va ionlarning o'tishiga qarshilik ko'rsatuvchi elektrostatik maydon E_{stat} hosil bo'ladi. Ionlar o'tishi elektrostatik maydon kuchlari ta'sirida bosimlar farqi muvozanatlanganda yakunlanadi.

Bosimlar farqi natijasida hosil bo'lgan mexanik f kuchning ionga ta'siri, E_{stat} ga teng bo'lgan elektrostatik maydon kuchlanganligiga proporsionaldir; bunda q - ionlar zaryadi. Shunday qilib, muvozanat holati quyidagi shartlar bajarilganda hosil bo'ladi:

$$E_{stat} + E_{qarsh} = E = 0.$$

1.8,a-rasmda E_{qarsh} va E_{stat} vektorlar shartli ravishda elektrolit joylashgan elektrodlar orasidagi fazoda o'rnatilgan, aslida, yuqoridagi fikrlarga ko'ra, ular faqatgina elektrolit va elektrodlar orasidagi yupqa qatlamlarda noldan farqli bo'ladilar. Bu fikrlar 1.8,b-rasmdagi potentsiallar taqsimlanishi grafigida o'z aksini topgan.

O'zining bir qismi bilan *EYK* manbasi *ichidan* o'tgan berk kontur (1.5,a-rasm) $AmBnA$ bo'ylab E vektorining chiziqli integralim tuzamiz va quyidagini hosil qilamiz.

$$\int_{AmBnA} Edl = \int_{AmB} Edl + \int_{BnA} Edl = \varphi_A - \varphi_B, \text{ chunki } \int_{BnA} Edl = 0,$$

Ikkinchi tomondan,

$$\int_{AmBnA} Edl = \oint E_{stat} dl + \oint E_{qarsh} dl = e,$$

chunki

$$\oint E_{stat} dl = 0, \quad \oint E_{qarsh} dl = \int E_{qarsh} dl = e$$

Demak,

$$e = \varphi_A - \varphi_B = U_A - U_B,$$

ya'ni, *elementning elektr yurituvchi kuchi potentsiallar farqiga teng yoki* ushbu misolda bir hil *-tashqi zanjiri uzilgan klemmalardagi* (zanjirda tok bo'lmagandagi) *kuchlanishga teng*.

Bu fikrlardan ko'ramizki, $\oint Edl = 0$ shart faqat *EYK* manbasidan tashqarida bo'lgan fazo uchun taalluqlidir.

Galvanik elementdan tashqari, *EYK* ni hosil qilishning birnecha usullari mavjud. Bulardan biri – *kontakt EYK* laridir. Bunda turli jinsli metallar kontakti mavjud bo'lganda bir metallardan ikkinchi metallga o'tkazuvchanlik elektronlari o'tishi va, shu tufayli, bir metallda ortiqcha musbat, ikkinchi metallda ortiqcha manfiy elektr zaryadlari paydo bo'ladi. Elektronlarning bunday o'tishi kontakt joyidagi noelektrik xarakterdagi tashqi elektr maydonining ta'siri sifatida ko'rilishi mumkin. Tutashgan metallarda har xil ishorali zaryadlarning paydo bo'lishi natijasida kontaktlar potentsiallari farqi bo'lishiga, tokning yo'qligida esa kontakt *EYK* deb nomlangan *EYK*ning hosil bo'lishiga olib keladi. Kontakt *EYK* tutashuvchi metallar turlariga va haroratiga bog'liq.

Ushbu holat termoelementlarda ishlatiladi. Agar ikki turli jinsdagi o'tkazgichlardan berk kontur hosil qilsak, ikki payvandlangan o'tkazgichlar kontaktlaridagi har xil t va t_0 haroratda ulangan joylardagi kontakt *EYK*lari har xil bo'ladi va kontur bo'ylab o'zaro kompensatsiyalanmaydi. Shu sababli, berk konturda *termoelektrik yurituvchi kuch deb nomlangan* natijaviy *EYK* hosil bo'ladi. Termoelektrik yurituvchi kuchning umumiy qiymati tarkibiga uning qo'shimcha *EYK*lari ham kiradi. Qo'shimcha *EYK*lar ikki bir jinsli o'tkazgichlar bo'ylab, ularning bir uchi ikkinchi uchiga qaraganda

yuqoriroq haroratli muhitda bo'lganligi sababli hosil bo'ladi. Bu qo'shimcha *EYK*lar bir haroratli metallidagi elektronlarning issiqlik harakati boshqa haroratdagidan jadalroq bo'lganligidan o'tkazgich elektronlarining o'tishi sababli hosil bo'ladi. Termoelementda tokning oqishi natijasida *EYK*ning ta'siri issiqlik energiyasining elektr energiyasiga aylanishi bilan bog'liq. Aksariyat qo'llaniladigan termoparalarda sovuq va issiq qatlamning haroratlari, mos ravishda, 0 va 100°C bo'lganda, *EYK* qiymati taxminan birnecha millivolt yoki birnecha o'n millivolt bo'ladi. Keyingi boblarda magnit maydonining vaqt bo'yicha o'zgarganidagi induktivlanadigan *EYK* ni o'rganganimizda, «elektr yurituvchi kuch» tushunchasi kengaytiriladi, shunda bu muhim hodisaning umumiy ta'rifi keltiriladi.

E'tiborni shunga qaratish zarurki, *EYK*ni ta'riflaganda, yuqorida keltirilganidek, integrallash yo'li energiya manbaining *ichida* manfiy klemmadan musbat klemmaga tomon o'tkaziladi ($e = \int_{B_{u1}}^{A_{u1}} E_{ush} dl$), uning *A* va *B* klemmalaridagi kuchlanishni aniqlaganda esa, integrallash tashqaridagi yo'ldan musbat klemmadan manfiy klemmaga tomon o'tkaziladi.

$$u_A = \varphi_A - \varphi_B = \int_{A_{uB}}^{A_{uA}} E dl .$$

2. ELEKTR ZANJIRLARINING ELEMENTLARI VA ASOSIY TUSHUNCHALARI

2.1. Elektr va magnit zanjirlari

Birinchi bobda bayon etilgan ma'lumotlardan shunday fikr ayon bo'ladiki, zaryadlangan zarrachali jismlar va tokli konturlardagi, ya'ni ixtiyoriy telekommunikatsion, axborot yoki elektrotexnik tizimlarda sodir bo'layotgan ixtiyoriy elektromagnit hodisa, nafaqat tokli konturlarni hosil qilgan zaryadlangan zarrachalar va o'tkazgichlardagi fizik jarayonlar bilan ifodalanadi, balki shu jismlarni o'rab turgan dielektriklar va o'tkazgichlardagi elektromagnit hodisalari bilan ham aniqlanadi. Bundan ko'ra ahamiyatliroq qilib aytish mumkinki, aynan zaryadlangan zarrachalar va tokli konturlarni o'rab turgan dielektriklardagi elektromagnit maydon, tizimning bir yeridan ikkinchi yeriga uzatilishi mumkin bo'lgan signallarning, ya'ni energiyaning tashuvchilari hisoblanadi. Zaryadlangan jismlarning elektr maydoni shu jisn tashqarisida – uni o'rab turgan dielektrikda bo'ladi. O'tkazgichlarda oqayotgan elektr tokining magnit maydoni esa shu o'tkazgich tashqarisida va uning ichida mavjud bo'ladi. Biroq tokli o'tkazgichning ichidagi elektr maydoni faqat shu o'tkazgich materialining cheklangan solishtirma qarshiligiga bog'liq va o'tkazgichiardagi energiya isrofini aniqlaydi. O'tkazgich orqali uzatilayotgan energiya esa, to'la-to'kis o'tkazgichni o'rab turgan muhit elektromagnit maydoniga taalluqli. Telekommunikatsion va elektrotexnik qurilmalarning ixtiyoriy elementi elektr sig'imi va induktivligi ularning elektr va magnit maydonlari bilan aniqlanadi.

Shunday qilib, elektrotexnik hodisalarni tahlil qilishda va ularning to'laligicha ko'rishning barcha holatlarida tekshirilayotgan qurilmaning elektromagnit maydonini o'rganish zarur.

Ko'pgina tahliliy vaziyatlarda, elektrotexnik qurilmalar elektromagnit maydonlarining barcha nuqtalarini xarakterlovchi E_{tashq} , E_{ind} , E , D , δ , H va B kattaliklarining fazoda va vaqt bo'yicha

taqsimlanish ifodalarining murakkab tahlilini qilmasdan, faqatgina elektr yurituvchi kuch

$$e = \oint (E_{uzish} + E_{uzilik}) dl, \quad \text{elektr kuchlanish } u = \int_A^B E dl, \quad \text{elektr zaryadi } q = \oint D ds, \quad \text{elektr toki } i = \oint \vec{j} \cdot d\vec{s}, \quad \text{magnit oqimi } \Phi = \oint_S B ds \text{ kabi integral}$$

qiymatlardan foydalanib, elektrotexnik qurilmalardagi jarayonlarni yetarli darajada aniq ifodalash imkoniyati mavjud bo'lar ekan. Bunday imkoniyatning vujudga kelishiga sabab – elektr toklari oqishi uchun biz aksariyat yaxshi izolyatsion muhitga o'ralgan, yuqori elektr o'tkazuvchanligiga ega bo'lgan materiallardan, etarli darajada tor yo'llar hosil qilinishiga harakat qilishimizdir (masalan, elektr tarmoqlari) yoki ushbu yo'llar bo'ylab geometrik o'lchamlari cheklangan, yaxshi o'tkazgich qurilmalarni o'rnatishimizdir (masalan, elektron lampalar, yarim o'tkazgich asboblari, elektrolitik vannalar).

*Elektromagnit jarayonlarini ifodalashda elektr yurituvchi kuch, tok va kuchlanish tushunchalaridan foydalanish mumkin bo'lgan, elektr toki oqishi uchun yo'llarni hosil qiluvchi qurilmalar va obyektlar majmualari **elektr zanjirlari** deyiladi.*

Shunga o'xshash ko'pgina vaziyatlarda magnit induksiyasi berkitish chiziqlari oqishi uchun yo'llarni, shu yo'llar bo'ylab yuqori magnit singdiruvchanligiga ega bo'lgan ferromagnit materialli jismlar va ular atrofida past magnit singdiruvchanligiga ega bo'lgan muhit (masalan, havo) hosil qilishga harakat qilamiz. Bunday vaziyatlarda jarayonlarni etarli darajadagi aniqlik bilan magnit yurituvchi kuch $i_{nv} = \oint H dl$ va magnit oqimi $\Phi = \oint B ds$ kabi integral tushunchalar yordamida ifodalash imkoniyati paydo bo'ladi.

*Elektromagnit jarayonlari magnit yurituvchi kuch va magnit oqimi tushunchalari bilan ifodalaniishi mumkin bo'lgan, ferromagnit jisimli qurilmalar majmualari **magnit zanjirlari** deyiladi.*

Elektromagnit maydoni jarayonlarining murakkab ko'rinishidan elektr zanjirlaridagi jarayonlarning soddalashtirilgan ko'rinishiga o'tish usullari, bundagi jarayonlarning haqiqatan murakkab ko'rinishidan og'ishdagi joizlikni e'tiborga olish, demak, bundagi qabul qilinadigan abstraksiyalarni o'rganish, ushbu bobning asosiy

maqsadi bo'ladi. Bunda, yana keyingi boblarga taalluqli, elektr zanjirlarining asosi bo'lgan umumiy tushunchalarni ham keltiramiz.

2.2. Elektr zanjirlarining elementlari

Elektr zanjirlarining asosiy elementlariga elektromagnit energiyasi manbalari, elektromagnit energiyasini uzatish, qayta ishlash va qabul qiluvchi qurilmalari kiradi.

Elektromagnit energiyasining manbalariga energiya u yoki bu (issiqlik, kimyoviy, yadro, quyosh, shamol, mexanik harakat va h.k.) turlaridan elektromagnit energiyasiga aylantiruvchi generator qurilmalari kiradi. Bularga, masalan, aylanuvchi elektr generatorlari, galvanik elementlar, akkumulyatorlar, termoelementlar va h.k. kiradi. Hozirgi kunda issiqlik, yadro, kimyoviy energiyalarni elektromagnit energiyasiga aylantiruvchi yangi uskunalar yaratilmoqda, masalan, magnitogidrodinamik generatorlar, issiqlik elementlari, quyosh batareyalar va h.k.

Elektromagnit energiyani uzatish elementlariga aloqa liniyalari, elektr uzatish liniyalari, elektr tarmoqlari kiradi.

Elektromagnit energiyani qayta ishlashga tok va kuchlanishni o'zgartiruvchi transformatorlar, chastota o'zgartkichlari, kuchaytirgichlar, shuningdek, o'zgarmas tokni o'zgaruvchan tokka aylantiruvchi yarim o'tkazgichli invertorlar, o'zgaruvchan tokni o'zgarmas tokka aylantiruvchi to'g'rilagichlar va h.k. kiradi.

Elektr zanjirlaridagi *iste'molchilar* yoki *yuklamalar* qatoriga elektr energiyasini boshqa turdagi energiyaga aylantiruvchi qurilmalar kiradi, masalan, akkumulyatorlar, isitkich jihozlari, radio va televizion jihozlar, elektr motorlar, elektroliz uskunalari va h.k.

Agar u yoki bu qurilma elektr zanjiri elementining asosiy vazifasi sifatida elektromagnit energiya generatsiyasi, uni uzatish, qayta ishlash yoki iste'mol qilish masalalari qo'yilsa, birinchi o'ringa uning foydali ish koeffitsiyenti yuqori bo'lish talabi qo'yiladi.

Kam quvvatli elektr zanjirlari elementlarining asosiy vazifasi qilib signallarni uzatish, qayta ishlash, o'zgaruvchiliklar qiymatlarini o'lchash operatsiyasini bajarish, u yoki bu jarayonlarning sifatini boshqarish masalasi qo'yiladi. Bu elementlar qatoriga

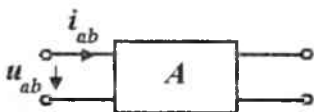
telekommunikatsiya tizimlari, telefon va telegraf aloqa liniyalari va ularning uchlaridagi qurilmalar, avtomatika qurilmalarining har turdagi elementlari, elektr o'lchash qurilmalari, elektron hisoblash mashinalarining hisoblash va boshqarish qurilmalari, har turdagi radiotexnik qurilmalar va h.k.lar kiradi. Ularning barchasi uchun eng muhim talab – uzatilayotgan va qayta ishlanayotgan signallarning ma'lum sifatda bo'lishidir. Tabiiyki, bu holatlar uchun ham elektromagnit energiyasining uzatilishi va qayta ishlanishi amalga oshiriladi va asosiy bo'lmasa ham, imkon qadar yuqori foydali ish koeffitsiyentiga erishish maqsadi qo'yiladi.

Keltirilgan talablar bilan birgalikda, elektr zanjiri elementlari yana bir qator talablarni qoniqtirishi zarur – ishlashining ishonchliligi, ko'pga chidamliligi, zarur bo'lsa – tez ishlovchanligi, ishdagi barqarorligi, amaldagi aniqligi va h.k.

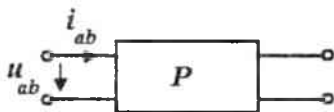
Shunga muvofiq, hozirgi zamon elektrotexnik qurilmalarining elektr zanjirlari juda murakkabdir. Shu sababli ham elektr zanjirlar nazariyasi doimiy rivojlanmoqda va unga yanada umumlashtirilgan usullar xos bo'lmoqda. Ushbu darslikda eng sodda elektr zanjirlarini hisoblashdan boshlab, asta - sekin murakkab zanjirlarni tadqiqotining umumiy usullariga o'tamiz.

Elektr zanjirining elektromagnit energiyasi manbalari ta'sir etayotgan qismini *zanjirning aktiv qismi*, qisqacha – aktiv zanjir deb nomlaymiz. Aksariyat, uni o'rtasida *A* harfi bo'lgan to'g'ri to'rtburchak shaklida va zanjirning qolgan qismiga ulash uchun zarur bo'lgan sondagi klemmlar (qutblar) bilan chiziladi (2.1-rasm).

Elektr zanjirining elektromagnit energiyasi manbalari bo'lmagan qismini *zanjirning passiv qismi*, yoki qisqacha – *passiv* zanjir deb ataymiz. Uni esa o'rtasida *P* harfi bo'lgan to'g'ri to'rtburchak shaklida va zanjirning qolgan qismiga ulash uchun zarur bo'lgan sondagi klemmlar bilan belgilaymiz (2.2-rasm).



2.1-rasm. Aktiv zanjir.



2.2-rasm. Passiv zanjir.

Elektr zanjirlarini aktiv va passiv elementlari umumiy holda ikkiqu tublik elementlardir.

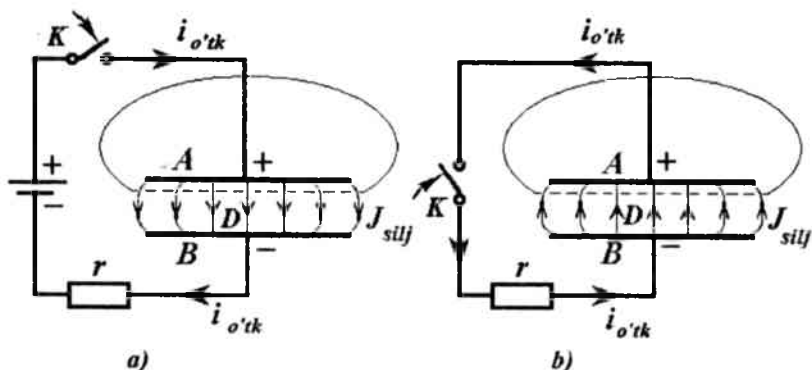
2.3. Elektr zanjirlarining fizik xususiyatlari, elektr zanjirlarini soddalashtirish

Nisbatan soddaroq fizik jarayonlar o'zgarmas tok zanjirlarida sodir bo'ladi. O'zgarmas tok elektr zanjiridagi uzoq vaqt davom etadigan tok yoki o'tkazuvchanlik, yoki ko'chirish toki sifatida bo'lishi mumkin. Dielektrikdagi siljish toki o'zgarmas va uzoq vaqt davomli bo'la olmaydi, chunki dielektrikning elektr chidamliligi buzilmagan holda, elektr siljish toki va dielektrikning polyarizatsiyasi cheksiz davomli bo'lishi mumkin emas. Shu sababli, o'zgarmas tok zanjiri tarkibiga faqat o'tkazuvchanlik toki shaklida mavjud bo'lgan, masalan, uzatish liniyalari o'tkazgichlari, induktivlik g'altaklarining chulg'amlari, elektrolitik vannalar, galvanik elementlar, akkumulyatorlar va h.k., yoki toklari faqat ko'chirish toki shaklida bo'lgan, masalan, elektron lampalar va h.k. qurilmalar kirishi mumkin. *Solishtirma o'tkazuvchanligi nolga teng deb ehtimol qilingan ideal dielektrikli kondensatordan barqarorlik jarayonida o'zgarmas tok oqib o'tmaydi.*

O'zgarmas tok zanjiri atrofida magnit maydoni mavjud bo'lsa ham, u vaqt bo'yicha o'zgarmaydi, demak, Faradey qonuniga ko'ra, *o'zgarmas tok zanjirida EYK induktivlanmaydi.*

Agar o'tkazgichlar orasidagi izolyatsiyalovchi muhit kichik bo'lib, chekli solishtirma o'tkazuvchanlikka ega bo'lsa, u holda o'tkazgichlar orasidagi o'zgarmas kuchlanish ta'sirida dielektrik orqali siljish toki oqib o'tadi. Siljish toki izolyatsiyalovchi muhitga unga tutashgan barcha o'tkazgich elementlaridan o'tadi, natijada o'tkazgich bo'ylab tok har xil qiymatlarga ega bo'ladi. Bunda biz shunday sodda zanjirga ega bo'lamizki, unda parametrlari tarqoq, ya'ni zanjir bo'ylab siljish o'tkazuvchanligi tarqoq bo'ladi. O'zgaruvchan toklar va kuchlanishlarda elektr zanjiridagi hodisalar juda murakkablashgan bo'ladi. O'zgaruvchan tok, ya'ni vaqt bo'yicha o'zgaradigan tok dielektrikda ham siljish toki sifatida mavjud bo'ladi. Shuning uchun o'zgaruvchan tokli elektr zanjiri tarkibiga qoplamalari dielektrik bilan ajratilgan kondensator ham

kirishi mumkin. O'zgaruvchan kuchlamish bo'lganda kondensatorning metall qoplamalari orasida o'zgaruvchan elektr maydoni paydo bo'ladi, demak, qoplamalarni ajratib turuvchi dielektrikda siljish toki sodir bo'ladi. Elektr siljish tokini e'tiborga olib, oldin ta'kidlanganidek, tok chiziqlari doimo berk bo'ladi.



2.3-rasm. Ketma-ket ulangan kondensatorli elektr zanjiri.

Ketma-ket ulangan kondensatorli elektr zanjiridagi sig'imning zaryadlanishi va razryadlanishidagi jarayonni ko'raylik. Agar siljish toklarini e'tiborga olmasak, bu zanjir uzilgandek ko'rinadi. K kalit yordamida vaqtning biror onida zaryadlanmagan kondensator o'zgarmas EYK zanjiriga ulanayapti, deb faraz qilaylik (2.3,a-rasm). Kondensator zaryadlanadi; EYK manbasidan o'tkazgich simlari orqali kondensator qoplamalariga o'tkazilayotgan elektr zaryadlari shu qoplamalarda yig'ila boshlaydi. Qoplamalardagi zaryadlarning ortishi natijasida qoplamalar orasidagi elektr maydoni ortib boradi va dielektrikda siljish toklari sodir bo'ladi. Agar qoplamalardan birini, masalan, A qoplamani, s yuza bilan qamrab olsak, bu yuzani kesib o'tgan o'tkazgichdan A qoplamaga o'tkazuvchanlik $i_{o'tk}$ toki oqib o'tishi sodir bo'lada, dielektrikda s yuza orqali ichkaridan tashqariga yo'nalgan va aynan o'tkazuvchanlik $i_{o'tk}$ tokiga teng bo'lgan siljish toki paydo bo'ladi. Dielektrikdagi siljish toki chiziqlari o'tkazgichdagi o'tkazuvchanlik tokining davomi bo'ladi. Darhaqiqat, elektr maydon musbat A qoplamadan manfiy B qoplamaga yo'nalgan va ortuvchi bo'ladi. Demak, siljish toki

chiziqlari ham musbat qoplamadan manfiy qoplamaga yo'nalgan bo'ladi. O'tkazgichdan musbat qoplama tomon oqayotgan o'tkazuvchanlik toki, dielektrikda siljish toki J_{silj} sifatida oqishda davom etadi va manfiy qoplamaga etganda yana undan o'tkazgich orqali o'tkazuvchanlik toki $i_{o'tk}$ sifatida oqishda davom etadi. Shunday qilib, elektr toki zanjiri berk kontur hosil qiladi.

Agar zaryadlangan kondensatorni EYK manbaidan uzib, qarshiligi r bo'lgan rezistorga K kalit yordamida berk ulansa (2.3, b-rasm), u holda kondensator razryadlana boshlaydi; bunda o'tkazgichdagi $i_{o'tk}$ toki A musbat qoplamadan V manfiy qoplamaga tomon oqa boshlaydi. Dielektrikdagi elektr maydoni avvalgidek A musbat qoplamadan B manfiy qoplamaga tomon yo'nalgan bo'ladi. Biroq, endi maydon susaya boshlaydi, demak, tok zichligi J_{silj} vektori elektr maydoni yo'nalishiga teskari bo'ladi. Siljish toki chiziqlari manfiy qoplamadan musbat qoplama tomon yo'naladi va o'tkazgichdagi tok chiziqlarining davomi bo'ladi.

Elektr tokining uzluksizligi prinsipiga muvofiq (§1.2), vaqtning ixtiyoriy onida, kondensatorning zaryadlanayotganida ham, yoki uning razryadlanaytganida ham, kondensator qoplamalarining orasida joylashgan dielektrikdagi siljish toki o'tkazgichlardagi $i_{o'tk}$ o'tkazish tokiga aynan teng bo'ladi.

O'zgaruvchan kuchlanish bo'lganda siljish toki, na faqat kondensatorlarda, ya'ni sig'imlarini ishlatish uchun maxsus tayyorlangan qurilmalarda sodir bo'ladi, balki o'zgaruvchan tok zanjiri ixtiyoriy elementning atrofidagi dielektrikda ham vujudga keladi, chunki shu elementlar orasida o'zgaruvchan kuchlanish mavjud, ya'ni o'zgaruvchan elektr maydoni mavjud. Masalan, agar elektr uzatish liniyasida o'tkazgichlari orasidagi kuchlanish vaqt bo'yicha o'zgarsa, o'tkazgichlar orasidagi dielektrikda siljish toki vujudga keladi. Shu sababli, dielektrikning solishtirma o'tkazuvchanligi nolga teng bo'lganda ham, liniya uzunligi bo'ylab o'tkazgichlardan tok dielektrik orqali siljish toki sifatida tarmoqlanadi (1.2-rasm) va liniyaning har xil nuqtalarida o'tkazgichlardagi tok qiymati bir xil bo'lmaydi. Shu sababli, liniyaning o'tkazgichlari bir-biriga nisbatan, kondensatorga o'xshab, sig'imga ega bo'ladi. Bu ta'kidlashlar o'zgaruvchan tokdagi ixtiyoriy qurilma uchun taalluqlidir. Masalan, o'zgaruvchan tokdagi reostatda

o'zgaruvchan kuchlanishlar pasayuvi vujudga keladi, ya'ni reostat o'tkazgichi (simi)da va uni o'rab turgan dielektrikda o'zgaruvchan elektr maydoni hosil bo'ladi. Shuning uchun, reostatning alohida qismlari orasida dielektrik orqali siljish toki oqib o'tadi, natijada reostatning har xil joylaridagi tok miqdori har xil bo'ladi. Shu sababli, reostatning alohida qismlarida bir-birlariga nisbatan elektr sig'imi mavjud.

Agar endi induktivlik g'altagidan o'zgaruvchan tok oqib o'tsa, u holda g'altakning alohida o'ramlarida *EYK* induktivlanadi. G'altakning klemmlarida va uning o'ramlari orasida o'zgaruvchan kuchlanish, ya'ni o'zgaruvchan elektr maydoni hosil bo'ladi u, o'z navbatida, g'altak o'ramlari orasidagi dielektrikda siljish tokining paydo bo'lishiga sabab bo'ladi. Bu holatda ham, g'altak o'tkazgichining har xil joylarida tok har xil qiymatga ega bo'ladi. Shu sababli, g'altak o'ramlari orasida elektr sig'imi mavjud bo'ladi.

Demak, *elektr sig'imi zanjirning uzunligi bo'ylab doimo taqsimlangan bo'ladi.*

Zanjirning induktivligi haqida ham shu fikrlarni keltirish mumkin. Zanjirdan tok oqib o'tganda magnit maydoni hosil bo'lmaydigan uning birorta qismi yo'qdir. Shuning uchun o'zgaruvchan tokda zanjirning har bir qismida o'zinduksiya va o'zaro induksiya *EYK*lari induktivlanadi. Shu sababli zanjirning har bir qismi, har bir elementi induktivlikka ega. Induktivlikka na faqat g'altaklar ega bo'ladi, balki liniyaning o'tkazgichlari, reostatlar va o'zgaruvchan tok zanjirining ixtiyoriy boshqa elementlari ham ega. Hatto kondensator ham, juda kichik bo'lsada, induktivlikka ega bo'ladi. Shunday qilib, *induktivlik ham doimo zanjir bo'ylab taqsimlangan bo'lar ekan.*

Shunga o'xshash, o'zgaruvchan tokda elektromagnit energiyaning yutilishi va uning issiqlik energiyasiga aylanishi, zanjirning barcha elementlarida sodir bo'ladi. Na faqat reostatlar, balki induktivlik g'altaklar ham, liniyalarning o'tkazgichlari ham va zanjirning boshqa elementlari ham noldan farqlanuvchi elektr qarshiliklariga ega, ulardan tok oqib o'tganda elektromagnit energiya yutilishi sodir bo'ladi va issiqlik ajralib chiqadi. Agar g'altak ferromagnit materialli o'zakka ega bo'lsa, u holda g'altak chulg'amida energiya isrofidan tashqari, o'zakda gisterezis va

uyurma toklarning energiya isrofi ham mavjud bo'ladi. O'zgaruvchan kuchlanish bo'lganda kondensatorlarda dielektrikdagi quvvat isrofi mavjud bo'ladi. Elektron lampalarda issiqlik anodda ajralib chiqadi, chunki elektr maydonida tezlatilgan elektronlar bu yerda o'zining tezligini yo'qotadilar. Ionli asboblarda elektromagnit energiya issiqlik energiyasiga na faqat elektrodlarda, balki elektrodlar orasidagi gaz muhitida ham aylanadi.

Zanjirning biror qismidan tok o'tishi natijasida shu qism elektr qarshiligining elektromagnit energiyani yutish qobiliyati mavjudligini ta'kidlash bilan birga, shuni e'tirof etishimiz zarurki, *elektr qarshilik elektr zanjirining hamma joyida taqsimlangan*dir.

Elektr qarshiliklari va o'tkazuvchanliklari, induktivliklari va elektr sig'implari zanjir bo'ylab taqsimlangan elektr zanjirlari, parametrlari taqsimlangan elektr zanjirlari deb ataladi. Shunga muvofiq, bunday zanjirlardagi tok va kuchlanishlar vaqtga bog'liq ravishda va biror fazoviy koordinataga bog'liq ravishda o'zgaradi, demak, ikki o'zgaruvchining funksiyasidir. Bu vaziyat elektr zanjirlari fizik jarayonlarini tahlil qilishni tubdan murakkablashtiradi.

Ba'zi elektr zanjiri qismlarida elektromagnit energiya, na faqat issiqlikka, balki boshqa turdagi energiyaga ham aylanishi mumkin, masalan, akkumulyatorlarning zaryadlanishida - kim'yoviy energiyaga, elektr motorlarida - mexanik energiyaga o'zgartirish amalga oshiriladi. Biroq, elektr zanjirining barcha elementlarida bunday energiya o'zgartirilishi amalga oshirilishi shart emas.

O'zgaruvchan tokli elektr zanjirlaridagi energetik jarayonlarni o'rganishda, elektr va magnit maydonlari ma'lum energiya miqdorini tashuvchilar ekanligiga alohida e'tibor berishimiz lozim bo'ladi. O'zgaruvchan tok va kuchlanishlarda bu maydonlar vaqt bo'yicha o'zgaradi. Maydon kuchayganda ulardagi energiya zahirasi ortadi, maydon susayganda - kamayadi, boshqa turdagi energiyaga aylanadi yoki zanjirda ishlab turgan energiya manbaiga qaytariladi.

Albatta, amaldagi o'zgaruvchan tok zanjirlari ishini tahlil qilishda yoki yangi zanjirlarni yaratishda sodir bo'ladigan fizik jarayonlarning barcha murakkabliklarini e'tiborga olish - zanjirlarga qo'yiladigan texnik va texnologik talablarning so'zsiz bajarilishini ta'minlaydi. Hozirgi kunda kompyuter va ularning dasturiy ta'minoti keskin rivojlanishl, bunday vazifalarni bajarish

imkoniyatini oshiradi. Ushbu usullarni qo'llash masalalari darslikning keyingi boblarida o'rganiladi.

Yaqin o'tmishda hisoblash vositalari imkoniyatining cheklanganligi sababli, zanjirlarni hisoblashdagi u yoki bu murakkab fizik jarayonlarni e'tiborga olmaslik shartlarini taklif etib, hisoblash jarayomini soddalashtiruvchi, shu bilan birga, tajriba natijalaridan uncha keskin farq qilmaydigan bir qator usullar taklif qilgan.

Hozirgi davrda texnika, texnologiya jarayonlarini loyihalash maqsadida ushbu ikki yo'ldan birini tanlashda, zanjirlardagi murakkab jarayonlarni e'tiborga olish zaruratini, murakkab hisoblash dasturlarini ishlab chiqarishni, ularni hisoblash amaliyotiga joriy etish va aniq hisoblash natijalariga ega bo'lish masalalarini tarozining bir tomoniga qo'yib, zanjirlarni soddalashtirib, nisbatan osonroq va kam mablag' sarflanadigan usullarni qo'llash masalalarini tarozining ikkinchi tomoniga qo'yib, ushbu usullarning texnik, texnologik va iqtisodiy samarasini e'tiborga olib, hisoblash yo'llarining tanlovini tashkil etilmoqda.

Ushbu usullarni talabalar, muhandis-texnik xodimlar tomonidan o'rganish jarayonida esa, zanjirlarni hisoblashning avval soddalashtirilgan usullarini o'rganish, so'ngra murakkab usullarini o'rganishga o'tish zarurligi barcha olimlar tomonidan ta'kidlanmoqda.

Quyida elektr zanjirlarining murakkab fizik jarayonlarini soddalashtirib hisoblashga asos bo'luvchi omillarini o'rganamiz.

Darhaqiqat, elektr zanjirlari bo'ylab elektr va magnit maydonlarining noravon taqsimlanishi nisbatan kam hollarda, masalan, uzun liniyalar deb nomlangan o'ta yuqori chastotali zanjirlarda, axborot tizimlarida va boshqalarda uchraydi. Zanjir bir qismida, masalan, kondensatorlarda, elektr maydoni miqdori ustun bo'ladi va uning o'zgarishlari bilan bog'liq bo'lgan holatlar masalaning asosini tashkil etadi; zanjirning boshqa qismlarida, masalan, induktivlik g'altaklarida, magnit maydoni miqdori ustun bo'ladi va magnit maydonining o'zgarishlari bilan bog'liq bo'lgan jarayonlar asosiy hisoblanadi.

Shunga o'xshash elektromagnit energiyasining issiqlik energiyasiga aylanishi, aksariyat zanjirning bir yoki birnecha qismlarida mujassamlangan bo'ladi.

Misol sifatida reostatni olaylik. r qarshilikdan tashqari, uning o'ramlari orasidagi biror miqdordagi sig'imga ega va biroz induktivlik ham mavjud. Agar o'zgaruvchan tokning chastotasi katta yoki tokning o'zgarishi sekin, ammo ixtiyoriy qonuniyat bilan sodir bo'lsa, reostat o'tkazgichining qismlaridan dielektrikka o'tayotgan siljish toklari, reostat o'tkazgichida oqayotgan o'tkazuvchanlik tokiga nisbatan juda kichik bo'ladi. Bunday holatda siljish toklarini e'tiborga olmasa ham bo'ladi, bu esa reostat qismlari orasidagi S sig'imni nolga teng deb hisoblash bilan ekvivalentdir. Shunga o'xshash, tokning chastotasi kichik yoki umuman uning o'zgarishi sekin kechsa, qarshilikdagi kuchlanishlar pasayuvi qiymatiga nisbatan, reostatdagi o'zinduksiya elektr yurituvchi kuchining qiymatini e'tiborga olmasa ham bo'ladi, bu esa reostatning L induktivligi nolga teng deb qabul qilishga ekvivalentdir. Boshqacha qilib aytganda, voqelikda jarayonning murakkab tasvirini abstraktlashtirib faraz qilamizki, reostat faqat $r \neq 0$ bo'lgan qarshilikka hamda $L=0$ bo'lgan induktivlik va $C=0$ bo'lgan sig'imga ega. E'tibor beraylik, zanjirning bunday qismini $g = 1/r$ o'tkazuvchanlik bilan tasvirlashimiz ham mumkin.

Amaliyotda asosiy tavsifi elektr qarshiligidan iborat qilib maxsus konstruksiya shaklida yasalgan qurilmalar juda keng qo'llaniladi.

Elektr qarshiligidan foydalanish uchun mo'ljallangan elektr zanjir elementi rezistor deyiladi.

O'tkazgichdan faqat o'zgarmas tok oqib o'tganda uning kesim yuzasi bo'ylab tok ravon taqsimlangan bo'ladi. Bunga mos kelgan o'tkazgich qarshiligi *omik qashilik* deyiladi. O'zgaruvchan tokli o'tkazgichda esa, tokning chastotasi qanchalar katta bo'lsa, «yuza effekti» ta'siri shunchalar kuchli bo'ladi va shu sababli o'tkazgichda tok kesim yuzasida ravon taqsimlanmasdan, o'tkazgich yuzasi bo'ylab oqadi. Bunga mos kelgan o'tkazgich qarshiligi *aktiv qarshilik* deyiladi.

Boshqa muhim misol sifatida kondensatorni ko'raylik. Juda yuqori chastotalargacha kondensatorning L induktivligini e'tiborga olmay, faqat uning S sig'imini hisobga olish mumkin. Agar zanjirda reostat va sig'im bo'lsa va reostat yutayotgan energiya miqdori, kondensator dielektrikidagi sarflanayotgan energiyadan ancha katta

bo'lsa, u holda birlamchi hisoblarda kondensatordagi energiya isrofini e'tiborga olmasak bo'ladi, yoki qarshilikni xos ravishda o'zgartirish uchun uni ishlatish mumkin. Bunday abstraktlashda, kondensator $C \neq 0$ sig'imga ega, ammo uning uchun $L=0$ va $r=0$.

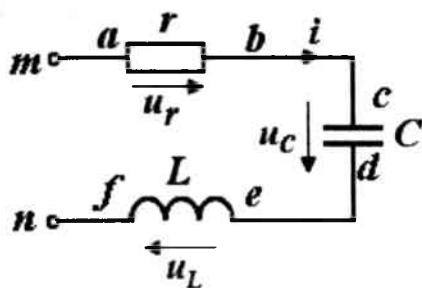
Muhim misollardan yana biri - induktivlik g'altagidir. Agar zanjirdagi tokning chastotasi juda katta bo'lmasa, g'altak o'tkazgichidagi o'tkazuvchanlik toki miqdoriga nisbatan, g'altak o'tkazgichi o'ramlari orasidagi siljish tokini juda kichik hisoblab, uni e'tiborga olmasa bo'ladi, ya'ni g'altak o'ramlari orasidagi S sig'imni hisobga olinmaydi.

Juda kichik bo'lmagan chastotalarda, g'altakdagi induktivlanayotgan EYK miqdoriga nisbatan g'altak o'tkazgichi qarshiligidagi kuchlanishlar pasayuvi qiymatini juda kichik deb, uni e'tiborga olmaslik mumkin, ya'ni g'altak qarshiligini nolga teng deb qabul qilish mumkin. Zarur bo'lganda g'altak qarshiligini hisobga olish mumkin, bunda faraz qilinadi: qarshiligi $r=0$ bo'lgan g'altak bilan qarshiligi haqiqiy o'tkazgich qarshiligi r ga teng bo'lgan reostan ketma-ket ulangan, deb hisoblanadi. Bunday abstraktlash natijasida g'altak parametrlarini $L \neq 0$, $C=0$ va $r=0$ deb hisoblaymiz.

Misol uchun ketma-ket (2.4-rasm) ulangan rezistor ($a-b$ oraliq), kondensator ($c-d$ oraliq) va induktivlik g'altagi ($e-f$ oraliq) dan iborat bo'lgan zanjir tuzilgan bo'lsin.

Faraz qilaylik, elektromagnit energiyasi issiqlik energiyasiga faqat sohadagi rezistordagina o'tayapti, ya'ni zanjirning barcha r miqdoridagi qarshiligi $a-b$ oraliqda mujassamlangan; elektr siljish toklari faqat $c-d$ oraliqda kondensator qoplamalari orasida mavjud, ya'ni zanjirning barcha C sig'imi $c-d$ oraliqda mujassamlangan; nihoyat, o'zgaruvchan magnit maydon EYK ni faqat $e-f$ oraliqdagi g'altakda induktivlaydi, ya'ni zanjirning barcha L induktivligi faqat ushbu sohada yig'ilgan. Sxemada keltirilgan r - S - L elementlar joylashgan m , n klemmlar va $a-b$, $c-d$, $e-f$ sohalar orasidagi $m-a$, $b-c$, $d-e$ va $f-n$ o'tkazgichlarning qarshiliklari, sig'imlari va induktivliklari nolga teng deb faraz qilamiz.

Umumiy holda, ancha murakkabroq ko'rinishga ega bo'lgan va har xil elementlardan tashkil topgan shunga o'xshash elektr zanjirlari, mujassamlangan parametrli elektr zanjirlari deyiladi.



2.4-rasm. Ketma-ket ulangan rezistor , kondensator va induktiv elementli elektr zanjir.

Bunda birinchi $a-b$ oraliqdagi r rezistor qarshiligi orqali i tokni o'tkazishga zarur bo'lgan u_r kuchlanishni Om qonunini tatbiq etib aniqlash mumkin.

$$u_r = i r. \quad (2.1)$$

Ikkinchi $c-d$ oraliq elementi kondensatorni tasvirlaydi. Agar C sig'im ma'lum bo'lsa, berilgan q zaryadning qiymati uchun $u_c = q / C$ kuchlanishni aniqlash mumkin. Tok i bilan q zaryad orasida $i_r = dq / dt = C du / dt$ bog'lanishi mavjud. Demak,

$$q = \int_0^t i dt + q(0), \quad (2.2)$$

bunda, $q(0)$ – vaqtning $t = 0$ oni uchun, (ya'ni vaqtning hisoblanish boshi uchun) kondensatordagi zaryad miqdori. Unda

$$u_c = \frac{1}{C} \int_0^t i dt + \frac{q(0)}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t i dt + u_c(0), \quad (2.3)$$

bunda, $u_c(0)$ - vaqtning $t = 0$ oni uchun kondensatordagi kuchlanish.

Zanjirning uchinchi $e-f$ oralig'i g'altakning induktivligini tasvirlaydi. G'altakning L induktivligi berilgan bo'lsa, tok i uchun o'zinduksiya magnit ilashuvini $\Psi_L = L \cdot i$ aniqlash mumkin va berilgan tok tezligi di / dt uchun zanjirda induktivlanayotgan o'zinduksiya $e = L \cdot di / dt$ EYK ni, shuningdek, g'altak klemmalaridagi kuchlanishni aniqlash mumkin.

$$u_L = -e = +L \cdot di / dt. \quad (2.4)$$

G'altakdagi tok i va magnit ilashuvi Ψ_L ni uning klemmlaridagi u_L kuchlanish bilan ifodalasak

$$i = \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt + i(0)$$

va

$$\Psi_L = L \cdot i = \int_0^t u_L dt + \Psi(0) \quad (2.5)$$

bunda, $i(0)$ va $\Psi(0) = L \cdot i(0)$ - vaqtning $t=0$ oni uchun tok va magnit oqimi.

O'zaro induktivlik mavjud bo'lganda, shunga o'xshash

$$\Psi_{LM} = M i_2; \quad e_{LM} = -M \frac{di_2}{dt}$$

va

$$u_{LM} = -e_{LM} = +M \frac{di_2}{dt} \quad (2.6)$$

Tok i_2 va magnit $\Psi_{LM} = M i_2$ oqimni u_{LM} kuchlanish bilan ifodalab, quyidagini olamiz

$$i_2 = \frac{1}{M} \int_0^t u_{LM} dt + i_2(0)$$

va

$$\Psi_{LM} = M i_2 = \int_0^t u_{LM} dt + \Psi_{LM}(0) \quad (2.7)$$

Ushbu ilmiy abstraksiyalarning amally ahamiyati juda kattadir. Unda keltirilgan farazlarni qabul qilish natijasida har xil texnik qurilmalar tarkibida mavjud bo'lgan, elektr zanjirlarining juda katta turkumlarini o'z ichiga olgan, mujassamlangan parametrlilik elektr zanjirlari nazariy asoslarini tuzish imkoniyatiga ega bo'lamiz. Ushbu turkum elektr zanjirlariga, elektr energiyasi va signallarni uzatish uzun aloqa liniyalaridan tashqari, barcha sanoat qurilmalaridagi, shuningdek, tovush chastotasidagi elektr zanjirlari kiradi. Aloqa, televideniye tizimlarida ishlatiladigan ko'pgina yuqori chastotali elektr zanjirlari ham, yuqori aniqlikda, mujassam parametrlilik elektr zanjirlari deb ko'rilishi mumkin.

Ushbu abstraksiyalarning qo'llash chegaralarini aniq tasavvur qilish g'oyat muhimdir. Chunki bir real zanjir har xil chastotalarda o'zini har xil ko'rsatishi mumkin. Masalan, agar quyi chastotalarda

induktiv g'altagi o'ramlari orasidagi sig'imni e'tiborga olmaslik haqida faraz qilish mumkin bo'lsa, shu g'altakning o'zida juda yuqori chastotalarda bunday faraz katta hatolikni tug'diradi va hodisalar haqiqiy tasvirining buzilishiga olib keladi. Chunki yuqori chastotalardagi real sharoitlarda g'altak o'ramlari yaqinidagi dielektrlarda siljish toklari qiymatlari o'tkazish toklari miqdoriga juda yaqin bo'lib qoladi.

Yuqoridagi fikrlardan shu aniq bo'ladiki, qarshilik r , sig'im C va induktivlik L kattaliklari elektr zanjirlari uchun asosiy parametrlar hisoblanar ekan. Agar ushbu zanjirga boshqa zanjirlar tomonidan ta'sir ko'rsatiladigan bo'lsa yoki shu zanjir ichida boshqa qismlardan birining ikkinchisiga shunday ta'siri mavjud bo'lsa, u holda parametrlar qatoriga o'zaro induktivlik M ham qo'shiladi.

Ushbu va kelgusi boblarda mujassamlangan parametrlar elektr zanjirlari o'rganiladi, tarqoq parametrlar elektr zanjirlari esa o'n to'rtinchi bobda batafsil o'rganiladi.

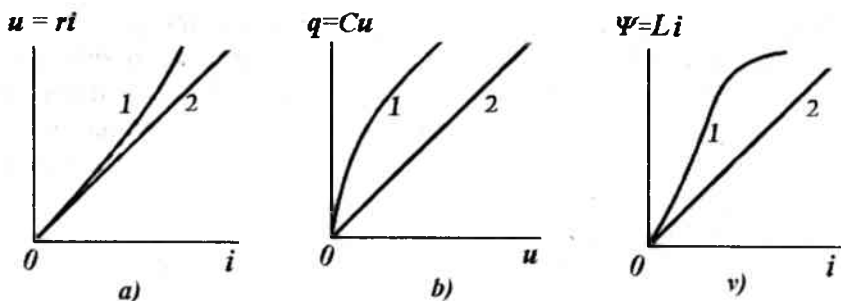
Sinchiklab tahlil qilganda shu fikrga kelish mumkimki, zanjirning asosiy parametrlari (r , C , L) ham tok yoki kuchlanishga bog'liq bo'lar ekan. Rezistorning harorati o'zgarganda uning qarshiligi r ham o'zgarib qolmaydi. Agar kondensator qoplamalari orasidagi dielektrik moddaning dielektrik singdiruvchanligi elektr maydon kuchlanganligiga bog'liq bo'lsa, kondensator sig'imi kuchlanishga bog'liq bo'ladi. Agar induktiv g'altak magnit o'zagi moddasi magnit maydon kuchlanganligiga bog'liq bo'lsa, g'altak induktivligi L ham tokka bog'liq bo'ladi.

Umumiy holda r , C , L parametrlarining tok, kuchlanish yoki ular yo'nalishlariga bog'liqligi shunga olib keladiki, elektr zanjiri elementlari tavsiflari noxiziq bo'ladi (2.5-rasm, 1-egri chiziqlar).

Elektr zanjiri elementi klemmalaridagi kuchlanishning undagi tokka bog'liqligi *Volt-Amper tavsifi* deyiladi (VAT) (2.5, a-rasm).

Kondensator zaryadining unga keltirilgan kuchlanishga bog'liqligi *Kulon-Volt tavsifi* deyiladi (2.5, b-rasm).

Elektr zanjiri elementi yoki bir qismi magnit ilashuvining undagi tokka bog'liqligi *Veber-Amper tavsifi* deyiladi (2.5, v-rasm).



2.5-rasm. Elektr zanjiri elementini veber-amper tavsifi.

Ko'pgina holatlarda tavsiflarning nochiziqli ekanligi yaqqol bo'lmaydi va sust ko'rinishda bo'ladi. Bunday nochiziqlikni e'tiborga olmasdan, zanjir parametrlari tokka ham, kuchlanishga ham bog'liq emas deb hisoblanadi. Bunday hollarda diagrammalarda elektr zanjiri elementining tavsifi to'g'ri chiziqdan iborat bo'ladi (2.5-rasmda 2-chiziq). Bunday elementlar **chiziqli element** deyiladi. Faqat **chiziqli elementlari** bo'lgan zanjirlar fizik jarayonlarining matematik ifodalari (matematik modellari) o'zgarmas tok bo'lganda **chiziqli** algebraik, vaqt bo'yicha o'zgaruvchan toklarda esa – chiziqli algebraik va *differensial tenglamalar* bilan ifodalanadi. Bunday zanjirlar **chiziqli elektr zanjirlari** deyiladi.

Elektr zanjir elementlarining parametrlari tok yoki kuchlanishga bog'liq bo'lsa va shu elementlar tavsiflari diagrammada egri chiziqli bo'lsa, bunday **elementlar nochiziqli** deyiladi. Agar elektr zanjiri hech bo'lmaganda bitta nochiziqli elementga ega bo'lsa, bunda u **nochiziqli elektr zanjiri** deyiladi.

Ferromagnit materialiga ega bo'lgan elektr zanjirlari, aksariyat nochiziqli bo'ladi, chunki bu materiallarning magnit singdiruvchanligi magnit maydoni kuchianganligiga bog'liq bo'ladi.

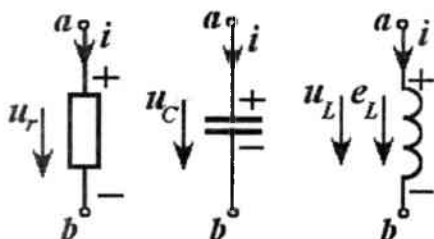
Nochiziqli elektr va magnit zanjirlarini o'rganish katta amaliy ahamiyatga ega, chunki bunday zanjirlarning maxsus xususiyatlari hozirgi zamon aloqa tizimlarida, ayniqsa, radiotexnika, axborot tizimlarida, avtomatik boshqarish va rostlash qurilmalarida, elektr o'lchov texnikasida va h.k. keng qo'llaniladi. Nochiziqli zanjirlardagi jarayonlar chiziqli zanjirlardagidan nisbatan murakkabroq, shu

sababli nochiziqli zanjirlardagi qo'llaniladigan usullar ham murakkabroqdir. Nochiziqli elektr va magnit zanjirlari nazariyasidagi asosiy tushunchalar o'n oltinchi bobda ko'riladi.

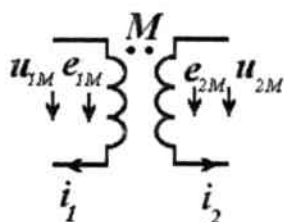
Ushbu va kelgusi boblarda zanjir parametrlari tok va kuchlanishga bog'liq emas, ya'ni chiziqli zanjir hamda alohida ta'kidlanmagan bo'lsa, vaqtga ham bog'liq emas deb, ya'ni o'zgarmas deb hisoblaymiz.

2.4. Elektr zanjiri elementlaridagi tok, kuchlanish va E.Y.K. larning shartli musbat yo'nalishlari

Elektr zanjirlaridagi jarayonlarni tahlil qilganda albatta zanjir elementlaridagi tok va EYKning shartli musbat yo'nalishlarini, ular klemmalaridagi kuchlanishning yo'nalishlarini keltirish va rasmda shu yo'nalishlarni strelka bilan belgilash zarur. Ushbu shartli musbat yo'nalishlarni ixtiyoriy berish mumkin. Agar tok, kuchlanish va EYKning haqiqiy yo'nalishlari berilgan onda ularning shartli musbat yo'nalishlari bilan mos kelsa, u holda tok i , kuchlanish u va EYK e ning haqiqiy qiymatlari musbat bo'ladi. Bundan so'ng, qisqalik uchun «shartli» so'zidan foydalanmasdan «musbat yo'nalishi» atamasini qoldiramiz, hamda agar alohida ta'kidlanmagan bo'lsa, haqiqiy yo'nalish emas, balki shartli musbat yo'nalishni nazarda tutgan bo'lamiz.



2.6-rasm. Bir tomonga yo'naltirilgan zanjirlar.



2.7-rasm. Ikki konturli o'zaro M induktivlik.

Ba'zan tok, EYK yoki kuchlanishning shartli musbat yo'nalishlarini strelkalar bilan emas, ularning harfli belgilarida ikkita indeks bilan belgilash qulayroqdir (i_{12} , u_{12} , e_{12} , i_{ab} , u_{ab} , e_{ab}).

Bu indekslar zanjir grafik tasvirining nuqtalariga mos bo'lishi zarur, bunda birinchi indeksni ifodalovchi nuqtadan ikkinchi indeksni ifodalovchi nuqtaga bo'lgan yo'nalishni musbat yo'nalish deb qabul qilmadi. Masalan, $u_{ab} > 0$ bo'lganda haqiqiy kuchlanish yo'nalishi a nuqtadan b nuqtaga tomon yo'nalgan bo'ladi.

Yuqorida keltirilgan u_r va i , q va u_c hamda u_L va di/dt orasidagi bog'lanishlarni e'tiborga olib, 2.6-rasmda keltirilganidek, bir tomonga yo'naltirilgan zanjirning har bir klemmasidagi tok, kuchlanish va EYK ning musbat yo'nalishini aniqlashimiz mumkin.

Darhaqiqat, yuqoridagi $u_{ab} = r i_{ab}$ ga muvofiq, bunda, qarshilik $r > 0$ bo'lganda $u_r = u_{ab}$ va $i = i_{ab}$ bir xil ishorali, ya'ni vaqtning bir onida musbat ishorali (2.6-rasmdagi «+» va «-») yoki vaqtning bir onida manfiy ishorali bo'lishi shart. Bu esa ularning musbat yo'nalishini bir xil qilib tanlashga, ya'ni strelkalarning bir xil yo'nalishida bo'lishiga mos keladi. Bu shartlar quvvat doimo musbat $p_r = u_r i > 0$ bo'lishiga mos keladi.

Kondensator uchun $u_{ab} = q_a / C$, chunki $C > 0$ bo'lishi uchun kuchlanishning hisoblanishi boshlanayotgan onda kondensator qoplamasi zaryadini olishi kerak, ya'ni

$$C = \frac{q_a}{u_a - u_b} = \frac{q_b}{u_b - u_a}.$$

Agar vaqtning biror onida tokning haqiqiy yo'nalishi a klemmadan b klemma tomon yo'nalgan bo'lsin (ya'ni $i_{ab} > 0$), ushbu bog'lanishga muvofiq u_{ab} va q_a bir xil ishorali kattaliklar. Agar kondensator zaryadlansa, ya'ni $q_a > 0$ bo'lsa (2.6-rasmda «+» va «-» ishoralar), demak, $u_s = u_{ab} > 0$, hunga esa tok i va u_s kuchlanishning musbat yo'nalishida, ya'ni strelkalarni bir xil yo'nalishda joylashtirish zarur. Bu yana kondensator zaryadlanayotganda energiya unga kirib kelishini va uning klemmalaridagi quvvat musbat $p_s = u_s i > 0$ ekanligini ko'rsatadi.

G'altak uchun bog'lanish $u_L = +L di/dt$, bunda, doimo $L > 0$ bo'ladi, chunki $\Psi_L = L \cdot i$ va o'zinduksiya Ψ_L oqimi bilan tok i doimo bir xil ishorali bo'ladi, chunki tok yo'nalishi va o'zinduksiya oqimi yo'nalishi o'zaro «o'ng vint qoidasiga» binoan bog'langan. Agar tokning haqiqiy yo'nalishi a klemmadan b klemmaga yo'nalgan bo'lsa, u holda $i_{ab} > 0$. Agar bunda tok ortsa, ya'ni $di/dt > 0$ bo'lsa, u holda $u_L = u_{ab} > 0$ (2.6-rasmda «+» va «-»).

Shunday qilib, g'altak uchun ham $u_L = +L di/dt$ bog'lanishni tanlab, i tok va u_L kuchlanishlarning shartli musbat yo'nalishlarini tanlaymiz, ya'ni ular strelkalarining yo'nalishlari bir tomonga qaratilgan. Bularning hammasi yana, musbat tokning ortishida, ya'ni tokning absolyut qiymati ortganda, g'altakdagi magnit maydon energiyasi ortishiga va klemmalardagi quvvat musbat ishorali $p_L = u_L i > 0$ bo'lishiga olib keladi.

EYKning e_L shartli musbat yo'nalishlarini tanlaganda, u_L uchun tanlagandagidek bajarish zarur, chunki bunda $e_L = -u_L = -L di/dt$ bog'lanishga muvofiq, ye_L va u_L haqiqiy yo'nalishlari doimo qarama-qarshi bo'ladi, ya'ni agar, misol uchun, u_L ning haqiqiy yo'nalishi g'altak klemmalarida uning strelkasi bo'yicha (2.6-rasmda «+» dan «-»ga qaratilgan) bo'lsa, unda ye_L ning haqiqiy yo'nalishi g'altak klemmalarida uning strelkasiga teskari (2.6-rasmda «-» dan «+»ga qaratilgan) bo'ladi.

Endi ikki kontur orasidagi o'zaro M induktivlikni ko'raylik. Shuni yodda tutish muhimki, agar ixtiyoriy elektr konturlari uchun faqat $L > 0$ bo'lsa, o'zaro induktivlik M musbat ham, manfiy ham bo'lishi mumkin, xususan, nolga teng bo'lishi ham mumkin, chunki o'zaro induksiya maydonlarining ishoralari, konturlardagi musbat toklarning tanlangan yo'nalishlarida konturlarning o'zaro joylashuviga ham bog'liq. Ikkala konturlardagi toklarning musbat yo'nalishlarini doimo ixtiyoriy tanlash mumkin. Ushbu toklar yo'nalishlari tanlanib bo'lganligi uchun, konturlarning musbat toklarida, kontur bilan ilashuvchi o'zaro induksiya oqimlari musbat bo'lsa, ya'ni o'zinduksiya oqimlari bilan ishoralari bir xil bo'lsa, M qiymatini musbat deb qabul qilishimiz zarur. Boshqacha qilib aytganda, *musbat toklarda konturlardagi magnit maydonlari mos yo'nalgan bo'lsa, $M > 0$ bo'ladi, va musbat toklarda magnit oqimlari qarama-qarshi bo'lsa, $M < 0$ bo'ladi.*

Bunday sharoitlarda yuqorida qabul qilingan o'zaro induksiya EYK $e_{1M} = -M_{12} \frac{di_2}{dt}$ va $e_{2M} = -M_{21} \frac{di_1}{dt}$ ifodalaridan hamda kuchlanish va EYK orasidagi $u_{1M} = -e_{1M} = -M_{12} \frac{di_2}{dt}$ va $u_{2M} = -e_{2M} = -M_{21} \frac{di_1}{dt}$ (bunda $M_{12} = M_{21} = M$ ni e'tiborga olib) bog'lanishlaridan foydalanib, ular uchun shartli musbat yo'nalishlarini, u_{1M} va u_{2M} uchun qabul qilinganidek, ya'ni

i_1 va i_2 musbat yo'nalishlari bilan mos qilib, 2.7-rasmda keltirilganidek qabul qilish zarur.

Buning o'rniga, aksariyat, har bir g'altakning klemmlaridan birini qalin nuqta (•) bilan belgilanadi (2.7-rasm). Bu quyidagini anglatadi: agar g'altaklardan birida tokning shartli musbat yo'nalishi (•) nuqtadan boshlansa, u holda boshqa g'altaklarning kuchlanishlari va o'zinduksiya EYKlari musbat yo'nalishlari ham (•) nuqtadan qabul qilinadi.

Toklar i_1 va i_2 musbat yo'nalishlariga mos ravishda yoki tanlangan nuqtaga mos ravishda o'zaro induksiyaning ishorasi 2.7-rasmdagidek berilishi zarur, masalan, $M = +0,5 Hn$ yoki $M = -0,5 Hn$.

2.5. EYK va tok manbalari

Elektr zanjirlarida energiya manbalarini EYK manbalari va tok manbalari sifatida o'rganish qabul qilingan. EYK manbalari tarkibiga, aksariyat shunday elektromagnit energiya manbalari kiradiki, ularda *ye* EYK ning qiymati manbadan yuklamaga ketayotgan tokka (yuklama toki) bog'liq bo'lmagan, yoki manbaning ichki qarshiligi r_{ich} shunchalar kichikki, unda yuklanish i_{yuk} tokining noldan nominal i_{nom} qiymatigacha o'zgariganida, manbadagi kuchlanish

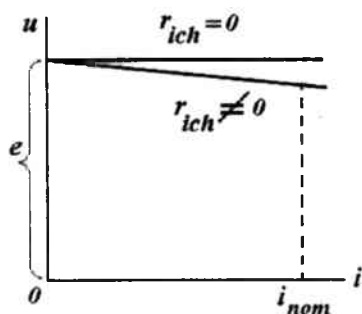
$$u = e - i r_{ich} \quad (2.8)$$

nisbatan kam o'zgaradi, shu sababli bu o'zgarishni e'tiborga olmasdan, amalda o'zgarinmaydi, deb qabul qilinadi. 2.8-rasmda bunday manbaning $e = \text{const}$ va $r_{ich} = \text{const}$ bo'lgandagi *tashqi tavsifi* deb nomlangan bog'lanishi, ya'ni $u = f(i)$ diagrammasi keltirilgan. U to'g'ri chiziqdan iborat. Chiziqli elektr zanjirlari tarkibida faqat shunday chiziqli tashqi tavsifga ega bo'lgan EYK manbalari bo'lishi shart.

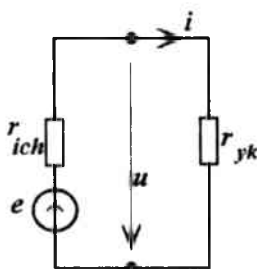
Agar, $r_{ich} = 0$ va $e = \text{const}$ bo'lsa, unda $u = e = \text{const}$ bo'ladi, bunday manbani *ideal EYK manbai* deyiladi. Agar $r_{ich} \neq 0$ bo'lgan real manbaning tarkibidan, shartli ravishda, uning ichki qarshiligini manbadan chiqarib olinsa, u holda 2.9-rasmda keltirilgan EYK manbaining shartli tasvirini hosil qilamiz. EYK *ye* ning musbat

yo'nalishini strelka bilan ko'rsatish zarur. Umumiy holda, mana shu EYKning shartli musbat yo'nalishidir, chunki EYK o'zgaruvchan, masalan, davriy o'zgaruvchan bo'lishi mumkin. Agar aktiv ikkiqutblikdagi kuchlanish yoki EYK ning qiymati undan o'tayotgan tok qiymatiga bog'liq bo'lmaydigan bo'lsa, u holda unga EYK yoki kuchlanish manbai deyiladi.

Agar $u = f(i)$ tavsifi egri chiziqli bo'lsa, bunday holat ye EYKning i tokka nisbatan, yoki ichki r_{ich} qarshilikning i tokka nisbatan nochiziqli bog'lanishda bo'lganda vujudga keladi. Bunday manbaga ega bo'lgan zanjir *nochiziqli elektr zanjiri* deyiladi. Ushbu darslikning chiziqli elektr zanjirlariga bag'ishlangan qismlarida EYK manbalari chiziqli tavsiflarga ega, deb faraz qilamiz. Bunday hususiyatga ega bo'lgan EYK manbalari qatoriga, masalan, akkumulyatorlar, galvanik elementlar, o'zgarmas tokli aylanuvchl elektr generatorlari kiradi.



2.8-rasm. Tashqi tavsif.

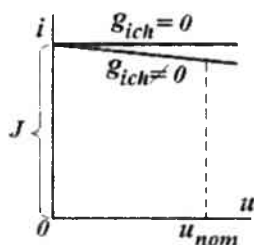


2.9-rasm. Ideal E.Y.K. manbai.

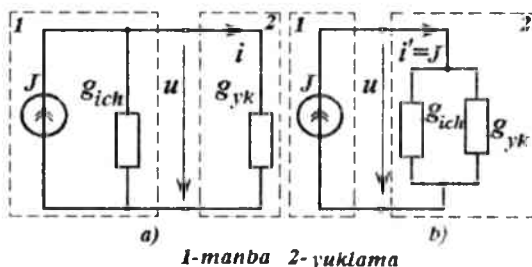
Tok manbalari qatoriga shunday elektromagnit energiya manbalari kiradiki, ularda tokning miqdori yuklama klemmlaridagi shu tok hosil qilayotgan kuchlanish u ga bog'liq bo'lmaydi yoki taxminan bog'liq emas. Kelgusida ushbu manba tokini J harfi bilan belgilashga shartlashamiz. Tok manbai juda kichik bo'lgan shunday ichki o'tkazuvchanlikka g_{ich} ega bo'ladiki, unda yuklamaga kelayotgan $i = J - u g_{ich}$ tok, yuklamaning kuchlanishi u noldan u_{nom} nominalgacha o'zgarganda, deyarli o'zgarmaydi, deb faraz qilinadi. 2.10-rasmda $J = \text{const}$ va $g_{ich} = \text{const}$ bo'lgandagi tok manbaining

chiziqli tashqi tavsifi $i = f(u)$ keltirilgan. Shu yerda $J = \text{const}$, $g_{ich} = 0$ va $i = J = \text{const}$ bo'lgandagi ideal tok manbaining tavsifi ham keltirilgan.

Agar $g_{ich} \neq 0$ bo'lgan real manbaning tarkibidan (2.11,a-rasm), shartli ravishda, uning g_{ich} ichki o'tkazuvchanligini manbadan chiqarib olinsa va yuklama g_{yuk} o'tkazuvchanligiga qo'shilsa (2.11,b-rasm), u holda ideal tok mansiga ega bo'lgan zanjir hosil bo'ladi. Chiziqli elektr zanjirlarini o'rganganimizda tok manbalari chiziqli tavsifga ega, deb hisoblaymiz. Bunday manbalar qatoriga, masalan, moddaning radioaktiv emirilishida ajralib chiquvchi zaryadlangan zarrachalarning nurlanishiga asoslangan (bunda manbaning toki emirilish tezligiga bilan aniqlanadi) energiya manbalari kiradi.



2.10-rasm. Tok manbaining chiziqli tashqi tavsifi.

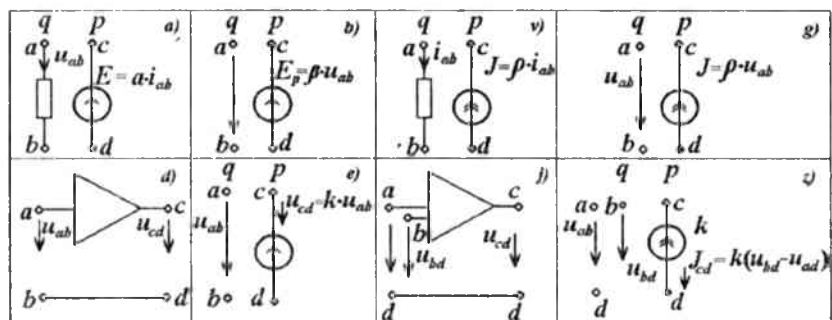


2.11-rasm. Ideal tok manbai.

EYK va tok manbalarining muhim turlariga bog'langan EYK manbalari va bog'langan tok manbalari kiradi. *Bog'langan elektr yurituvchi kuch manbalari* deb shunday manbalarga aytiladiki, ularda EYK zanjirning biror qismi tokiga yoki kuchlanishiga bog'liq bo'ladi. Aksariyat, bunday EYK manbalari *boshqariluvchi manbalar* deyiladi. Agar manba EYK qiymati tok (yoki kuchlanish)ga bog'liq bo'lsa, u holda bunday manba *tok (kuchlanish) bilan boshqariluchi* deyiladi.

Shunga o'xshash, tok zanjirining biror qismidagi tok yoki kuchlanishga bog'liq bo'lsa, bunda u *bog'langan tok manbai* deyiladi. Agar manba tokining miqdori kuchlanishga (yoki tokka) bog'liq bo'lsa, u holda bunday manba *kuchlanish (yoki tok) bilan*

boshqariluvchi tok manbai deyiladi. Boshqariluvchi manbaning *EYK* yoki tokining qiymatlari berilganda, ular bilan birga boshqariluvchi va boshqaruvchi qiymatlar orasidagi proporsionallik koeffitsiyentlari hamda shartli musbat yo'nalishlari va boshqaruvchi qiymatning joylashgan nuqtasi berilishi shart. 2.12-rasmda har xil bog'langan manbalarning belgilash sxemalari keltirilgan: tok bilan boshqariluvchi bog'langan *EYK* manbai (2.12,a-rasm); kuchlanish bilan boshqariluvchi bog'langan *EYuK* manbai (2.12,b-rasm); tok bilan boshqariluvchi bog'langan tok manbai (2.12,v-rasm); kuchlanish bilan boshqariluvchi bog'langan tok manbai (2.12,g-rasm).



2.12-rasm. Har xil bog'langan manbalarning belgilash sxemalari.

Ushbu 2.12-rasmda α koeffitsiyent qarshilikning o'lchamiga ega, β , ρ - koeffitsiyentlar o'lchamsiz qiymatlar, η - koeffitsiyenti o'tkazuvchanlik o'lchamiga ega. Manbaning *EYK* yoki toki yo'nalishi o'zgarmasdan, boshqaruvchi tok yoki boshqaruvchi kuchlanishning shartli-musbat yo'nalishlari o'zgarsa α , β , ρ , η koeffitsiyentlar oldidagi ishoralar o'zgaradi yoki barcha bog'lanishlarni minus ishora bilan yoziladi. Masalan, bog'langan manbaning *EYK*i 2.12,a-rasm keltirilgan yo'nalishda bo'lsin. Agar q shoxobcha toki b dan a ga tomon yo'nalgan bo'lsa, unda r shoxobcha *EYK* quyidagi ifoda bilan aniqlanadi $E_p = -\alpha \cdot i_{ba}$ yoki $E_p = (-\alpha) \cdot i_{ba}$.

Bog'langan manbaning misolida operatsion kuchaytirgichni olsak bo'ladi. Uning kirish va chiqish qiymatlari u_{ab} va u_{cd} bo'lsin

(2.12,*d*-rasm). Cheksiz katta kirish va cheksiz kichik chiqish qarshiliklariga ega bo'lgan operasion kuchaytirgichning ekvivalent sxemasi 2.12,*e*-rasmida keltirilgan. Kuchaytirgich kirish va chiqish kuchlanishlarining ishoralari qarama-qarshi bo'lganda, kuchaytirish koeffitsiyenti $-k$ deb qabul qilinadi va uni *inverterlovchi kuchaytirgich* deb ataladi.

Operatsion kuchaytirgichning kirishida birnecha kuchlanishlar ta'sir ko'rsatayotgan bo'lishi mumkin, ulardan ba'zilar inverterlovchi deb nomlangan kirishga ulanishi mumkin (2.12,*j*-rasm). Kirishlaridan biri inverterlovchi bo'lgan ikki kirishli operatsion kuchaytirgichning ekvivalent sxemasi 2.12,*z*-rasmida keltirilgan. Bunday vaziyatlarda chiqish tokining kirish kuchlanishlarga bog'liqligi quyidagicha aniqlanadi:

$$J_{cd} = k(u_{bd} - u_{ad}).$$

2.6. Elektr zanjirlarining sxemalari

Elektr zanjirlari chizmalarda sxemalar shaklida tasvirlanadilar. *Elektr sxema* - zanjir elementlarining asosiy belgilanishini qabul qilib chizilgan, shu elementlarning o'zaro ulanishlarini ko'rsatadigan, elektr zanjirlarining grafik tasvirini ifodalaydigan shakldir.

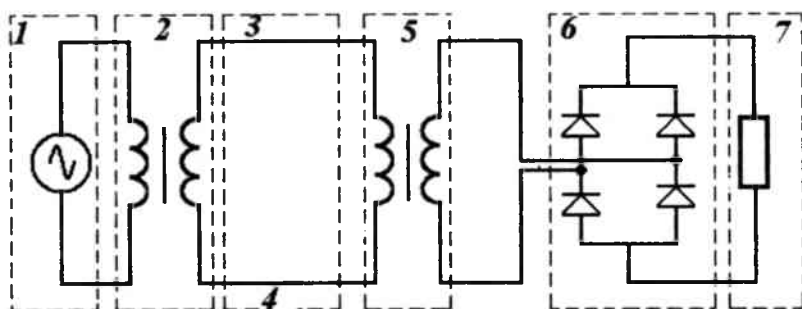
Masalan, 2.13-rasmida tarkibiga quyidagi elementlar kirgan aloqa tizimi elektr ta'minotining elektr sxemasi keltirilgan: 1 – o'zgaruvchan tok manbai (generator), 2 va 5 – transformatorlar, 3 va 4 – elektr uzatish liniyalari, 6 - o'zgaruvchan tokni o'zgarmas tokka aylantiruvchi to'g'rilagich, 7 – telekommunikatsion tizim elektr qurilmasi yoki yuklama.

Elektr zanjirlaridagi jarayonlarni o'rganish uchun zanjir elementlaridagi tok va kuchlanishlar orasidagi bog'lanishlarni bilish zarur. Bu bog'lanishlar matematik ifodalar shaklida (masalan, $u = ir$, $u_L = +Ldi/dt$) bo'lishi mumkin. Bundan tashqari, ushbu bog'lanishlar elementlarning Volt-Amper tavsiflari (VAT), yoki boshqa tavsiflari sifatida berilgan bo'lishi mumkin.

Aksariyat, elementlarning bog'lanishlarini VAT, yoki boshqa tavsiflari yordamida berilishiga sabab – ushbu qurilmadagi fizik jarayonlarni yoki matematik ifodalar yordamida berishning

imkoniyatlari bo'lmaganligi, yoki tuzilgan tenglamalarni hisoblashning murakkabligi, yoki qurilmaning ichki tuzilishini bilmaslikdir. Bunday sharoitda qurilmaning tavsifini hosil qilish va uni ifodalashning yagona usuli – o'tkaziladigan eksperimentdir. Uning yordamida bizni qiziqtirgan nuqtalardagi tok kuchlanish, zaryad, magnit ilashuvlarini o'lchash va zarur tavsiflarni qurish imkoniyatlari vujudga keladi. Bunday tavsiflarning mavjudligi bog'lanishlarni u yoki bu aniqlikda matematik ifodalar yordamida yozish va elektr zanjiri jarayonlari tadqiqotlarini o'tkazish imkonini beradi.

Elektr zanjirining elementlaridagi tok, kuchlanish, zaryad, magnit ilashuvi kabi qiymatlari orasidagi bog'lanishlarni analitik ifodalar yordamida yozilishi – shu *elektr zanjirining matematik modelidir*. Masalan, $u=ir$ – rezistoring matematik modeli; $u_L = d\Psi/dt$ – ideal induktiv g'altakning matematik modeli; $u=ri+d(dL)/dt$ – real g'altakning o'ramlari orasidagi siljish tokini e'tiborga olmagandagi, yoki ketma-ket ulangan rezistor va ideal induktivlik g'altagidan iborat bo'lgan shoxobchaning tahmini matematik modeli. Aksincha, yuqorida keltirilgan matematik ifodalarga, ideal induktivlik g'altagi va rezistordan iborat elektr zanjiri mos bo'lishi mumkin.



2.13-rasm. Aloqa tizimi elektr ta'minotining elektr sxemasi.

Elektr zanjirining bunday ideallashtirilgan elementlari bo'lmish rezistor, kondensator, induktivlik g'altagi, induktiv bog'langan

g'altak, *EYK* va tok manbalarining shartli belgilanishlari 2.6, 2.7, 2.9 va 2.11-rasmlarda keltirilgan.

Toklar, kuchlanishlar, magnit ilashuvlari, zaryadlar va boshqa qiymatlar orasidagi matematik ifodalarga mos bo'ladigan, ideallashtirilgan r , L , C , M , E , J va boshqa elementlardan iborat elektr zanjirlarini keltirish mumkin. Shubhasiz, bunday ideallashtirilgan zanjirlarning sxemalari va real zanjir sxemalari o'zaro aynan bir xildir, chunki sxemaning har bir elementiga ideallashtirilgan zanjirning yagona elementi mos keladi.

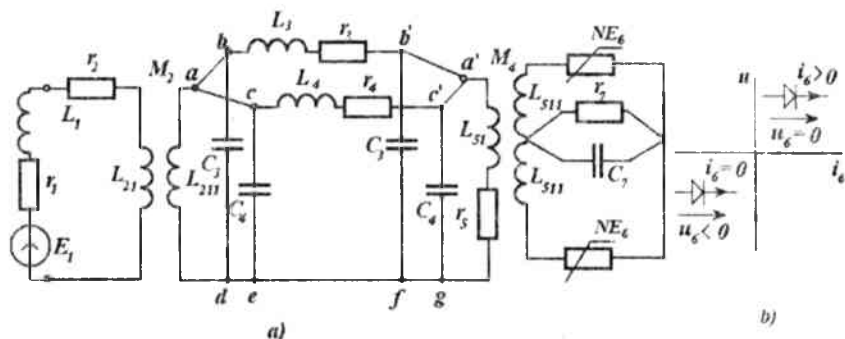
Misol sifatida sxemasi 2.13-rasmda keltirilgan zanjirni ko'raylik. Agar yuqorida keltirilgan mulohazalarni e'tiborga olsak, bu zanjirning biror almashtirish sxemasini (2.14-rasm) tuzish mumkin. Energiya manbai sifatida generator ishlatilayotgan bo'lsin. Bunday generator davriy *EYK* manbai hisoblanadi. Agar *EYK*ning va demak, tokning chastotasi past bo'lsa, generator chulg'amlarining o'ramlari orasidagi siljish tokini e'tiborga olmasa bo'ladi va bu chulg'amni induktivlik g'altagi va chulg'amning aktiv qarshiligi - rezistor sifatida ko'rish mumkin.

Ma'lum sharoitlarda real sxemaning xususiyatlarini aks ettiruvchi shunday boshqa zanjir sxemasi – *elektr zanjirining almashtirish sxemasi* yoki qisqacha – *almashtirish sxemasi* deyiladi.

Stator chulg'amida rotorning aylanayotgan magnit maydonidan induktivlanayotgan *EYK* ni ideal *EYK* manbai deb qabul qilamiz. Shunday qilib generatorning almashtirish sxemasi uch ideal elementlardan iborat bo'ladi: E_1 , L_1 , r_1 (2.14,a-rasm). Bu uch element ketma-ket ulangan bo'lishi zarur, chunki magnit maydon energiyasi $L^2/2$ ham, chulg'ani o'tkazgichlarida ajralayotgan energiya $r \cdot i^2$ isrofi ham, kuchlanish $r \cdot i$ ham chulg'am toki orqali ifodalanadi. Agar transformatorlardagi (2.13-rasmda 2, 5) ferromagnit elementlar energiya isrofini va noxiziqli xususiyatlarini e'tiborga olmasak, ikki induktiv bog'langan g'altaklar (L_{21} , L_{211} va M_2 2-transformator uchun va, mos ravishda, L_{51} , L_{511} va M_5 5-transformator uchun) sifatida ko'rilishi mumkin. Rezistor r_2 transformator chulg'amining aktiv qarshiligi. Uzatish liniyalari 3 va 4 mazkur chastota uchun quyidagi mulohazalar bo'yicha sxemaga kiritilgan r , L , va S elementlar majmuasi shaklida almashtirish sxemasiga kiritilgan. Liniyadagi tok yo'li va u bilan bog'liq bo'lgan

magnit maydoni va energiya isrofi, ketma-ket ulangan L_3 , r_3 va L_4 , r_4 elementlar shaklida ko'rsatilgan. Elektr maydoni energiyasi mavjudligi liniya kuchlanishi bilan aniqlanadi va liniya boshida va liniya ketida ulangan ikki kondensator bilan (3-liniya uchun S_3 va 4-liniya uchun S_4) hisobga olinadi. Yoki boshiga, yoki ketiga – bitta kondensator ulasa ham bo'lar edi. Bu holda liniyadagi energiya isrofi va liniyaning boshi va ketidagi kuchlanishlar farqini o'zgarmasdan qoldirish uchun, liniyaning r va L parametrlari korrektsiyalangan bo'lishi zarur bo'ladi.

O'zgaruvchan tokni o'zgarmas tokka aylantirishda volt-ampere tavsiflari (VAT) 2.14, b-rasmda keltirilgan nohiziqli elementlar NE_6 ning alohida xususiyatlaridan foydalanilgan. Ushbu VAT yordamida o'zgaruvchan tokning to'g'rilanishi amalga oshiriladi. Yuklama r_7 qarshilik va S_7 kondensator mavjudligi bilan hisobga olinadi. S_7 kondensatorning mavjudligi rezistordagi tokning shaklini tekislaydi va pulsatsiyani kamaytiradi.



2.14-rasm. O'zgaruvchan tokni o'zgarmas tokka aylantirish.

Sxemasi 2.13-rasmda berilgan elektr zanjiridan almashtirish sxemasiga (2.14, a-rasm) o'tishda sxemaning tashkil etuvchilari bo'lmish, alohida elementlarining almashtirish sxemalari asos bo'ldi.

2.14, a-rasmdagi sxemaning har bir alohida elementi uchun tok, kuchlanish, zaryad va magnit ilashuvlari orasidagi bog'lanishlarni analitik ifodalar yoki grafik shaklda aniqlash mumkin. Sxema

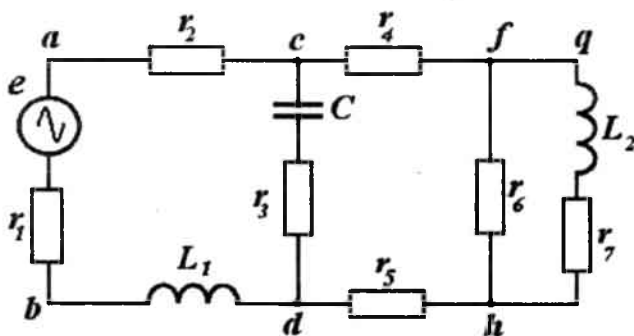
elementlarining matematik ifodalarini va, demak, almashtirish sxemalarini tuzish – muhandis uchun shunday nozik masaladirki, uning to‘g‘ri va aniq yechimi elektromagnit jarayonlarining xususiyatlarini chuqur tushunishni, umumiy holda magnit maydoni taqsimlaganligi masalalarini yechish yo‘llarini bilishni talab qiladi.

Kelgusida, agar maxsus talablar qo‘yilmagan bo‘lsa, elektr sxemasi va keltirilgan sxemasi bir hil bo‘lgan, ideallashtirilgan elementli sxemalarga tatbiq etish uchun «elektr zanjiri» atamasini ishlatamiz.

Elektr zanjirlari va, demak, ular sxemalari umumiy holda shoxobchalar va tugunlardan iborat.

Elektr zanjiri sxemasining shoxobchasi deb zanjirning shunday qismiga aytiladiki, uning ixtiyoriy bo‘lagida tokning miqdori doimo bir xil bo‘ladi.

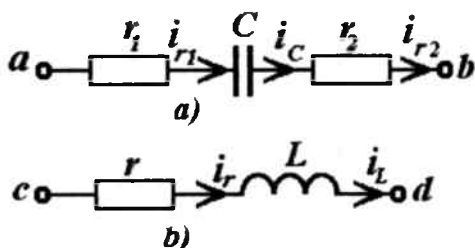
Shoxobcha tarkibida ixtiyoriy miqdordagi ketma-ket ulangan qarshilik, kondensator, induktivlik elementlari, EYK manbalari bo‘lishi mumkin. Bunga misol sifatida 2.15-rasmdagi sxemani keltirish mumkin. Unda sxemaning d nuqtasidan c nuqtasi tomon L_1 , r_1 , e va r_2 elementlari bo‘ylab yursak, shu elementlarning har biridan bir xil tok oqishini ko‘ramiz. Demak, sxemaning $d - L_1 - r_1 - e - r_2 - c$ bo‘lagi shoxobcha ekan. Shu ds oraliqni $d - r_3 - C - s$ bo‘ylab yursak, yana bir shoxobchani ko‘ramiz. Ushbu sxemada yana $c - r_4 - f$, $f - r_6 - h$, $q - L_2 - r_7 - h$ va $d - r_5 - h$ shoxobchalar ham mavjud. Demak, har bir shoxobchadagi elementlar o‘zaro ketma-ket ulangan ekan.



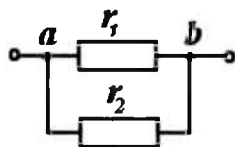
2.15-rasm. Murakkab ulanishli elektr zanjiri.

Bunda elektr zanjiri elementlarining ketma-ket ulanganini deb shunday ulanishiga aytiladiki, unda bir elementning keti ikkinchi elementning boshiga ulanadi, demak zanjir shu ulangan bo'lagining har bir elementidan oqayotgan tok bir xil bo'ladi.

Ketma-ket ulangan elementlarga misol sifatida 2.16-rasmda keltirilgan sxemalarni ko'rib chiqaylik. Unda $a - b$ oraliqda r_1 , C va r_2 elementlari ketma-ket ulangan (2.16,a-rasm); bunda uchchala elementning toklari $i_{r1} = i_C = i_{r2}$ o'zaro teng. Ikkinchi shoxobchada esa c va d nuqtalari orasida r va L elementlari ketma-ket ulangan va $i_r = i_L$ (2.16,b-rasm).



2.16-rasm. Ketma-ket ulangan elementlar.



2.17-rasm. Parallel ulangan zanjir.

Elektr zanjirining tugunlari deb shoxobchalarning ulangan nuqtalariga aytiladi. Tugun elektr sxemasida nuqta bilan belgilanadi. Misol sifatida 2.15-rasmdagi sxema ko'rilsa, unda c , d , f , va h nuqtalar tugun deyiladi.

Elektr zanjiri shoxobchalarining parallel ulanishi deb shunday ulanishga aytiladiki, unda barcha shoxobchalar boshlari zanjirning bir tuguniga, shoxobchalar ketlari esa boshqa tuguniga ulanadi va bunda barcha shoxobchalarda kuchlanishlar bir xil bo'ladi.

Shoxobchalari parallel ulangan zanjir sxemasi 2.17-rasmda keltirilgan.

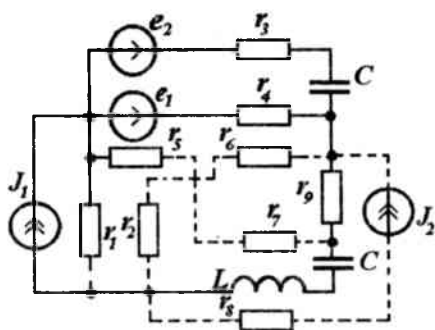
Shoxobchalari aralash ulangan elektr zanjirida ketma-ket va parallel ulanishlar birgalikda bajariladi, ya'ni sxemaning bir qismi parallel, boshqa qismi ketma-ket ulanadi.

Aralash ulangan zanjir uchun 2.15-rasmdagi sxema misol bo'la oladi. Unda ketma-ket ulangan r_7 qarshilik va L_2 induktivlik f va h nuqtalarda r_6 qarshilikka parallel ulanadi. Ular, o'z navbatida, qo'shib, natijaviy qarshilik hosil qiladi va r_4 va r_5 qarshiliklarga ketma-ket ulanadi. O'z navbatida r_7 , L_2 , r_6 elementlar r_4 va r_5 qarshiliklarga qo'shib, ketma-ket ulangan S va r_3 shoxobchaga s va d nuqtalarda parallel ulanadi.

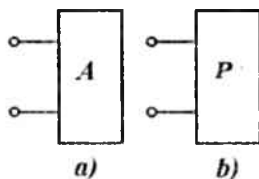
Elektr zanjirini tekislikda sxema shaklida kesishmaydigan shoxobchalar yordamida tasvirlash mumkin bo'lsa, unga *yassi* (*planar*) elektr zanjiri deyiladi. Bunga misol sifatida 2.18-rasmda tasvirlangan elektr zanjiri sxemasini keltirish mumkin. Bu sxemaning shtrixli qismini rasmdan olib tashlasak, planar zanjiri hosil bo'ladi. Sxema kesishgan shoxobchalar yordamida tasvirlansa, unda *yassi bo'lmagan* (*noplanar*) elektr zanjiri hosil bo'ladi. Unga misol bo'lib shu rasmdagi sxema shtrixli elementlari bilan xizmat qila oladi.

Elektr zanjiri kontu-ri deb, birnecha shoxobchalar-dan o'tgan ixtiyoriy berk yo'lga aytiladi. Bunga misol qilib 2.15-rasmdagi *abdc*, *cdhfs* va *fghf* konturlarni olishimiz mumkin.

Ikki qutbga ega bo'lgan elektr zanjiri ikkiqutblik deb ataladi. 2.19-rasmda ikkiqutblik shartli ravishda to'g'ri to'rtburchak shaklida tasvirlangan. Zanjirning butun qismini bitta ikkiqutblik deb qarash natijasida zanjir shu qismining umumiy xususiyatlarini aniqlash mumkin. Ikkiqutblik aktiv (2.19,a-rasm) va passiv (2.19,b-rasm) turlarga bo'linadi. Ikkiqutblik tarkibida elektr energiya manbai mavjud bo'lsa, *aktiv ikki qutblik* deyiladi. Chiziqli aktiv ikkiqutblik uchun yana uning uzilgan klemmalarida ikkiqutblik ichidagi manba sababli kuchlanishning mavjudligi - qo'shimcha sharti qo'yiladi, ya'ni ushbu manbalarning ta'sirlari ikkiqutblik ichida kompensatsiyalanmasligi zarur. *Passiv ikki qutblik* deb tarkibida elektr energiya manbalari bo'lmagan ikki qutblikka aytiladi. Manbalari o'zaro kompensatsiyalanib, ikkiqutblikning ikki uzilgan klemmalarida kuchlanish bo'lmasa, chiziqli ikki qutblik tarkibida elektr energiya manbalari mavjudligi joiz bo'ladi.



2.18-rasm. Yassi (planar)



2.19-rasm. Ikkiqutblik elementlar

Passiv ikki qutblik bo'la turib, uning tarkibida o'zaro kompensatsiyalanuvchi manbalar mavjud bo'lishining mumkinligi haqidagi shart – bu zaruratdir. Chunki zanjirning bir butun qismini ikkiqutblik bilan almashtirish g'oyasi, shu qismning umumiy hususiyatlarini uning faqat tashqi klemmlariga nisbatan o'rganilishini nazarda tutadi. Ushbu shart faqat chiziqli zanjirlargagina taalluqlidir, chunki nochiziqli zanjirlarda bunday kompensatsiya faqat bitta yoki faqat birnecha rejim uchun olinishi mumkin va boshqa rejimlar uchun olinishi mumkin bo'lmaydi.

2.7. Elektr zanjiri sxemasining topologiyasi, sxema grafi

Tugunlar zanjirning elektr sxemalarida yoki almashtirish sxemalarida nuqtalar yordamida tasvirlanadi. Murakkab sxemalarda, elementlar orasida ulanish o'tkazgichlarining o'zaro kesishishlari mavjud bo'lganda, ular orasida elektr bog'lanish mavjudligini belgilashda ham nuqtalar ishlatiladi (masalan, 2.14,a-rasmdagi sxemada $a, b, c, d, e, f, g, a', b'$ va c' nuqtalar). Rasman, shu barcha nuqtalarni tugunlar deb hisoblash mumkin. Bunday mavhum tugunlarning xususiyatlari shundan iborat bo'ladiki, ulardan tok oqib o'tib, qarshiliklari nolga teng bo'lganligi uchun ulardagi kuchlanishlari nolga teng bo'lgan bo'laklar bilan ulangan. Shu sababli bunday tugunlar potentsiallari teng; sxema shaklini biroz o'zgartirib, ularni bitta tugun bilan belgilash mumkin. 2.14,a-rasmdagi sxemada a, b, c tugunlarni bitta tugunga (2.20-rasmda

3-tugun), a' , b' va c' tugunlarni – boshqa bir (4-tugun), d , e , f , g – yana boshqa (5) tugunga birlashtiramiz.

Sxema shoxobchalarining o'zaro ulanishlarini tasvirlashda yanada yaqqollik hosil qilish uchun, elektr zanjirining shunday tasvirini kiritish maqsadga muvofiq bo'ladiki, unda sxemaning shoxobchalari kesmalar bilan – graf shoxobchasi, tugunlari – nuqta bilan – graf tuguni tasvirlanadilar. Elektr zanjiri sxemasining bunday topologik tasviri *elektr sxemasining grafi* yoki *sxema grafi* deb nomlanadi.

E'tibor beraylik, topologik sxemada *EYK* va tok manbalari tasvirlanmaydi. Ideal tok manbai bo'lgan shoxobchalar topologik sxemaga unuman kirmaydilar, chunki bunday manbalarning ichki o'tkazuvchanligi nolga teng demak, bunday shoxobchalarning qarshiligi cheksizlikka teng.

Juft tugunlari orasida shoxobcha yoki shoxobchalar majmuasi bo'lgan *graf bog'langan* deyiladi. Agar grafda toklarning yoki kuchlanishlarning shartli-musbat yo'nalishiari strelkalar bilan belgilangan bo'lsa, u holda bunday graf *sxemaning yo'naltirilgan grafi* deyiladi.

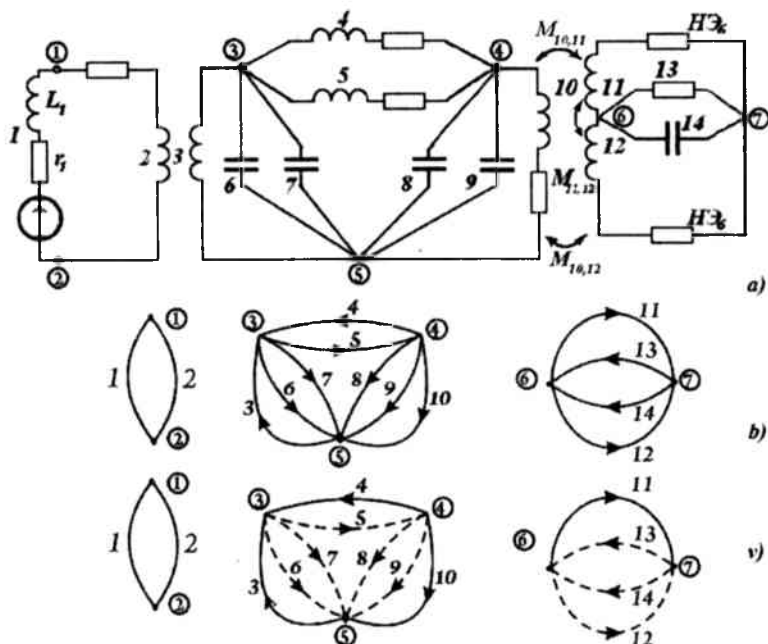
2.20,*a*-rasmdagi sxemaning yo'naltirilgan grafi 2.20,*b*-rasmda keltirilgan. O'zaro induktivlik *EYK*ni e'tiborga olish o'zgacha bo'lishi sababli, sxemaning (2.20,*a*-rasm) grafi uchta alohida, ya'ni bog'lanmagan qismlarga ajraladi.

Bundan buyon sxema grafidagi tugunlarni shu tugun yonida joylashgan doira ichidagi raqamlar bilan belgilashga, shoxobchalarni – doirasiz raqamlar bilan belgilashga shartlashamiz. Sxema grafida (2.20,*b*-rasm) 7 tugun va 14 shoxobcha mavjud.

Sxema grafining muhim topologik tushunchasi – *sxema grafining daraxtidir*. Sxema grafining daraxti – grafning barcha tugunlarini kontur hosil qilmasdan birlashtiruvchi ixtiyoriy shoxobchalar majmuasini tasvirlaydi. Birgina sxema grafi har xil daraxtlarga ega bo'lishi mumkin. Daraxtni tashkil etuvchi sxema graflarini qalin chiziqlar bilan tasvirlaymiz. Daraxt grafini to'la grafga to'ldiradigan, demak, graf daraxtiga kirmaydigan shoxobchalar *sxema grafi bog'lamlari* deyiladi. Bunday shoxobchalarni yoki punktir chiziq bilan, yoki ingichka chiziq bilan tasvirlaymiz. Shu fikr aniqki, sxema grafining har bir daraxtiga

sxema ko-grafi, yoki *to'ldiruvchi sxema grafi* deb nomlangan, o'zining *sxema grafi bog'lamlari majmuasi* mos keladi. Masalan, 2.21.b-rasmdagi graf uchun uning to'ldiruvchi graflariga - *ab*, *bf*, *fd*, *da* va *bd* tugunlarni tutashtiruvchi shoxobchalar (graf bog'lamlari) kiradi. 2.20.v-rasmda sxema grafi daraxti majmualaridan biri ajratib ko'rsatilgan.

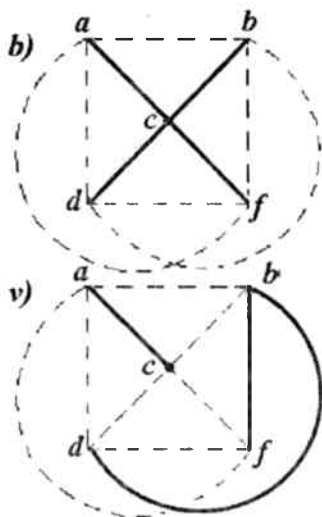
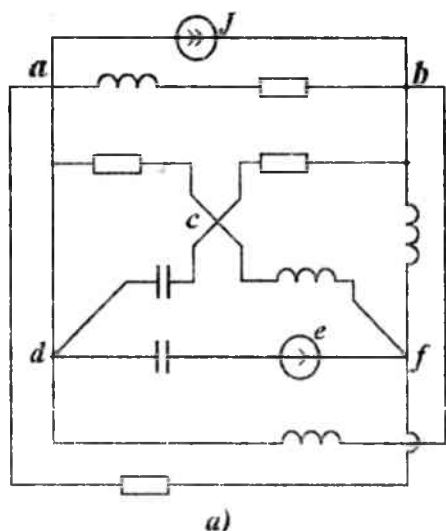
2.21-rasmda zanjirning elektr sxemasi (*a*) va shu sxema grafi ikki har xil daraxtlari bilan keltirilgan (*b* va *v*).



2.20-rasm. Sxema va uning yo'naltirilgan graflari.

Agar bog'langan graf p shoxobcha va q tugunga ega bo'lsa, u holda uning daraxti $q-1$ shoxobchaga ega bo'ladi, bog'lamlar soni esa $n = p - (q-1)$ bo'ladi. Ushbu ta'kidlashlar daraxt va sxema grafi bog'lamlarining ta'riflari asosida kelib chiqadi, chunki sxemaning q shoxobchalari daraxtning kamida $q-1$ shoxobchasi bilan ulanishi mumkin, bog'lamlarga esa sxema grafining qolgan barcha $p-(q-1)$

shoxobchasi kiradi. Masalan, 2.20,v-rasmda keltirilgan bog'lanmagan sxema grafining ayrim qismlarida quyidagilar mavjud: grafning chap qismida $r = 2$, $q = 2$, $n = 2 - (2-1)$; o'rta qismida $p = 8$, $q = 3$, $n = 8 - (3 - 1) = 6$; o'ng qismida $p = 4$, $q = 4 - (2-1) = 3$.



2.21-rasm. Elektr zanjir sxemasi va uning sxema yunaltirilgan graflari sxemalari.

E'tiborni shunga qaratish kerakki, ushbu qiymatlar to'lik sxema grafi uchun berilmagan. Darhaqiqat, to'lik sxema grafi uchun quyidagilarga ega bo'lamiz: $r = 14$, $q = 7$, $n = 14 - (7-1) = 8$, ammo bog'lanishlar soni $1 + 3 + 6 = 10$. Topologik nuqtai nazardan bog'lanmagan (ammo elektromagnit yoki boshqa jarayonda bog'langan) sxema graflari uchun bog'lamlar soni $n = r - (q - 1) + N - 1 = r - q + N$ ga teng, bunda N – sxema grafining topologik bog'lanmagan alohida qismlari soni. Ushbu holat uchun $N = 3$, shuning uchun $n = 14 - (7 - 1) + 3 = 10$. 2.21-rasmdagi sxema uchun $p = 10$, $q = 5$, $n = 6$.

2.8. Elektr zanjirlarining tahlili va sintezi

Elektr zanjirlari nazariyasining vazifalarini berilgan boshlang'ich materiallar va ko'zlanayotgan natijaviy maqsadlar bo'yicha o'zaro zid ikki guruhga bo'lish mumkin – *elektr zanjirlarining tahlili masalalari va elektr zanjirlarini sintez qilish masalalari*.

Tahlil qilishning asosiy maqsadi – berilgan elektr zanjirida elektr jarayonlarni hisoblashdir, ya'ni zanjirning tuzilishi, barcha elementlari tavsiflari, mavjud EYuK va tok manbalarining o'zgarish qonuniyatlari berilgan bo'lib, zanjir alohida elementlarining toklari va kuchlanishlari o'zgarishini aniqlash hamda hisoblangan qiymatlar joiz (ruxsat etilgan) qiymatlarga mos ekanligini bilishdir.

Sintez qilishning asosiy maqsadi (tahlilga teskari masala) – elektr jarayonlarining berilgan o'zgarish qonuniyatiga javob beruvchi elektr zanjiri zaruriy tuzilmasini - sxemasini, elementlari parametrlarini va kerakli tavsiflarini hosil qilishdir. Masalan, ikki kirish va ikki chiqish klemmalari berilgan shunday zanjirni tuzish zarur bo'lsinki, bunda shu zanjir kirishidagi kuchlanishning vaqt bo'yicha oldindan ma'lum bo'lgan qonuniyat bilan o'zgarishida, zanjirning chiqish qismida vaqt bo'yicha oldindan ma'lum bo'lgan qonuniyat bilan o'zgaruvchi muayyan kuchlanishni hosil qiluvchi zanjir sxemasi taklif etilishi zarur bo'lsin. Boshqacha qilib aytganda, shunday zanjirni sintez qilish (tuzish) zarurki, bu zanjirning kirish kuchlanishi berilgan shaklini, zanjir chiqishidagi kuchlanish shakli sifatida bizning xohishimiz yo'nalishida o'zgartirish qobiliyatiga ega bo'lsin. Bunday vazifalar, masalan, telekommunikatsiya, televidenie va avtomatikada muhim bo'lgan ma'lum ko'rinishdagi impulslarni o'zining chiqish klemmalarida shakllantiruvchi elektr zanjirlarini barpo etishda, yoki hisoblash va boshqarish elektron mashinalarini qurishda zarur bo'lgan ba'zi arifmetik yoki mantiqiy operatsiyalarni bajarish jarayonida muhim ahamiyatga ega.

Sintez vazifasini yechish birnecha usullarda bajarilishi mumkin. Bu vazifa bir qator zanjirlarni tahlil qilib, ulardan mosroq bo'lganini tanlab, optimal variant zanjirini aniqlash bilan yechilishi mumkin. Vazifa bunday qo'yilishining o'zidayoq, optimal zanjirning javob berishi lozim bo'lgan talablarini ishlab chiqish masalasi paydo bo'ladi. Sintez vazifalari, aksariyat, nar xil qurilmalarni

loyihalashda vujudga kelishini e'tiborga olsak, u holda zanjirning optimallik talablari oldindan berilishi yoki oldindan ishlab chiqilishi shart. Bu talablar ham iqtisodiy, ham texnologik xarakterga ega bo'lishi mumkin, ya'ni ular hosil qilinishi zarur bo'lgan zanjirning massasi, tashqi o'lchamlari, narxi, qanday elementlardan tashkil etilishini tartibga solinishi mumkin. Bundan tashqari, texnik va texnologik talablarni ishlab chiqishda, sintez qilinayotgan zanjir tavsiflarining oldindan berilayotgan tavsiflarga nisbatan joriy bo'lgan og'ishiarining sifat va miqdoriy talablari berilishi shart. Ushbu keltirilgan barcha talablar qoniqtirilgandagina izlanayotgan zanjirni ishlab chiqishning optimal variantini aniqlash mumkin.

Yuqorida ko'rsatilganidek, elektr zanjirlarini sintez qilish zanjirlarning umumiy xususiyatlariga asoslanadi, bu xususiyatlar esa zanjirlarni tahlil qilish yo'li bilan tekshiriladi. Shuning uchun zanjir sintezidan avval uning tahlili bo'lishi zarur. Bu chiziqli va nochiziqli zanjirlar uchun bir xil darajada taalluqlidir. Darhaqiqat, parametrlari na tokka va na kuchlanishga bog'liq bo'lmagan elementlardan tuzilgan chiziqli elektr zanjirlarini tahlil va sintez qilish masalalari nazariy ishlanmalarga osonroq bo'ysunadi. Aynan shu masalalarga darslikning to'rtinchi – sakkizinchi boblari bag'ishlangan. U yoki bu shakldagi tavsiflarga ega bo'lgan nochiziqli elementlar qo'llanganda zanjirlar sintezining imkoniyatlari tubdan ortadi. Nochiziqli elektr zanjirlarining tahliliga darslikning o'n oltinchi bobi bag'ishlangan, unda nochiziqli zanjirlarning xususiyatlari va ularni hisoblashning ba'zi usullari keltiriladi. Har xil nochiziqli zanjirlarni tahlil qilish jarayonida olingan natijalar asosida, elektr zanjirlarini sintez qilishda u yoki bu nochiziqli elementlarni qo'llash imkoniyatlari haqida bilvosita xulosalar qabul qilish mumkin.

Yuqorida zarur bo'lga zanjirlarni tanlash va tahlil qilish yo'li bilan sintez masalasini hal qilish mumkin deyilgan edi. Biroq, bu fikr eng sodda zanjirlar uchun yaroqli bo'lsa, murakkabroq zanjirlar sintezida maqsadga muvofiq emas. Sintez qilinishi mo'ljallanadigan umumiy holdagi aksariyat murakkab zanjirlar xususiyatlarini tahlil qilish masalasi, bir qator variantlarning tadqiqotini bajarish zarurligi uchun, anchagina ko'p mehnat sarflanadigan murakkab masala hisoblanadi. Sintez usullarini qo'llash natijasida, zanjirlarning

umumiy xususiyatlaridan kelib chiqib, oldindan berilgan tavsiflarga ega bo'lgan zanjirlarning tarkibini ham, zanjirlar parametrlarini ham analltik usulda hisoblash imkoniyatlarini beruvchi tavsiyalar olish mumkin.

Analltik yechimlar natijasida hosil qilingan zanjirlar u yoki bu iqtisodiy yoki texnologik talablarga javob bermasligi mumkin. Shuning uchun, sintez qilish natijasida hosil bo'lgan zanjirlarni ekvivalent o'zgartirish muammosi kelib chiqadi, ular natijasida zanjir tavsiflari o'zgartirilmasdan, zanjir strukturasi va elementlar tarkibi o'zgartiriladi. Ba'zi hollarda, sintez usullarini qo'llashning boshlanishlda, berilgan tavsiflardan joiz chegaralarda og'ish sharti bilan, bu shartlarni bajarish mumkin. Bu izlanayotgan zanjir xususiyatlarini ifodalovchi funksiyalarni tanlash bilan amalga oshiriladi. Shu ta'riqa tanlab olingan funksiyalar, tarkibidagi elementlarini u yoki bu kombinatsiyada o'z ichiga olgan zanjirlarni sintez qilish imkoniyatini tug'diradi. Shu nuqtai nazardan, sintez - zanjirning oldindan berilgan xususiyatlari matematik ifodalarining ko'proq to'g'ri keladiganini tanlash muammosini o'z ichiga oladi.

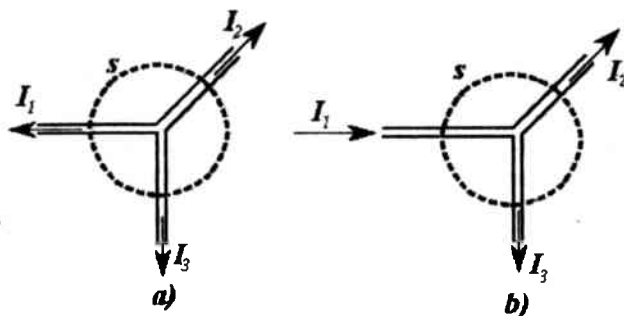
3. O'ZGARMAS TOK ELEKTR ZANJIRLARINI TAHLIL QILISHDA ASOSIY QONUNLAR VA USULLAR

3.1. Elektr zanjirlar uchun Kirxgof va Om qonunlari

O'rganish jarayonini qulay va ko'rgazmali bo'lishi maqsadida ushbu bobda tarkibida reaktiv elementlari (C sig'im, L induktivlik va M o'zaro induktivlik) bo'lmagan, faqat R omik qarshiligi mavjud bo'lgan o'zgarmas tok zanjirlarining barqarorlik jarayonlarini ko'ramiz. Darhaqiqat, ushbu shartlar bajarilganda $d/dt = 0$ bo'ladi va, demak, shoxobchaga kondensatorning ulanishi – shu shoxobchani uzilishini ($i = C du_C / dt = 0$ bo'lganligi uchun) anglatadi, induktivlikning mavjudligi esa ($u_L = L di/dt = 0$ bo'lganligi uchun) sezilsiz deb hisoblanadi. Undagi tok, e.yu.k., kuchlanishlarni belgilaganda bosh harflardan foydalanamiz (I, E, U). Biroq, bu bobdagi ayrim xulosalarni keyingi boblarda ko'riladigan o'zgaruvchan tok zanjirlariga ham tatbiq etish mumkin bo'lganligi uchun, bunda o'zgaruvchilarning oniy qiymatlarini belgilashda kichik (i, e, u va h.k.) harflardan foydalanamiz.

Elektr zanjirlarini hisoblaganda Kirxgof, Om qonunlari, almashtirish teoremasi qo'llaniladi. Ularni mujassamlangan parametrlar zanjirlarini hisoblashda ko'rib chiqamiz.

Kirxgofning birinchi qonuni - elektr (zaryad) miqdori saqlanish qonunidan kelib chiquvchi natijadir; undanda ko'ra ahamiyatliroq qilib aytganda - bu qonun *energiya saqlanish qonunining* elektr zanjirlari «tilidagi» ifodasidir: zanjirning *bir tuguniga shoxobchalardan keluvchi barcha toklar yig'indisi, ushbu tugundan chiqib ketayotgan barcha toklar yig'indisiga teng*. Albatta, bu fikrlar faqat o'tkazuvchanlik tokiga taalluqli bo'lib, siljish va ko'chish toklari yo'q yoki juda kichik bo'lganligi sababli, e'tiborga olinmaydi, deb hisoblanganda haqlidir. Shuning uchun zanjirning tugunini berk yuza s bilan o'rab olamiz (3.1, a-rasm).



3.1-rasm. Kirxgofning birinchi qonuni.

Qabul qilingan farazlarga muvofiq, mujassamlangan parametrlı zanjirlardagi barcha sig'ımlar zanjirdagi mavjud kondensatorlarda mujassam bo'lgan. Bu zanjir elementlariga ulangan o'tkazgıchlardan zanjirning boshqa qismlariga elektr siljish toklarining o'tishini e'tiborga olmaslikka mos keladi. Demak, berk yuza s orqali shu yuzani kesib o'tayotgan o'tkazgıchlardagi faqat o'tkazuvchanlik toklari oqib o'tadi, deb qabul qilamiz.

Tokning uzluksizligi prinsipi asosida, bu holat uchun quyidagi ifodaga ega bo'lamiz.

$$\oint_s J ds = I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

Zanjirning tuguniga ulangan ixtiyoriy p ta shoxobcha uchun

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad (3.1)$$

ya'ni, *elektr zanjirining tugunidagi toklar algebraik yig'indisi nolga teng*, mana shu Kirxgof birinchi qonunining ta'rifidir.

Kirxgofning birinchi qonuni chet tillardagi adabiyotlarda har xil nomlarda uchraydi, shulardan biri **Kirxgofning toklar qonuni**, yana biri **Kirxgofning tugunlar uchun qonuni** – elektr zanjirining tugunlaridagi toklar uchun qo'llaniladi va elektr tokining uzluksizligi prinsipiga asoslanadi. Kirxgof birinchi qonunining har xil nomlari ichida, uning mohiyatini aniqroq ifodalaydigani - Kirxgofning toklar qonuni (**KTQ**) nomidir. Kelgusida bu qonunni mana shu nomda ishlatamiz.

KTQ asosida tenglamalar tuzishni barcha shoxobchalarda toklarning shartli-musbat yo'nallishini aniqlash va ularni sxemada strelkalar bilan belgilashdan boshlash zarur. Toklarning musbat yo'nalishi tugundan boshlansa, (3.1) tenglamaning chap tomonidagi toklarning harfli belgilariga «plyus» ishorasini, musbat yo'nalishi tugun tomon yo'ngan bo'lsa, toklarning harfli belgilariga «minus» ishorasini qo'yiladi. 3.1,*a*-rasmdagi holatda tenglamaning barcha toklari uchun «plyus» ishora, 3.1,*b*-rasmdagi holat uchun esa quyidagicha yozish kerak:

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

Agar hisoblash natijasida biror tok vaqtning biror oni uchun musbat ishorali ($I_k > 0$) bo'lsa, demak, shu onda tokning yo'nalishi strelka ko'rsatishiga mos bo'ladi. Agar hisoblash natijasida $I_k < 0$ bo'lsa, demak, bu tokning yo'nalishi aslida strelkaga teskari yo'nalishda bo'ladi.

Kirxgofning ikkinchi qonuni elektr zanjirlari berk konturlari uchun qo'llaniladi. Bu qonun §1.3da qabul qilingan «zanjirning ixtiyoriy m va n juft tugunlari orasidagi kuchlanish shu nuqtalar potentsiallari ayirmasiga teng $u_{mn} = \varphi_m - \varphi_n$ » degan ta'rifdan kelib chiqadi

$$\oint E dl = \oint E_{ind} dl + \oint E_{tashqi} dl \quad (3.2)$$

Unga ko'ra berk konturni aylanib o'tishdagi har bir elementlar kuchlanishlarining algebraik yig'indisi nolga teng bo'ladi

$$\sum u_{mn} = 0.$$

(3.2)dagi $\oint E_{tashqi} dl$ qiymat konturga ta'sir etayotgan tashqi manbalar EYKlarining $\sum E_{tashqi}$ yig'indisidir. Tenglamaning $\oint E_{ind} dl$ tashkil etuvchisi tarkibiga esa konturdagi barcha induktivlanayotgan EYK lar – ham elektromagnit induksiyasi, ham o'zinduksiya, ham o'zaro induksiya asosidagi EYK lar kiradi. Masalan, g'altakdagi $e_L = L di / dt$ ni olaylik. Agar (3.2) ning birinchi tashkil etuvchisiga energiya manbai sifatida faqat generatorlardagi EYKlarning yig'indisi $\sum e_{ind}$ ni kiritsak, u holda g'altaklardagi induktivlanayotgan o'zinduksiya va o'zaro induksiya EYKlarini tenglamaning chap tomoniga o'tkazilishi va $\oint E dl$ ning tarkibiga kiritilib, g'altak klemmlaridagi kuchlanishlar pasayuvi sifatida e'tiborga olinishi

shart. Masalan, g'altak uchun tenglamaning chap tomonida $i_L = +L \frac{di}{dt}$ paydo bo'ladi. Chap tomondagi $\oint E dl$ tarkibiga konturga kiruvchi reostatdagi kuchlanishlar pasayuvi RI ham, kondensatordagi $u_C = q/C$ kuchlanishlar pasayuvi ham kiradi. Konturning barcha p shoxobchalaridagi energiya manbalari EYKlarining yig'indisini quyidagicha belgilaymiz:

$$\sum_{k=1}^{k=n} e_k = \sum_{k=1}^{k=n} e_{k \text{ tash}} + \sum_{k=1}^{k=n} e_{k \text{ ind}}$$

undan

$$\sum_{k=1}^{k=n} u_k = \sum_{k=1}^{k=n} e_k. \quad (3.3)$$

Shunday qilib, Kirxgofning ikkinchi qonuni quyidagicha talqin etiladi: *elektr zanjirining ixtiyoriy berk konturidagi barcha shoxobchalar kuchlanishlari pasayuvining yig'indisi, shu konturga ta'sir etayotgan energiya manbalari EYuK larining algebralik yig'indsiga teng.*

Agar, umumiy holda, zanjirdagi biror m va n tugunlar orasidagi k — shoxobcha tarkibida aktiv qarshiligi R_k bo'lgan rezistor, induktivligi L_k bo'lgan g'altak va sig'imi C_k bo'lgan kondensator mavjud (3.2-rasm) bo'lsa, u holda ushbu shoxobcha bo'ylab kuchlanishlar pasayuvi shu elementlarning kuchlanishlar pasayuvlari yig'indisiga teng bo'ladi

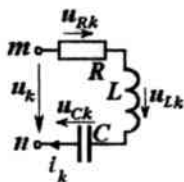
$$u_k = u_{Rk} + u_{Lk} + u_{Ck}. \quad (3.4)$$

unda

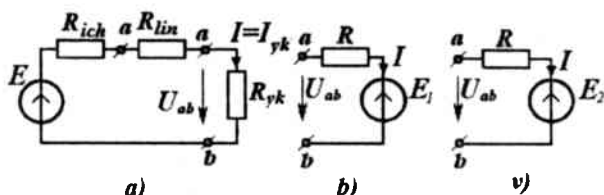
$$u_k = R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + \frac{q}{C_k} = R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + \frac{1}{C_k} \int_0^t i_k dt + u_{Ck}. \quad (3.5)$$

Kirxgofning ikkinchi qonuni asosida tenglamalar tuzish uchun barcha shoxobchalarning i_k toklari va energiya manbalarining EYKlari ye_k musbat yo'nalishlari berilgan bo'lishi shart. Kuchlanishlar u_k va i_k tokning musbat yo'nalishlariga mos deb hisoblaymiz. Shundan so'ng konturni aylanib chiqishning biror

yo'nalishini tanlab, kuchlanishlar $\sum_{k=1}^{k=n} u_k$ yig'indisi va EYKlar $\sum_{k=1}^{k=n} e_k$ yig'indisini tuzishda u_k va ye_k ning harfli belgilari oldiga «plyus» yoki «minus» ishoralarini qo'yish lozim. Agar u_k va ye_k qiymatlar musbat yo'nalishlari aylanish yo'nalishi bilan mos kelsa «plyus», aksi bo'lsa «minus» ishorasi qo'yiladi.



3.2-rasm. r, L, C elementlarni ketma-ket ulanishi.



3.3-rasm. Qarshiliklarni ketma-ket ulanishi.

Kirxgof ikkinchi qonunining har xil nomlari ichida, uning mohiyatini aniqroq ifodalaydigan - Kirxgofning kuchlanishlar qonuni (KKQ) nomidir. Kelgusida bu qonunni mana shu nomda ishlatamiz.

Om qonuni. Rezistiv qarshiliklari bo'lgan zanjirlar uchun siljish va ko'chish toklari nolga teng deb faraz qilamiz. Natijada, faqat o'tkazuvchanlik toklari e'tiborga olinayotgan 2.9,a-rasmdagi zanjir uchun keltirilgan (2.8) matematik ifoda manbaning E EYK bilan undagi yuklama toki I orasidagi bog'lanishni belgilagan bo'lsa, 3.3,a-rasmdagi ixtiyoriy ketma-ket ulangan qarshiliklar $\Sigma R = R_{ich} + R_{lin}$ uchun yuklama-dagi kuchlanish quyidagi ifoda bilan aniqlanadi. $U_{ab} = R_{yuk} \cdot I$, bunda, R_{lin} - manbadan yuklamagacha bo'lgan ixtiyoriy uzunlikdagi liniya o'tkazgichining qarshiligi. Bu ifodalarni (2.8)ga qo'ysak, yuklama kuchlanishining boshqacha ko'rinishini hosil qilamiz.

$$U_{ab} = E - \Sigma R \cdot I, \quad (3.6)$$

bundan tokni

$$I = (E - U_{ab}) / \Sigma R \quad (3.7)$$

ifoda bilan aniqlaymiz. (3.7) tenglama *Omning umumlash-tirilgan qonuni* deb ataladi.

Tanlangan musbat yo'nalishlar o'zgartirilganda, (3.7)dagi barcha hadlarning yoki ba'zi hadlarning ishoralari o'zgarishi mumkin; masalan, 3.3,b- va 3.3,v-rasmlarda tasvirlangan zanjirlarda, mazkur tenglamalar quyidagicha yoziladi

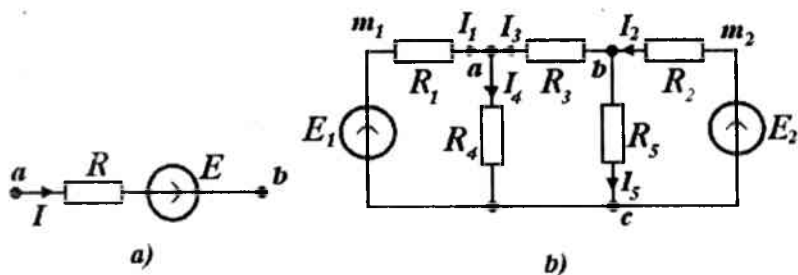
$$U_{ab} = E_1 + IR \quad \text{yoki} \quad I = (U_{ab} - E_1) / R; \quad (3.8)$$

$$U_{ab} = -E_2 + IR \quad \text{yoki} \quad I = (U_{ab} + E_2) / R; \quad (3.9)$$

Ushbu o'zgaruvchilar musbat yoki manfiy qiymatlarni ifodalashi ham mumkinligini eslatib o'tamiz.

Kuchlanish U_{ab} ni a va b nuqtalari (3.4,a-rasm) orasidagi potentsiallar farqi ekanligini e'tiborga olinsa, ya'ni uni φ_a va φ_b orqali ifodalansa, unda *umumlashtirilgan Om qonuni* boshqa ko'rinishni, masalan, (3.9) uchun quyidagi ko'rinishni oladi

$$I = (\varphi_a - \varphi_b + E_2) / R.$$



3.4-rasm. Om qonunini ko'rib chiqish uchun zanjir.

Elektr zanjiri elementidagi tok va kuchlanish orasidagi bog'lanish

$$U_{ab} = R \cdot I$$

zanjirning bir qismi uchun *Om qonuni* deyiladi.

Bir konturli zanjir uchun Om

qonuni quyidagi ko'rinishda bo'ladi

$$I = \Sigma E / \Sigma R,$$

yoki

$$\Sigma R \cdot I = \Sigma E, \quad (3.9,a)$$

bunda, ΣE – konturdagi EYKlar yig'indisi; ΣR – konturdagi qarshiliklar yig'indisi.

Masalan, 3.4,b-rasmdagi tashqi kontur uchun uni soat mili yo'nalishl bo'ylab o'tilganda (3.9) tenglama quyidagicha yoziladi.

$$R_1 I_1 - R_3 I_3 - R_2 I_2 = E_1 - E_2.$$

Harflar bilan belgilanayotgan qiymatlar, o'z o'rnida musbat yoki manfiy bo'llishi ham mumkin.

KKQ ifodasidagi $\Sigma R \cdot I$ va ΣE yig'indilar konturning bir qismi uchun ham, ya'ni a va b nuqtalar orasida uzilish paydo bo'lganda ham qo'llanilishi mumkin. Bunday holda tenglamaning chap tomoniga uzilgan nuqtalar orasidagi potentsiallar farqi kiritiladi.

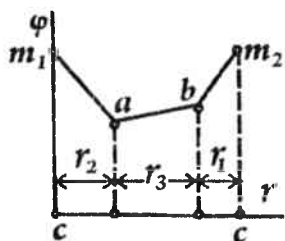
$$\Sigma R \cdot I + U_{ab} = \Sigma E, \quad (3.10)$$

bunda yuqorida ko'rilgan ishoralash qoidasidaga amal qilinadi.

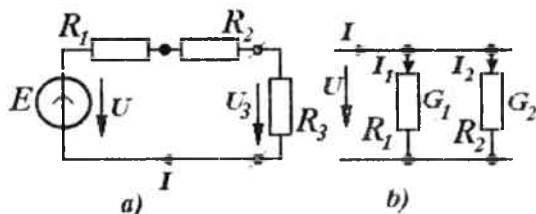
Keyingi ifodani tashqi kontur (3.4-rasm) uchun qo'llab, soat mili yo'nalish bilan o'tilganda, a nuqtasida o'tishni uzib b nuqtasida o'tishni davom ettirib, quyidagini aniqlaymiz.

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{AB} = E_1 - E_2.$$

Potensial diagrammasi. Elektr zanjiri shoxobchalari bo'ylab potensialning o'zgarishini to'g'ri tushunish uchun potenciallar diagrammasidan foydalanish zarur. Potensiallar diagrammasi – shunday grafikki. uning bir (vertikal yoki ordinata) o'qida potensialning qiymatlari, ikkinchi (gorizontal yoki abssissa) o'qida – zanjirning tanlangan konturi bo'ylab o'tishdagi ketma-ket qarshiliklar qiymatlari qo'yiladi. 3.4–rasmdagi zanjirning tashqi $c-a-b-c$ konturi bo'ylab o'tishdagi potensial diagrammasi 3.5–rasmda keltirilgan. U s nuqtadan boshlanib, s nuqtada tugaydi. Shu nuqta potentsiali nol (yoki biror $\varphi \neq 0$ qiymat)ga teng deb ixtiyoriy qabul qilingan. Grafikning boshida va ketida uchrashi mumkin bo'lgan potenciallar sakrashi φ_1 va φ_2 kuchlanish manbalari ulangan holatiga mos keladi.



3.5-rasm. Potensial diagrammasi.



3.6-rasm. Ketma-ket va parallel ulangan zanjir

3.2. Oddiy elektr zanjirlari uchun Om va Kirxgof qonunlarini qo'llash

Kirxgof, Om va Joule-Lens qonunlarini oddiy elektr zanjirlariga qo'llash hech qanday qiyinchilik uyg'otmaydi. Ammo ketma-ket va parallel ulanishlardagi hamda oddiy parallel-ketma-ket ulanishlardagi tok va potenciallarining taqsimlanishini to'g'ri idrok

etishni alifbe va ko'paytirish jadvalini bilgandek puxta o'zlashtirish lozim.

Ketma-ket ulash. Kuchlanish manbai va ikki qarshilik ketma-ket ulanganda (3.6,a-rasm) ularning har biridan bir xil tok oqib o'tadi.

$$I = I = E / (R_1 + R_2 + R_3). \quad (3.11)$$

Agar birnecha rezistorlar ketma-ket ulangan bo'lsa ularni bitta ekvivalent qarshilik bilan almashtirish mumkin va, demak, ularning qarshiliklari qo'shiladi

$$R_E = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (3.12)$$

Ularining har biri orqali oqayotgan tok $I = U / R_E$ bo'ladi, bunda,

$$U = E = R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_3 I_3 + \dots$$

kuchlanishlar yig'indisi.

Parallel ulash. Har biri o'zaro parallel bo'lgan shoxobchalarda kuchlanish U teng, ya'ni umumiydir (3.6,b-rasm). Agar U berilgan bo'lsa, u holda har bir shoxobcha uchun tok qiymatini Ohm qonuni asosida aniqlanadi.

$$I_1 = G_1 U; \quad I_2 = G_2 U; \dots \quad (3.13)$$

bunda, $G_k = 1/R_k$ - qiymat k -chi shoxobchaning o'tkazuvchanligi.

KTQga asosan, tarmoqdan kelayotgan umumiy tok I barcha shoxobchalar toklarining yig'indisiga teng

$$I = I_1 + I_2 + \dots = (G_1 + G_2 + \dots)U.$$

Parallel ulanganda barcha shoxobchalarni ekvivalent o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan bir shoxobcha bilan almashtirish mumkin.

$$G_E = G_1 + G_2 + \dots \quad (3.14)$$

Bunda tok I va kuchlanish U orasidagi bog'lanish berilgan zanjirdagidek qiymatga ega bo'ladi.

$$I = G_E U.$$

Zanjirda ikki parallel shoxobchalar mavjudligi sababli (3.6,b-rasm) $U_2 = U_3$ bo'lgani uchun tok quyidagicha aniqlanadi:

$$I = I_1 + I_2 = (G_1 + G_2)U = G_E U = U / R_E, \quad (3.15)$$

bunda,

$$R_E = \frac{I}{G_E} = \frac{I}{G_1 + G_2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.16)$$

Demak, parallel ulangan qarshiliklarga ekvivalent R_E bo'lgan qarshilik (3.16) ifoda yordamida aniqlanadi.

Maksimal quvvatni uzatish sharti. Texnik qurilmalarni loyihalash jarayonida, aksariyat, elektr zanjirlardan qabul qiluvchi (yuklama) tomon oqayotgan maksimal quvvatni uzatish shartini hisoblash vazifasi qo'yiladi. Ushbu quvvatning qiymati qabul qiluvchining qarshiligi hamda ulangan zanjir parametrlariga bog'liq.

3.6.a-rasmda tasvirlangan zanjir uchun ikkinchi rezistor R_2 tomonidan qabul qilinib sarflanayotgan quvvat ushbu rezistorning qarshiligi va undagi tokka bog'liq hamda quyidagicha ifodalanadi:

$$P_2 = I^2 R_2 = \frac{E^2}{(R_1 + R_2)^2} \cdot R_2. \quad (3.17)$$

Agar, $R_2 = 0$ (qisqa tutashuv, $U_2 = 0$) va $R_2 \rightarrow \infty$ bo'lganda (yuksiz ish-lash rejimi, $I = 0$) quvvatning qiymati $P_2 = 0$ bo'ladi. Agar, $R_2 = R_1$, bo'lsa quvvat maksimal bo'ladi, ya'ni $P_2 = P_{2\max}$.

Buni oddiy usul bilan keltirib chiqarish mumkin: R_2 ni R_2 bo'yicha differensiallab, uni nolga tenglashtiramiz. Natijada, shu ma'lum bo'ladiki, qabul qiluvchi qarshilik R_2 ning (iste'molchi yoki yuklamaning) maksimal quvvati

$$P_{2\max} = \frac{E^2}{4R_1} \quad (3.18)$$

miqdori Y_e kuchlanish manbai berayotgan quvvatining

$$P_{manba} = E \cdot I = \frac{E^2}{2R_1} \quad (3.19)$$

yarmiga teng bo'ladi.

Ushbu shartni bajarish juda ahamiyatlidir. Masalan, radio antennalarida manba (e.y.k. E va R_1 ichki qarshiligi) dan kelayotgan signal juda sust va qabul qiluvchi qarshiligi maksimal quvvatni tortishi zarur degan shart quyilganda, undan foydalaniladi.

Aksincha, ushbu shart katta energiyani uzatish (masalan, shu radiotexnik qurilmaning elektr ta'minoti) uchun mo'ljallangan qurilmalarning muntazam ishlagandagi holatiga mutlaqo mos kelmaydi, chunki energiyaning yarmi istemolchiga etib borsayu, qolgan yarmi yo'lda energiya isrofiga sarflansa, bu hech yo'l qo'yib bo'lmaydigan vaziyatdir, chunki uning f.i.k. 50%dan kichik bo'ladi. Energetik uskunalarda ushbu aniqlangan qarshilik qiymatidan mutlaqo boshqa maqsadda foydalaniladi. Agar limiyada qisqa

tutashuv sodir bo'lsa, liniya o'chirilishi shart, chunki o'chirgich kontaktlari orasidagi qarshilik R_2 ning qiymati R_1 ga teng bo'lsa, shu kontaktlar orasidagi quvvat maksimal bo'ladi. Bu quvvat o'ta yuqori qiymatli bo'ladi, shuning uchun o'chirish (zanjirni uzish) jarayoni imkon qadar tezkorlik bilan bajarilishi shart.

Aralash (ketma-ket-parallel) ulangan zanjir. Bir manbali zanjirlardagi passiv elementlar ketma-ket va parallel ulanganda yuqorida ko'rilgandek, elementlarni ekvivalent almashtirish qoidalariga binoan hisoblanadi. Misol uchun 3.7,a-rasmda keltirilgan zanjirni ko'raylik. Avval ikki R_2 va R_3 parallel qarshiliklarni ekvivalent R_E qarshilik bilan almashtirib (3.7,b-rasm)

$$R_E = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}, \quad (3.20)$$

umumiy tokni

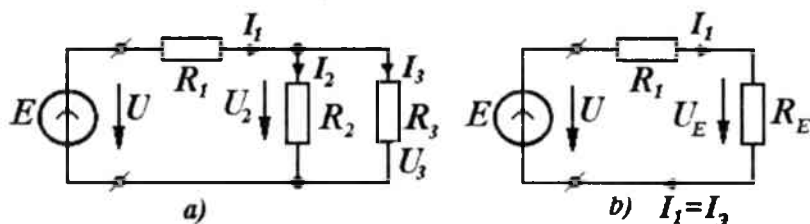
$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_E}, \quad (3.21)$$

va parallel shoxobchalar kuchlamishini aniqlaymiz; $I_E = I_1$ bo'lgani uchun

$$U_E = U_2 = U_3 = R_E I_1, \quad (3.22)$$

undan so'ng R_2 va R_3 elementlardagi toklarni aniqlaymiz.

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U_3}{R_3}. \quad (3.23)$$



3.7-rasm. Aralash (ketma-ket-parallel) ulangan zanjir.

Keyingi ifodalarga (3.22)dan $U_2 = U_3$ ni qo'yib, so'ngira I_1 va R_E ni (3.21) va (3.20)dan aniqlab, barcha toklar uchun ifodalarni qulay holatga keltirish mumkin.

$$I_2 = \frac{ER_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}; \quad I_3 = \frac{ER_2}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}; \quad I_1 = \frac{E(R_2 + R_3)}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}; \quad (3.24)$$

Ushbu umumlashtirilgan ta'rif I_2 , I_3 toklarni va ular yig'indisiga teng bo'lgan I_1 tokni aniqlash uchun zarurdir.

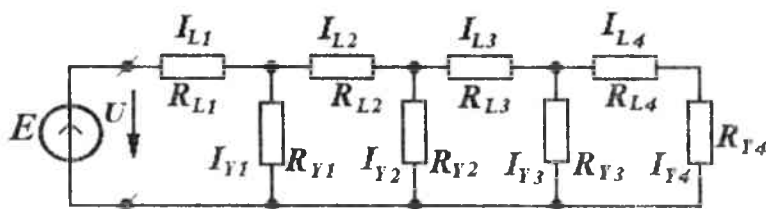
Bu (3.24) ifodalardan toklar orasidagi bog'lanishlar ham yaqqol ko'zga tashlanadi.

$$I_2 = I_1 \frac{R_1}{R_2 + R_1}, \quad (3.25)$$

$$I_3 = I_1 \frac{R_1}{R_2 + R_3}, \quad (3.26)$$

(3.24)-(3.26) bog'lanishlar zanjirlarni hisoblashda ko'p uchrab turadi.

Murakkab (parallel ketma-ket shoxobchali) zanjir. Murakkab elektr zanjirini ko'pincha bir qator ketma-ket va parallel ulangan qarshiliklar sifatida tasavvur qilish mumkin. Masalan, qarshiliklari R_{yul} , R_{yu2} ,... bo'lgan bir necha yuklamalar, alohida bo'laklarining qarshiliklari R_{L1} , R_{L2} ,...ga teng bo'lgan bitta liniyaga ulangan bo'lsin (3.8-rasm).



3.8-rasm. Murakkab zanjir.

Ikki o'tkazgichli liniya ko'rilayotgan holat uchun bir o'tkazgichdan oqayotgan barcha tok, ikkinchisidan qaytib keladi, ular har bir ixtiyoriy bo'lagining qarshiligi (masalan, R_{L1}) to'g'ri va teskari o'tkazgichlar qarshiliklari (aytaylik, $R_{L1}/2$ va $R_{L1}/2$) qo'shiladi va bir liniyaga ulangan deb hisoblash mumkin. Qarshiliklarning bunday o'rin almashinuvi natijasida liniyaning bo'lagidagi kuchlanishlar pasayishi o'zgarmaydi.

3.8-rasmda keltirilgan sxemani o'rganish natijasida $R_{Y4} + R_{L4}$ qarshilikli shoxobcha (oxirgi yuklanish R_{Y4} oxirgi liniya R_{L4} bo'lagi bilan ketma-ket) R_{Y3} (oxiridan oldingi bo'lak yuklanishi shoxobchasi) bilan parallel ekanligini ko'rish mumkin. Ushbu ikki

shoxobchalarni bitta ekvivalent qarshilik bilan almashtirish mumkin. Bu qarshilik esa, o'z navbatida R_{L3} (oxiridan oldingi liniya) qarshiligiga ketma-ket ulangan bo'ladi. Shu ta'riqa, barcha zanjir qarshiliklarini «yig'ish» va, natijada murakkab zanjirni soddalashtirilgan (3.6,a-rasm) holatiga keltirish mumkin. Soddalashtirilgan zanjir uchun manba toki I_{L1} ni aniqlash qiyin emas. Bundan so'ng *birinchi* yuklanishdagi kuchlanishni

$$U_{Y1} = E - R_{L1} \cdot I_{L1} \quad (3.27)$$

va uning tokini aniqlash mumkin

$$I_{Y1} = U_{Y1} / R_{Y1},$$

so'ngra *ikkinchi* bo'lakdagi liniya toki $I_{L2} = I_{L1} - I_{Y1}$ ni aniqlanadi va h.k.

Proporsional qiymatlar usuli. Yuqorida keltirilgan hisoblashni zanjirning (3.8-rasm) oxiridan boshlab, oxirgi yuklanish tokining qiymatini ixtiyoriy (masalan, $I'_{Y4} = 1A$) qabul qilinsa, yechimni keskin engillashtirish mumkin.

Oxiridan avvalgi yuklanish ulangan qisqichdagi kuchlanishni

$$U'_{Y3} = (R_{Y4} + R_{L4}) I'_{Y4}$$

deb hisoblab, uning tokini aniqlaymiz

$$I'_{Y3} = U'_{Y3} / R_{Y3}$$

So'ngra, undan avvalgi bo'limdagi tokni

$$I'_{L3} = I'_{Y3} + I'_{Y4}$$

va R_{Y2} shoxobchadagi kuchlanishni hisoblaymiz.

$$U'_{Y2} = U'_{Y3} + R_{Y3} I'_{Y3}$$

Shu tariqa hisoblashni davom ettirib, ixtiyoriy tanlangan oxirgi yuklanish toki I'_{Y4} ga mos kelgan zanjir boshlanishidagi $U' = E'$ kuchlanishni aniqlaymiz.

Agar zanjir boshlanishidagi kuchlanish $U = E$ aniqlangan kuchlanishdan η marta katta, ya'ni,

$$U / U' = \eta, \quad (3.28)$$

bo'lsa, u holda barcha elementlardagi haqiqiy toklar hisoblangan oraliq toklardan η marta katta bo'ladi, ya'ni,

$$I_{Y4} = \eta I'_{Y4}; \quad I_{Y3} = \eta I'_{Y3}, \dots \quad (3.29)$$

Kuchlanishlar ham shunga o'xshash aniqlanadi.

$$U_{Y4} = \eta U'_{Y4}; \quad U_{Y3} = \eta U'_{Y3}, \dots \quad (3.30)$$

Ushbu hisoblar tok va kuchlanishlar proporsionalligidan kelib chiqadi.

Keltirilgan hisoblash usuli *proporsional qiymatlar usuli yoki o'xshashlik usuli* deyiladi. Barcha murakkab zanjirlarni parallel yoki ketma-ket shoxobchalar singari tasavvur qilib bo'lmaydi. Bunday zanjirlarga, masalan, Uiston ko'prigi (3.9,a-rasm) uchun yuqorida keltirilgan usullarni tatbiq etib bo'lmaydi. Ushbu ko'prikdagi mavjud oltita shoxobchalarning birortasini ham qolganlariga nisbatan na parallel va na ketma-ket ulangan deb bo'lmaydi.

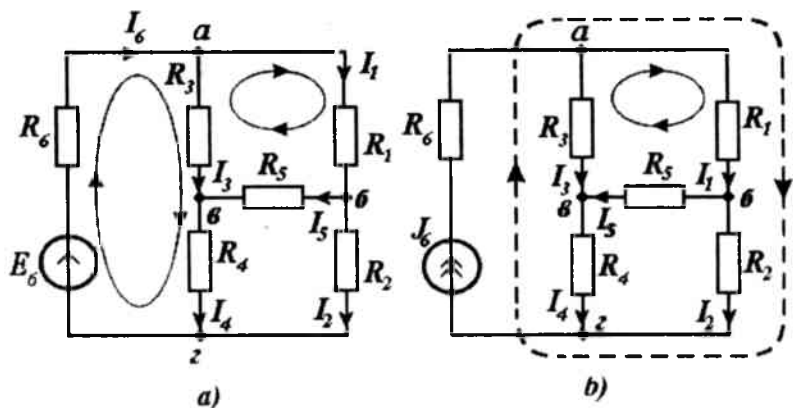
3.3. Kirxgof qonunlarini tatbiq etish

Kirxgof qonunlaridan foydalanib, murakkab chiziqli zanjirda, berilgan qiymatlar mavjudligida, shoxobchalar toklari va tugunlar potentsiallarini aniqlash imkoniyatini beruvchi tenglamalar tizimini hosil qilish mumkin. Masalan, barcha kuchlanish manbalarining e.yu.k.lari, barcha tok manbalarining toklari va barcha qarshiliklar qiymatlari mavjud bo'lsa, barcha shoxobchalar (elementlar) toklari va kuchlanishlarini hisoblash mumkin.

Zanjirda tok va potentsiallarning qiymatlarini (ularni qanday usulda - hisoblash yoki o'lchash usullari yordamida aniqlanishidan qat'i nazar) tekshirishda ham Kirxgof qonunlarini qo'llash muhim ahamiyatlidir; chunki berilgan tenglamalar tizimining taxmin qilingan yechimini tekshirish, tenglamalar tizimini qayta yechishdan ko'ra yengilroqdir.

Darhaqiqat, Kirxgof qonunlarining tatbiq etilishi orasida eng muhim o'rin tutganlari - tenglamalar tizimini yechmasdan turib, chiziqli elektr zanjirining ba'zi umumiy xususiyatlarini aniqlash imkonini beruvchi, «prinsiplar» deb ataluvchi (masalan, superpozitsiya prinsipi, o'zarolik prinsipi) usullardir.

Kirxgof tenglamalari tizimi. Berilgan zanjir shoxobchalari soni "*Sh*" ga teng bo'lsin; bu songa tok manbai *J* ga ega bo'lgan shoxobchalar kirmaydi; ushbu *J* tok va kuchlanish *Ye* qiymatlari berilgan bo'lsin. Shoxobchalarning chegarasi bo'lgan tugunlar soni *T* ga teng bo'lsin.



3.9-rasm. Ko'p konturli elektr zanjir.

U holda KTQ (3.1) ga asosan mustaqil tenglamalar soni

$$K_1 = T - 1 \quad (3.31)$$

tugunlar sonidan 1 ga kichik bo'ladi.

KKQ (3.3)ga asosan, yana K_2 ta mustaqil tenglamalar qurish mumkin.

$$K_2 = SH - K_1 = SH + 1 - T \quad (3.32)$$

Bu tenglamalar berk konturlar uchun tuzlladi. Kontur tenglamalarining o'zaro mustaqilligi ayondir, chunki har bir kontur tarkibida xech bo'lmaganda bitta shoxobcha boshqa konturlar tarkibiga kirmaydi (bu zaruriy bo'lmagan, biroq yetarli bo'lgan shartdir).

Mustaqil tenglamalar to'la soni shoxobchalar soniga teng.

$$Sh = K_1 + K_2 \quad (3.33)$$

Oxirgi tenglik (3.31) va (3.32) dan kelib chiqadi, chunki ixtiyoriy K_1 tugun tenglamalari ixtiyoriy K_2 kontur tenglamalari soniga bog'liq emas; darhaqiqat, kontur tenglamalari tarkibiga kiritish shart bo'lgan shoxobchalar qarshiliklari tugun tenglamalari tarkibiga kirmaydi.

Shunday qilib, agar barcha shoxobchalar qarshiliklari, hamda manbalarining toklari va kuchlanishlari berilgan bo'lsa, u holda tenglamalar tizimidan barcha SH ta shoxobchalarning SH dona noma'lum toklarini aniqlash mumkin. SH songa tok manbai bo'lgan shoxobchalar kirmasligi alohida ta'kidlanadi.

Agar u yoki bu e.y.k. (yoki qarshiliklar) noma'lum bo'lganda ham tenglamalar tizimining yechimini aniqlash mumkin. Ammo, bunday holatda tenglamadagi boshqa qiymatlar (masalan, ayrim shoxobchalar toki) ma'lum bo'lishi shart, chunki noma'lumlar umumiy soni shoxobchalar (tenglamalar) soni Sh dan ortmasligi shart.

Misol. 3.9, a -rasmida to'rtta tugunli ($T = 4$) va oltita shoxobchali ($SH=6$) barqarorlashgan rejimdagi zanjir keltirilgan. Kirxgofning tenglamalari tizimini yozing.

Yechish. Ushbu zanjir uchun KTQga asosan $K_1 = T - 1 = 3$ ta tugun tenglamalarini tuzish mumkin: $-I_6 + I_1 + I_3 = 0$ (a - tugun uchun), $-I_1 + I_5 + I_2 = 0$ (b - tugun uchun), $-I_3 - I_5 + I_4 = 0$ (v -tugun uchun). Zanjir barqarorlashgan rejimda bo'lgani uchun toklarni katta harf bilan belgilaymiz $i = I$.

To'rtinchi (g) tugun uchun tenglama avvalgi uchchala tenglamalar natijasi ekanligiga ishonch hosil qilish mumkin.

KKQ asosida $K_2 = SH + 1 - T = 3$ mustaqil kontur tenglamalarini tuzish lozim. Masalan, 3.9, a -rasindagi konturlar uchun

$$R_6 I_6 + R_1 I_1 + R_2 I_2 = E_6,$$

$$R_6 I_6 + R_3 I_3 + R_4 I_4 = E_6,$$

$$R_1 I_1 + R_5 I_5 - R_3 I_3 = 0.$$

Misol. J_6 tok qiymati ma'lum bo'lgan (3.9, b -rasm) tok manbali zanjir uchun tenglamalar tizimini yozing.

Yechish. Zanjirda beshta noma'lum toklar va beshta shoxobchalar (tok manbaining shoxobchasi hisobga olinmaydi) mavjud.

Demak, uchta *tugun tenglamalari* (tugunlar soni to'rtga teng) va ikkita *kontur tenglamalarini* tuzish mumkin.

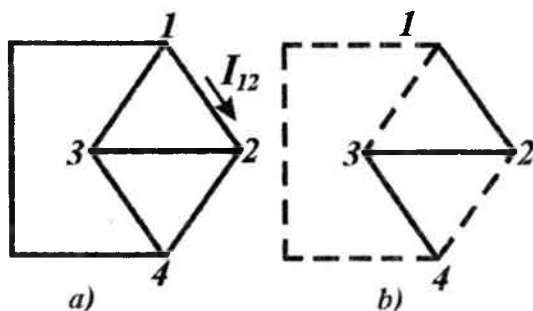
$$I_1 + I_3 = J \text{ (} a\text{- tugun uchun);}$$

$$-I_1 + I_5 + I_2 = 0 \text{ (} b\text{- tugun uchun);}$$

$$-I_3 - I_5 + I_4 = 0 \text{ (} v\text{- tugun uchun);}$$

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_4 I_4 - R_3 I_3 = 0;$$

$$R_1 I_1 + R_5 I_5 - R_3 I_3 = 0.$$



3.10-rasm. Tok manbai bo'lmagan zanjir.

3.4. Kirxgof qonunlari asosida tuzilgan tenglamalar to'liqligi

Mustaqil tugun tenglamalari soni. Avval tok manbai bo'lmagan zanjirni ko'raylik. Zanjirda (3.10, *a*-rasm) to'rt tugun bo'lib, ularning har biri qolgan tugunlar bilan birgina shoxobcha orqali ulangan bo'lsin.

Ushbu tugunlar uchun tenglamalar quyidagicha bo'ladi:

$$I_{12} + I_{13} + I_{14} = 0; I_{21} + I_{23} + I_{24} = 0;$$

$$I_{31} + I_{32} + I_{34} = 0; I_{41} + I_{42} + I_{43} = 0,$$

bunda, I_{mm} - m va n tugunlarni bog'lovchi shoxobchani m tugundan n tugunga yo'nalgan toki (masalan, shu sxemada I_{12} tok yo'nallishi keltirilgan).

Birinci uch tenglamalar yig'indisini hisoblasak (bunda, $I_{21} + I_{12} = 0$;

$I_{13} + I_{31} = 0$) shu ma'lum bo'ladiki, hosil bo'lgan yig'indi $I_{14} + I_{24} + I_{34} = 0$ tarkibida faqat to'rtinchi tugunga kelayotgan toklar bo'lar ekan. Bu yig'indi to'rtinchi tugun tenglamasidan faqatgina barcha hadlarning ishorasi bilan farqlanadi, demak, *oxirgi tugun uchun yozilgan tenglama undan oldingilarning natijasi ekan*.

Birinci uchta tenglamalarning mustaqil ekanligi aniq, chunki ularning har birida, hech bo'lmaganda, bitta yangi tok mavjud: m

tugun uchun - bu m tugunni keyingi tugun (masalan, 4-tugun) bilan bog'lovchi I_{m4} tokidir.

Agar, ikki tugun, masalan, 1 va 2 tugunlar orasida birnecha I'_{12} , $I''_{12}, \dots$ tokli parallel shoxobchalar mavjud bo'lsa, u holda birinchi tenglama tarkibida $I'_{12} + I''_{12} + \dots$, ikkinchisida $I'_{21} + I''_{21} + \dots$, toklar qatnashgan bo'lar edi; yuqoridagi isbotlashning tartibida hech o'zgarish bo'lmas edi, chunki $I'_{12} + I'_{21} = 0$; $I'_{12} + I''_{21} = 0; \dots$

Ushbu mulohazani ixtiyoriy sonli tugunga ega bo'lgan zanjirlar uchun tatbiq etish ham mumkin. Bunda, doimo mustaqil tenglamalar soni tugunlarning T sonidan bittaga kichik bo'ladi. Shunday qilib, (3.12) ifodaning to'g'ri ekanligi isbotlangan bo'ladi.

Mustaqil kontur tenglamalari soni. T tugunlari mavjud bo'lgan har qanday zanjirda shunday shoxobchalarni ajratib ko'rsatish mumkin bo'lsinki, bu shoxobchalar birorta berk kontur hosil qilmasdan barcha tugunlarni o'zaro birlashtirsin. Buni quyidagicha bajaramiz: ikki tugunni bir shoxobcha bilan birlashtiraylik va tugunlarni 1 va 2 bilan belgilaylik; so'ngra, 2-tugunni yangi tugun bilan bog'laylik, uni 3 bilan belgilaylik, va h.k. Shu tariqa oxirgi tugun $n=T$ gacha olib boraylik. Bunday bog'lanish 3.10, b-rasmdagi sxemada ilgari keltirilgan to'rt tugunli zanjir uchun keltirilgan. Oxirgi tugunni 1-tugun bilan birlashtirib bo'lmaydi, chunki unda berk kontur hosil bo'ladi.

Agar har bir tugun boshqa barcha tugunlar bilan shoxobchalar orqali ulansa, tugunlar oldindan ixtiyoriy ravishda raqamlanib, so'ngra tugunlar ketma-ket ulanishi mumkin (1 va 2, 2 va 3, ..., $T-1$ va T).

Aniqki, bunday ulanishda shoxobchalar soni tugunlar sonidan albatta bittaga kam bo'ladi, ya'ni barcha shoxobchalar ketma-ket ulangan, zanjir berk bo'lmaydi. Biroq, ixtiyoriy bir juft tugunlarga yangi shoxobchalar ulansa, kontur hosil bo'ladi, chunki shartga ko'ra barcha tugunlar qandaydir shoxobcha bilan ulangandir.

Kontur hosil qilmasdan shu yo'sinda kiritish mumkin bo'lgan shoxobchalar-daraxt shoxobchalari deyiladi, ular hosil qilgan struktura daraxt deb ataladi.

Ta'rifga ko'ra, daraxtga kiritilgan har qanday shoxobcha konturni hosil qiladi (aks holda, bunday shoxobcha daraxt shoxobchalari qatoriga kirar edi). Ana shunday berk kontur hosil qiluvchi

shoxobchalar *vatarlar* (yoki *ko'priklar*) deb ataladi. Vatarlar 3.10, b-rasmda punktir chiziqlar bilan ko'rsatilgan.

Daraxtga bitta vatarni qo'shib, ilgari qurilgan boshqa bir shoxobchani tashlab yuborib, hosil bo'lgan berk konturni uzish mumkin. Bunda yangi daraxt, ya'ni berk kontursiz zanjir paydo bo'ladi. Biroq, ixtiyoriy yangi daraxtning shoxobchalari soni o'zgarishsiz qoladi, chunki har gal yangi bir vatar qo'shilganda, aynan bitta boshqa shoxobchani tashlab yuborish lozim.

Shoxobcha-vatarlar soni X , shoxobchalar soni Sh bilan daraxtga kiruvchi shoxobchalar $(T-1)$ ayirmasiga teng:

$$X = SH - (T - 1).$$

Har qanday shoxobcha-vatar kiritilishidan hosil bo'lgan kontur uchun, KKQga asosan tenglama tuzish mumkin. Bunda, har bir shunga o'xshash tenglama boshqalaridan mustaqildir, chunki ularning har biriga yangi noma'lum berk kontur hosil qiluvchi yangi shoxobcha toki kiradi.

Demak, mustaqil kontur tenglamalari soni vatarlar soniga, ya'ni (3.3)ga binoan $Sh-(T-1)$ ga teng. Shuni isbot qilish zarur edi.

Kirxgof tenglamalari tuzilgan kontur, boshqa oddiy konturlardan farqlanishi mumkin, chunki ularning har birida faqat bittadan vatarlar mavjud. Bu fikrning ayonligi quyidagi mulohazadan ko'rinadi: ikki mustaqil tenglamalarni o'zaro qo'shib, yangi tenglama hosil qilamiz. Bu, o'z navbatida, qolgan ikki asosiy tenglamalardan birinchisi yoki ikkinchisi bilan hamkorlikda ikki mustaqil tenglamalarni hosil qiladi. Mustaqil tenglamalarning umumiy soni o'zgarmasdan qoladi.

Eslatma. Tarqoq bo'lmagan zanjirni chegaralovchi ikki tugunlari bitta tugunga qo'shiluvchi ($T=1$) bir shoxobchali ($SH=1$) zanjir deb qarash mumkin. Bunday zanjirlar uchun ham $K_1=T-1=0$ va $K_2=SH-(T-1)=1$ ifodalashni qo'llash mumkin. Darhaqiqat, bunday zanjir uchun faqat bitta kontur tenglamasini tuzish mumkin. Ushbu fikrlar tugunning shoxobcha chegarasi ekanligi haqidagi ta'rifga to'la mos keladi.

Barcha tugun tenglamalarining har bir kontur tenglamalariga bog'lik bo'lmasligi (ulardan mustaqilligi) ayondir, chunki kontur tenglamalari tarkibida shoxobchalar qarshiliklari va e.yu.k.lari mavjud bo'lib, tugun tenglamalarida ular qatnashmaydi. Demak,

tugun tenglamalarining har qanday chiziqli kombinatsiyasidan kontur tenglamalarini hosil qilib bo'lmaydi. Bu esa, *zanjirning to'la mustaqil tenglamalari soni shoxobchalar soniga teng* ekanligini isbotlaydi. Demak, agar qolgan barcha parametrlar berilgan bo'lsa, aniqlangan tenglamalar tizimi barcha toklarni aniqlash uchun etarlidir; ushbu holat tenglamalar tizimining to'liqligini ta'kidlaydi.

Yuqorida keltirilgan mustaqil tenglamalar soni haqidagi barcha mulohazalar, tok manbai bor bo'lganda ham o'z kuchiga ega, chunki tok manbai ekvivalent kuchlanish manbai bilan almashirilishi mumkin. Biroq, tugun tenglamalarining o'ng tomonida KTQ i ta'rifidagidek, tok manbalarining toklari qatnashayapti deb hisoblab, yuqoridagi mulohazalarni davom ettirish mumkin.

3.5. Superpozitsiya (ustlash yoki jamlash) prinsipi

Ushbu prinsip chiziqli zanjirlar uchun qo'llanganda shunday ta'riflanadi: zanjirning ixtiyoriy elementidagi tokning miqdori, har bir manbaning alohida ta'siri natijasida (bir manba ta'siri ko'rilayotganda qolgalarini yo'q deb hisoblab) ushbu shoxobchada hosil qilgan toklarining algebraik yig'indisiga teng. Keltirilgan ta'rifdan shuni ko'rish mumkinki, ko'rilayotgan prinsipni mustaqil amal qiluvchi prinsip deb atash mumkin.

E.yu.k. manbalaridan faqat bittasining ta'sirini etayotganda, barcha boshqa manbalarining e.yu.k.lari va tok manbalarining toklari nolga teng deb faraz qilinadi. Kuchlanish manbalarining qisqichlarida kuchlanishning yo'qligi ular klemmalari qisqa tutashganligiga mos keladi; tok manbalari bo'lgan shoxobchalarda tokning yo'qligi (taxmini) ushbu shoxobcha uzilgan deb fraz qilingandan darak beradi.

Agar manba ichki qarshilik va e.yu.k. ega bo'lsa, u holda e.yu.k. nolga teng deb faraz qilib, uning shoxobchasida ichki qarshilikni qoldirish zarur. Shunga o'xshash, tok manbai va unga ulangan parallel ichki manba qarshiligi bo'lgan shoxobcha sifatida berilgan bo'lsa, tok manbai shoxobchasini uzib (ya'ni, $J = 0$ deb hisoblab), ichki qarshilikli parallel shoxobchani qoldirish zarur.

Superpozitsiya prinsipiga asosan ikki (yoki bir necha) rejim uchun hisobni olib borish mumkin; bunda bir marta parametrlari

$E_1^*, E_2^*, J_1^*, \dots$ bo'lgan; manbalar ta'sir etadi; ikkinchi marta esa $E_1^*, E_2^*, \dots, J_1^*, J_2^*, \dots$ parametrlari manbalar ta'sir etadi.

Agar I_1' va I_1'' ; I_2' va I_2'' ; - toklar shu ikki rejimning toklari bo'lsa, u holda haqiqiy rejimning toklarini aniqlash uchun ushbu ikki rejim toklarini

$$I_1' + I_1'' = I_1; \quad I_2' + I_2'' = I_2; \quad \dots \quad (3.34)$$

ustlash yordamida aniqlash mumkin (agar quyidagilarni qabul qilish mumkin bo'lsa):

$$E_1' + E_1'' = E_1; \quad J_1' + J_1'' = J_1. \quad (3.35)$$

Bunda shtrixsiz qiymatlar manbalarining haqiqiy parametrlariga mos keladi.

Hisoblash va tahlil qilishning qulayligiga erishish uchun har xil rejimlarda zanjirning ixtiyoriy qismiga, aslida mavjud bo'lmagan, shartli (soxta) manbalarni kiritish mumkin, bunda, faqat ustlash natijasida shartli manbalarining EYK yig'indisi va toklar yig'indisi nolga teng bo'lishi zarur.

Umumiy holda superpozitsiya usulini quvvatlar uchun tatbiq etib bo'lmaydi.

$$P_1 \neq P_1' + P_1'', \dots \quad (3.36)$$

chunki quvvatlar toklarning kvadratik (nochiziqli) funksiyalaridir.

Avval proporsional qiymatlar usuli ko'rilgan edi. Superpozitsiya usuli bilan birgalikda ushbu usul murakkab zanjirlar uchun qo'llanilishi mumkin. Zanjirda yagona manba bo'lsa, hech bo'lmaganda bitta tugunga uchtdan ko'p bo'lmagan shoxobcha ulangan hamda ikkitagina shoxobcha berilib, ular yordamida barcha tugunlar potentsiallarini va barcha shoxobchalar tokini aniqlash mumkin bo'lgan holatlarda ushbu usulni qo'llash qulaylikka olib keladi. Bu talablarni, masalan, 3.11-rasmdagi zanjir $J=0$ bo'lganda qoniqtiradi. Avval, *ikki* shoxobcha toklarini *ixtiyoriy tanlab* (masalan, 3.11 rasm da R_2 va R_6 shoxobchalar toklarini), 2-tugunning uchinchi tokini oson aniqlash, so'ngra Om qonuniga binoan boshqa ixtiyoriy shoxobcha (masalan, 3.11-rasmdagi R_4 va h.k.) uchun potentsiallar farqini hisoblash mumkin.

Barcha hisoblashlarni bajarish juda oson, biroq ular tezda bir-biriga zid natijalarga olib kelishi ham mumkin. Kirxgofning

qonunlariga zidlikni (shartli) kuchlanish manbai E'_{sh} (yoki shartli J'_{sh} tok manbai)ni kiritib bartaraf etish mumkin. Bunda, hisoblash natijasida barcha izlanayotgan toklar va e.y.k. lar aniqlanadi.

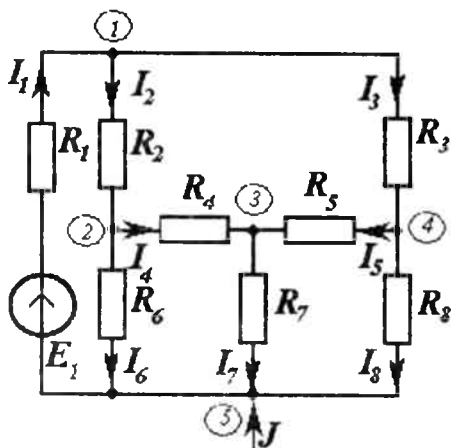
Natijada m -shoxobchadagi tokni aniqlash mumkin.

$$I'_m = y_{m1} E'_1 + y_{msh} E'_{sh}, \quad (3.37)$$

bunda, «1» indeks bilan haqiqatdan ham manbai bo'lgan shoxobcha qiymatlari va «Sh» bilan Kirxgof qonunlariga zidlikni bartaraf etish uchun kiritilgan «shartli» manba qiymatlari belgilangan.

So'ngra, qayta hisoblash bajariladi, bunda mazkur shoxobchalarning ixtiyoriy tanlangan toklariga yangi qiymatlar beriladi. Natijada manbalarining yangi qiymatlari bilan yangi rejim toklari aniqlanadi.

$$I''_m = y_{m1} E''_1 + y_{msh} E''_{sh}. \quad (3.38)$$



3.11-rasm. Besh tugunli elektr zanjir.

Tokning ikki qiymatlaridan birini, aytaylik, ikkinchisini, b koeffitsiyentiga ko'paytirib va ularni qo'shib, quyidagini hosil qilamiz.

$$I'_m + bI''_m = I_m = y_{m1}(E'_1 + bE''_1) + y_{msh}(E'_{sh} + E''_{sh}) \quad (3.39)$$

Shunga e'tiborni qaratish zarurki, barcha tengliklarda y_{m1} va y_{msh} koeffitsiyentlar qiymatlari noma'lum bo'lsa ham ular bir xildir.

Agar ko'paytuvchi b ning qiymati shunday tanlangan bo'lsaki, unda

$$E_{sh}^+ + bE_{sh}^- = 0, \quad \text{ya'ni} \quad (3.40)$$

$b = -E_1' / E_{sh}^*$ bo'lsa, undan avvalgi tenglama

$$I_m = y_m(E_1^+ + bE_1^-) \quad (3.41)$$

shaklga keladi.

Keyingi tenglikdan y_m ni aniqlaymiz, so'ngra m shoxobchani berilgan E_1 e.y.k.li yagona kuchlanish manbai bo'lgandagi izlanayotgan tokini aniqlaymiz.

$$I_m = y_m \cdot E_1. \quad (3.42)$$

Ushbu hisoblash usulini o'rganish, yuzaki qaraganda, biroz mushkul bo'lib ko'rinsa ham, u aslida juda ham oson va raqamli natijalarni tezkorlik bilan olish imkonini berishga etibor qaratishni zarur deb hisoblaymiz.

3.6. Kompensatsiya usuli

Elektr zanjirlarida I_v tokli va R_v qarshilikli shoxobcha (yoki shoxobchani bir qismi)ni (3.12,a-rasm) elektr yurituvchi kuchi E_v ga teng bo'lgan va qarama-qarshi yo'nalgan kuchlanish manbai bilan almashtirish mumkin.

$$E_v = R_v \cdot I_v. \quad (3.43)$$

Bunday almashtirish natijasida zanjirdagi toklarning taqsimlanishi avvalgidek qoladi, chunki ajratilgan R_v shoxobcha zanjirning boshqa qismlariga ta'siri, faqat uning uchiaridagi potentsiallar farqi bilan aniqlanadi

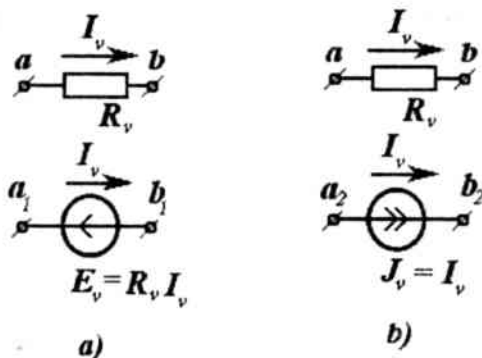
$$U_{ob} = R_v \cdot I_v = E_v. \quad (3.44)$$

Keltirilgan almashtirish KKQ

(3.9,a) tenglamadagi $R_v I_v$ hadni o'ng tomonga o'tkazishga mos keladi.

$$\Sigma RI = \Sigma E - E_v. \quad (3.45)$$

Bu tenglamaning chap tomonida, ya'ni RI ko'paytmalar yig'indisida endi R_v qarshiligi qatnashmaydi. Bunday almashtirishda zanjirning qolgan qismining barcha parametrlari o'zgarmaydi, shuningdek, tugun tenglamalarining yozilishi ham o'zgarmaydi.



3.12-rasm. Manbani almashtirish usuli.

Aksincha, toklarga nisbatan yechilgan tenglamalar (3.5) tizimida bajarilgan almashtirish sababli barcha y_{ml} va h_{mk} koeffitsiyentlar ham o'zgarishi mumkin, chunki endi ular R_v qarshilik nolga teng bo'lgan holat uchun aniqlanadilar: by qarshilik (3.45) tenglamalarning chap tomonida qatnashmaydi, balki EYuK ning qiymatida yashirin holatda ishtirok etadi.

Har qanday elektr zanjirida I_v tokli shoxobchani tok manbai bilan almashtirish mumkin (3.12.b-rasm).

$$J_v = I_v \quad (3.46)$$

Kirxgof tenglamalar tizimidan ko'rinadiki, bunday almash-tirishda toklar zanjirning barcha qismida taqsimlanishi ilgarigidek qoladi.

Darhaqiqat, tugun tenglamalari o'zlarining avvalgi ko'rini-shlarini saqlab qoladilar, faqatgina v - shoxobcha bilan bog'langan tugunlar uchun I_v qo'shiluvchiga (hadga) berilgan tok manbai J_v sifatida qaraladi. Kontur tenglamalari endi boshqacha tuziladi. Ular tarkibiga endi v - shoxobcha (va demak R_v qarshilik ham) kirmaydi. Ularni tuzishda v - shoxobcha uzilgan deb faraz qilinadi. Biroq kontur tenglamalari soni tugun tenglamalari bilan birgalikda tenglamalar tizimini hosil qilib, barcha boshqa shoxobchalardagi toklar qiymatlarini aniq yechish uchun yetarli bo'ladi.

Elektr zanjirining ixtiyoriy shoxobchasini kuchlanish manbai yoki tok manbai bilan almashtirishni kompensatsiya prinsipi deyiladi. Shuni e'tiborga olish zarurki, zanjirning bir qismini tok

yoki kuchlanish manbalari bilan almashtirilganda, bunday manbaning toki yoki EYK i qiymatlari zanjirning rejimiga bog'liq bo'ladi.

3.7. Chiziqlilik prinsipi

Agar elektr zanjirida faqat yagona v -shoxobchasidagi EYK dan tashqari barcha manbalar kuchlanishlari, toklari va shoxobchalar qarshiliklari o'zgarmas bo'lsa, u holda superpozitsiya prinsipi asosida (barcha o'zgarmas manbalar ta'sirida) tokning qiymati o'zgarmas qiymatlar va o'zgaruvchi E_v ga proporsional bo'lgan hadning yig'indisi sifatida ifodalanadi.

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= a_1 + y_{1v} E_v; \\ I_2 &= a_2 + y_{2v} E_v; \\ &\dots\dots\dots \\ I_v &= a_v + y_{vv} E_v, \end{aligned} \right\} \quad (3.47)$$

bunda, a_m, y_{mv} o'zgarmas qiymatlardir.

Tenglama (3.47)da o'zgaruvchi E_v dan ozod bo'lib, quyidagini hosil qilamiz

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= a_{1v} + b_{1v} I_v; \\ I_2 &= a_{2v} + b_{2v} I_v, \end{aligned} \right\} \quad (3.48)$$

hamda

$$I_1 = a_{12} + b_{12} I_2, \quad (3.49)$$

bunda, I_2 - barcha parametrlari o'zgarmas bo'lgan ixtiyoriy shoxobchadagi tok.

Qarshilik R_v ning har qanday o'zgarishlarini ekvivalent E_v EYK bilan almashtirish mumkinligidan foydalanuvchi kompensatsiya prinsipini nazarda tutib, keyingi tenglamalarning yanada umumiyroq ta'rifini berish mumkin; ular (tenglamalar) shuni ko'rsatadilarki, agar toklar o'zgarishi faqat bitta shoxobcha v - parametrlarning (qarshilik yoki EYK) o'zgarishiga (yoki faqat bitta manba toki J_v ning o'zgarishiga) bog'liq bo'lsa, u holda barcha

toklarning o'zgarishi o'zaro oddiy chiziqli tenglamalar bilan ifodalanishini ko'rsatadi. Buni aksariyat, *chizililik prinsipi* deyiladi.

(3.48) tenglamalar har qanday kuchlanishlar uchun

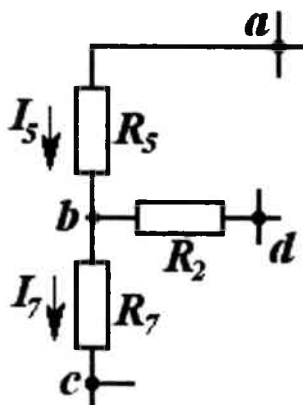
$$U_p = l + mI_v \quad (3.50)$$

ham chiziqlilik prinsipini ta'riflashga imkon beradi.

Darhaqiqat, ixtiyoriy tugunlarni, masalan, 3.13-rasmdagi a va c tugunlarini birlashtiruvchi shoxobchalarni tahlil qilganimizda, kuchlanishning

$$U_p = \varphi_a - \varphi_c = R_5 I_5 + R_7 I_7 \quad (3.51)$$

ga teng ekanligini ko'ramiz. Biroq, zanjirdagi har bir toklarni (shu jumladan, I_5 va I_7 larni ham) (3.48) tenglama bilan ifodalash mumkin; unda R_5 va R_7 lar o'zgarmas bo'lganda (3.51) tenglama hosil bo'ladi.



3.13-rasm. Elektr zanjirini bir qismi.

Ikki kuchlanishni (masalan, U_1 va U_m larni) shunga o'xshash tenglamalar bilan ifodalab, ikkalasida ham I_v dan halos bo'lib, shu ikki kuchlanish orasidagi bog'lanishni aniqlash mumkin.

$$U_1 = s + t U_m, \quad (3.52)$$

va u ham chiziqli bog'lanishda bo'lishini ko'ramiz.

Shunga o'xshash tarzda, bir shoxobcha toki I_n bilan ixtiyoriy tanlangan U_m kuchlanish orasidagi chiziqli bog'lanishni ham aniqlash mumkin.

$$I_n = f + k U_m. \quad (3.53)$$

Chiziqlilik prinsipi elektr zanjirlarini tahlil qilish va hisoblashda katta ahamiyatga ega.

Chiziqli bog'lanishli tenglamalarning barcha koeffitsiyentlari hisoblash yoki tajriba usullari yordamida aniqlanishi mumkin. Buning uchun zanjirning ikki rejimi uchun mazkur (I yoki U) qiymatlarni mavjud bo'lishi kifoyadir. Aksariyat, yuksiz ishlash ($I_0=0$) va qisqa tutashuv ($U_{Qt}=0$) rejimlari ancha qulay bo'ladi. Bu ikki rejim uchun $I_n=I_0$ toki va $U=U_{Qt}$ kuchlanishini «Yuksiz» yoki «0» va «Qt» indeksleri bilan belgilashni qabul qilamiz.

Ikki v va w shoxobchalarning parametrlari variatsiyalanganda (o'zgartirilib turilganda) murakkabroq tenglamalarni hosil qilish mumkin, ammo bunday holat uchun ham masalan, quyidagicha yozish bilan chiziqlilik prinsipini tatbiq etish mumkin:

$$I_n = a + b I_v + c I_w. \quad (3.54)$$

Oldingi mavzularda uzatish koeffitsiyentlari va xususan, uzatish o'tkazuvchanliklari haqida fikr yuritilgan edi. (3.52)-(3.55) ifodalardagi barcha tok va kuchlanish koeffitsiyentlari ham har turdagi uzatish koeffitsiyentlaridir, masalan,

$$b_{12} = \partial I_1 / \partial I_2; \quad m = \partial U_p / \partial I_v. \quad (3.55)$$

Yuqorida keltirilgan barcha tenglamalardan foydalanishda musbat yo'nalish tanlashga qat'iy e'tiborni kuchaytirish zarur, (3.57) tenglamada esa $\partial Z / \partial X$ hosila va ta'rifga ko'ra, Z qiymati ortishining X ortishiga nisbati, ekanligini ko'zda tutish zarur. Chiziqli bog'lanishli ifodalar yordamida tok va kuchlanishlarni chekli ortishlarini ham aniqlash mumkin, masalan, (3.53) va (3.54) bo'yicha

$$\delta U_r = \frac{\partial U_r}{\partial I_v} \delta I_v; \quad \delta U_m = \frac{\partial U_m}{\partial I_t} \delta I_t, \quad (3.56)$$

yoki (3.14) kabi belgilashda

$$\delta U_p = R_{pv} \delta I_v; \quad \delta U_m = d_{mt} \delta I_t, \quad (3.57)$$

(3.55) va (3.52) bo'yicha esa

$$\delta I_n = k \delta U_m; \quad \delta I_n = b_{nk} \delta I_k; \quad (3.58)$$

yoki (3.10) va (3.11) kabi belgilashda

$$\delta I_n = v_n \delta U_l; \quad \delta I_n = h_{nk} \delta I_k; \quad (3.59)$$

(3.56) ifodada keltirilganidek, murakkabroq vaziyatda:

$$\delta I_n = \frac{\partial I_n}{\partial I_v} \delta I_v + \frac{\partial I_n}{\partial I_w} \delta I_w. \quad (3.60)$$

3.8. Ekvivalent generator usuli

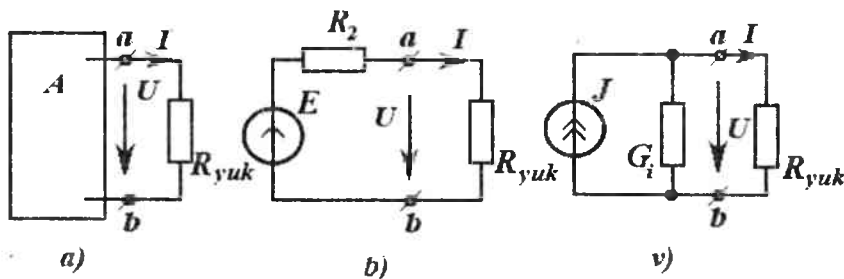
Yuqorida ko'rilgan (3.52) va (3.54) chiziqli bog'lanishdagi tenglamalar, aynan qarshiligi o'zgarayotgan shoxobchani tok I va kuchlanishi U ko'rilayotganda ham qo'llanilishi mumkin.

$$U = C + BI \quad \text{yoki} \quad I = K + NU. \quad (3.61)$$

Shunday $R_v = R_n$ qarshiligi bo'lgan shoxobcha 3.14, a-rasmda keltirilgan; sxemaning barcha o'zgarmas parametrlari va manbalari bo'lgan boshqa shoxobchalari A to'g'ri to'rtburchak ichida joylashtirilgan.

Ayonki, (3.61) tenglamalar chiziqli aktiv A ikkiqutblikning tashqi tavsifini ifodalaydi. Ular oldin batafsil o'rganilgan va 3.10, b va v-rasmlarda keltirilgan oddiy chiziqli manbani tavsifidan (generator) farq qilmaydi (bunda $R_i = 1/G_i$ ichki qarshilik).

Agar chiziqli tavsiflar (3.40)ning S va V (yoki K va N) parametrlari berilgan bo'lsa, ularga aynan o'xshash bo'lgan tavsifga ega bo'lgan soddalashtirilgan manba (generator) parametrlari ($R_i = 1/G_i$ va Y_e yoki I)ni aniqlash og'ir ish emas.



3.14-rasm. Aktiv ikki qutblikka keltirish.

$$R_i = -B = -1/N; \quad E = U_{yk} = C; \quad J = I_{qt} = K. \quad (3.62)$$

Bunday manba (generator) koʻrilayotgan zanjirning aktiv ikki qutblik deb qaralayotgan boʻlagi uchun ekvivalentdir va demak, yuk toki I_{yk} ning tashqi shoxobcha qarshiligi R_{yk} ga bogʻliqligi oddiy ifodalanadi (3.14, b-rasm).

$$I = U_0 / (R_{yk} + R_i) \quad (3.63)$$

2.14, v-rasmda keltirilgan zanjirning chiqish klemmlaridagi kuchlanish tashqi shoxobcha oʻtkazuvchanligiga bogʻliqligi ham shunga oʻxshash ifodalanadi.

$$U = I_{qt} / (G_{yk} + G_i) \quad (3.64)$$

Tenglik (3.63)da $R_{yk} = 0$ (qisqa tutashuv) deb faraz qilib, qisqa tutashuv tokining qiymatini aniqlaymiz.

$$I_{qt} = U_{qt} / R_{yk} \quad (3.65)$$

Shuningdek, (3.64)da $G_{yu} = 0$ deb hisoblab, yuksiz ishlash kuchlanishini aniqlaymiz.

$$U_0 = I_{qt} / G_i. \quad (3.66)$$

Ushbu tenglamalarning har biri quyidagiga olib keladi.

$$R_i = I / G_i = U_0 / I_{qt}. \quad (3.67)$$

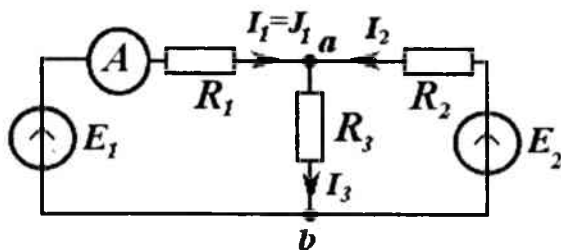
Oʻzgarmas parametrli murakkab zanjirlarni aktiv ikkiqutblik shakliga keltirish, aksariyat, zanjirning analitik hisoblashlarini soddalashtiradi (ekvivalent generator usuli). Bundan tashqari, chiziqli ikkiqutbliklarning tashqi tavsiflarini toʻlaligicha aniqlaydigan parametrlar tajriba yordamida aniqlanishlari mumkin (bu esa juda muhim xususiyat); yukning qandaydir ikki rejimlari uchun U' , I' va U'' , I'' qiymatlari berilgan boʻlsa, har doim tenglama (3.62)ning har bir ikki parametri (ikki oʻzgarmaslari) qiymatlarini aniqlash mumkin.

Misol. 3.15-rasmda keltirilgan zanjirda ikki parallel ulangan manba umumiy yuk r_3 ni taʼminlaydilar. Birinchi generator shunday rostlanganki, uning uzatayotgan toki 40 A ga teng; ikkinchi generatorning EYKi 660 V ga, uning ichki qarshiligi $R_2 = 1 \Omega$ ga teng. Agar R_3 yuk qarshiligi 2 Ω dan 20 Ω gacha oʻzgaradigan boʻlsa, undagi kuchlanishning ushbu qarshilik oʻzgarishiga bogʻlanishini aniqlang.

Ushbu hisoblashni bajarish uchun ikkala manbani bitta manba bilan almashtirish tavsiya etiladi.

Yechish. 3 - shoxobchani uzib ($R_3 \rightarrow \infty$), uning a va b klemmlari orasidagi kuchlanishni aniqlaymiz.

$$U_0 = J_1 \cdot R_2 + E_2 = 700 \text{ V}.$$



3.15-rasm. Ikki parallel ulangan manba.

3-shoxobchani qisqa tutashtirib ($R_3 \rightarrow 0$) quyidagi qisqa tutashuv tokini aniqlaymiz.

$$I_{qt} = J_1 + E_2 / R_2 = 700 \text{ A}.$$

Demak, almashtirilishi lozim bo'lgan yagona manbani tasavvur qilish mumkin, uning EYKi 700 V.ga teng bo'lib, ichki qarshiligi $R_i = 1 \Omega$.

Oddiy hisoblashlardan (3.15,b-rasm) quyidagini hosil qilamiz:

$$U = 700 \cdot R_3 / (R_3 + 1).$$

Zanjir chiziqli bo'lgani uchun qarshilik R_3 ning qiymati 2Ω dan 20Ω gacha o'zgarganda U_{ab} kuchlanish, R_3 ning nochiqliki funksiyasi sifatida, 467V.dan 665V.gacha o'zgarar ekan.

Ichki qarshilikni aniqlash. Hisoblashlarda, aksariyat, ichki qarshilik r_i ning qiymatini U_0 / I_{qt} sifatida emas, balki barcha manbalar E EYKlari va J toklari nolga teng bo'lgandagi ikki qutblikning kirish qarshiligi

$$R_i = R_{kir} \quad (3.68)$$

sifatida aniqlash qulayroq.

Misol. J tok manбайдan ta'minlanadigan Uiston ko'prigining (3.16,a-rasm) diagonalidagi I_5 tok qiymatini aniqlang.

Yechim. Izlanayotgan tokni (3.63) dan aniqlash mumkin.

$$I_5 = U_0 / (R_5 + R_i),$$

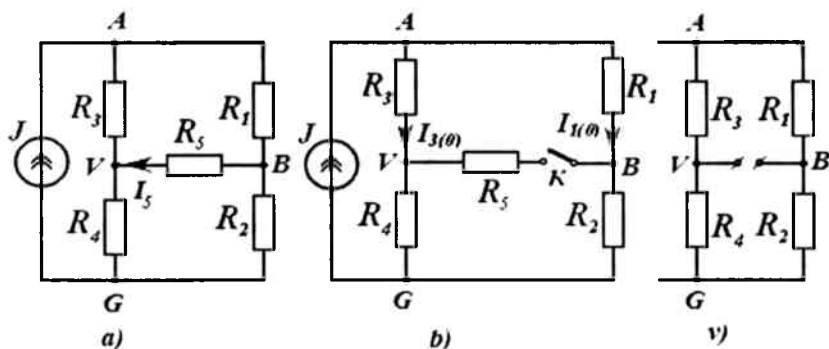
bunda, U_0 - ko'priknining B va V nuqtalari orasidagi yuksiz ishlash kuchlanishi (diagonal uzilgan) (3.16,b-rasm); R_i -uning B va

V tugunlari orasidagi kirish qarshiligi (manba toki $J = 0$ bo'lganda).

Diagonal uzilgan bo'lsa (3.16, *b*-rasm)

$$U_0 = U_{BV(0)} = R_3 I_{3(0)} - R_1 I_{1(0)}.$$

Bu tenglikka kiruvchi toklar (2.39) ifoda orqali berilgan J tokning



3.16-rasm. Parallel shoxobchalarni taqsimlanishi.

parallel shoxobchalarda taqsimlanishi sifatida aniqlash mumkin.

$$I_{3(0)} = J \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}; \quad I_{1(0)} = J \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}.$$

Oddiy soddalashtirishdan so'ng quyidagi ifoda hosil qilinadi.

$$U_0 = J(R_2 R_3 - R_1 R_4) / R.$$

Shunga e'tiborni qaratish zarurki, $R_2 R_3 = R_1 R_4$ bo'lganda $U_0 = 0$ bo'ladi (ko'priq muvozanatining sharti). Bunda diagonalidagi tok nolga teng.

Manba shoxobchasi uzilgan bo'lsa ($J = 0$) B va V tugunlari orasidagi kirish qarshiligini ikki parallel shoxobchalar (3.12, *b*-rasm) qarshiliklari sifatida aniqlash oson. Bir shoxobchaning qarshiligi $R_1 = R_3$, ikkinchisining qarshiligi $R_2 + R_4$ bo'ladi. Bunda,

$$R_{kir} = R_i \frac{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}.$$

Aktiv ikki qutblikni (3.15, *a*-rasm) kuchlanish manbai va ketma-ket ulangan qarshilik (3.15, *b*-rasm) sifatida almashtirish imkoniyatini *Tevenen teoremasi* deyiladi, tok manbai va parallel

ulangan o'tkazuvchanlik bilan almashtirishni (3.15,v-rasm) *Norton teoremasi* deyiladi. Ushbu olimlar birinchi marta sxemalarni shunday ekvivalent almashtirish imkoni borligini isbotlaganlar.

3.9. Kontur toklar va tugun potentsiallari usullari

Agar elektr zanjirlarida tok va kuchlanishning taqsimlanishini hisoblashda Kirxgof qonunlarining faqat bittasidan foydalanilsa, ya'ni tenglamalar faqat tugunlar uchun (KTQ) yoki faqat konturlar uchun (KKQ) tuzilsa, u holda umumiy tenglamalar soni kamayishi mumkin.

Tenglamalar shunday tuzilishi lozimki, unda boshqa qonunlar bajarilishi ta'minlansin. Bunday tenglamalarni tuzishning ikki usuli Maksvell tomonidan taklif etildi, ulardan biri *kontur toklar usuli* bo'lsa, ikkinchisi – *tugun potentsiallari usuli* deb nomlangan.

Kontur toklar usuli. Elektr zanjirining ixtiyoriy shoxobchasidagi tokni, har biri o'zining berk konturida oquvchi, shu shoxobcha bo'ylab o'zgaraydigan bir necha toklar yig'indisi deb qarash mumkin. Haqiqiy toklarning bunday tashkil etuvchilari *kontur toklari* deb ataladi. Faqat bir konturga taalluqli ixtiyoriy shoxobchaning toki kontur toki bilan mos bo'ladi. Ikki yoki bir necha konturlarga taalluqli shoxobchalardagi toklar, mazkur kontur toklarining algebraik yig'indisiga teng. Kontur toklari tugunlardan o'tganda uzluksiz bo'ladilar: demak, toklarni shunday ta'riflaganda, KTQ so'zsiz bajariladi.

Shoxobcha toklarini kontur toklariga ajratish zanjirning tahlilidan kelib chiqadi. Kontur toklarini shoxobcha-vatar toklariga o'xshatish mumkin, bunday vaziyatda mustaqil kontur toklari tenglamalarining soni

$$K_2 = SH + 1 - T \quad (3.69)$$

noma'lumlar soni bilan teng bo'ladi; barcha boshqa shoxobchalarning toklari kontur toklari orqali ifodalangan bo'ladi.

3.17,a-rasmda ikki kontur toklari I_1 va I_2 bo'lgan oddiy elektr zanjiri keltirilgan. Zanjirning a va b shoxobchalaridagi toklar kontur toklariga teng.

$$I_a = I_1; \quad I_b = I_2.$$

Zanjirning s shoxobchasidagi tok ikki boshqa shoxobchalar toklarining yig'indisiga teng: u ikkala kontur uchun umumiy bo'lgan shu shoxobchadan oqib o'tayotgan kontur toklarning ham yig'indisiga teng.

$$I_s = I_1 + I_2.$$

KKQga binoan zanjirning birinchi konturi uchun

$$R_a I_a + R_c I_c = E_a - E_c$$

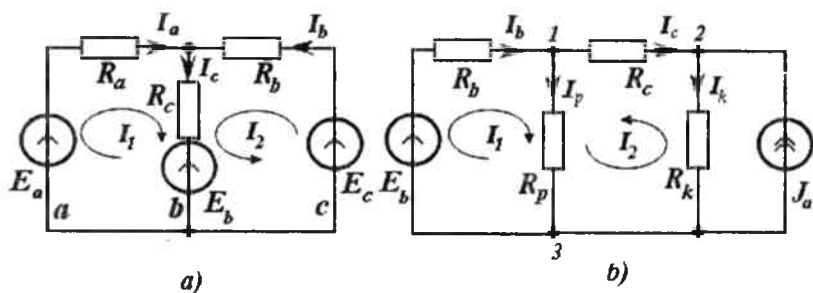
yoki

$$(R_a + R_c) I_1 + R_c I_2 = E_a - E_c.$$

yangi belgilashlar qabul qilinsak

$$R_{11} \cdot I_1 + R_{12} I_2 = E_1,$$

bunda, $R_{11} = R_a + R_c$ - birinchi kontur tarkibiga kirgan barcha shoxobchalar qarshiliklarining yig'indisi: $R_{12} = R_c$ - birinchi va ikkinchi konturlar uchun umumiy bo'lgan shoxobcha qarshiligi: $E_1 = E_a - E_c$ - birinchi kontur tarkibiga kirgan barcha *EYK* lar algebratik yig'indisi; musbat ishora bilan yo'nalishi kontur toki yo'nalishiga mos bo'lgan *EYK* belgilangan.



3.17-rasm. Ikki kontur toklari bo'lgan oddiy zanjir.

Shunga o'xshash, ikkinchi konturda

$$R_{21} I_1 + R_{22} I_2 = E_2$$

bunda,

$$R_{21} = R_c; R_{22} = R_b + R_c; E_2 = E_b - E_c.$$

Ta'riflanishiga ko'ra ikki kontur uchun umumiy shoxobchaning qarshiligi $R_{12} = R_{21}$.

Yuqorida ko'rilganlarni ixtiyoriy konturlar soni uchun umumlashtirsak, tarkibida tok manbai bo'lmagan zanjir uchun kontur toklari tenglamalari tizimi quyidagi andozada yoziladi.

$$(3.70) \quad \left. \begin{aligned} R_{11} \cdot I_1 + R_{12} \cdot I_2 + R_{13} \cdot I_3 + \dots &= E_1 ; \\ R_{21} \cdot I_1 + R_{22} \cdot I_2 + R_{23} \cdot I_3 + \dots &= E_2 ; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \end{aligned} \right\}$$

Ushbu tenglamalar tizimini matritsa shaklida qisqartirib yozish mumkin.

$$R_{ln} I_n = E_l . \quad (3.71)$$

Kontur toklar tenglamalar tizimidagi bir xil indeksli qarshiliklar R_{ln} . L -konturdagi barcha shoxobchalar qarshiliklari yig'indisiga teng: har qanday har xil indeksli ($l \neq n$) R_{ln} qarshilik ikkala qo'shni l va n konturlar uchun umumiy bo'lgan shoxobcha qarshiligiga teng: agar l va n konturlarning umumiy shoxobchasidagi toklar musbat ishoralari har xil yo'nalgan bo'lsa, u holda R_{ln} qarshiligi oldida minus ishorasi quyiladi.

Ta'rif bo'yicha

$$R_{ln} = R_{nl} . \quad (3.72)$$

Tenglamalar tizimi (3.71)ning kontur toklariga nisbatan yechimini ham matritsa shaklida yozish qulayliklarga olib keladi

$$I_n = G_{nl} E_l . \quad (3.73)$$

O'tkazuvchanlik G_{nl} ning matrisasi barcha elementlari bu ifodada Kramerning D -determinanti va mazkur qarshilik matrisasi R_{ln} ning algebraik qo'shimchasi A_{ln} orqali keltirilgan.

$$G_{nl} = A_{nl} / D \quad (3.74)$$

Keyingi tenglik berilgan $R_{ln}=R_{nl}$ qarshilik tizimi matrisasi simmetrik bo'lganidagina haqiqiydir.

Qarshilik matrisasi $R_{ln}=R_{nl}$ simmetriyali ekanligidan algebraik qo'shimchalarning $A_{nl}=A_{ln}$ simmetriyaligi kelib chiqadi va, demak, o'tkazuvchanlik elementlari matrisasi ham simmetrik bo'lishi zarur.

$$G_{nl}=G_{ln} \quad (3.75)$$

G_{nl} koeffitsiyentlar, umumiy holda, kontur o'tkazuvchanliklari deb ataladi.

Ixtiyoriy ikki tugunga ulangan tok J_a manbaining zanjirda mavjudligi, kontur toklari usulini qo'llashga to'sqin bo'la olmaydi. Darxaqiqat, J_a tokli shoxobchani yangi, ma'lum bo'lgan kontur tokli shoxobcha deb ko'rish mumkin. Ammo, konturlarni tanlash ixtiyoriydir, shuning uchun J_a kontur toki tok manbai ulangan tugunni bog'lovchi ixtiyoriy shoxobchadan oqib o'tadi deb hisoblash mumkin. Bunda J_a kontur toki bilan umumiy shoxobchalari bo'lgan barcha konturlarning tenglamalarida $R_{ia}J_a$ hadi qo'shilishl zarur, bunda R_{ia} barcha ℓ va a konturlar uchun umumiy bo'lgan shoxobchalar qarshiligi yoki I_i va J_a toklar yo'nalishlari qarama-qarshi bo'lgan mazkur shoxobchalarning manfiy ishorada olingan qarshiliklaridir.

Shunday qilib, (3.71) tenglamalar tizimining chap tomonida

$$R_{in} I_n + R_{ia} J_a = E_i \quad (3.76)$$

hadi qo'shiladi.

Bunda, tenglamalar soni ℓ ga tengligicha qoladi, chunki *no'malum kontur toklar soni ortgani yo'q*.

Qo'shimcha hadni tenglamalarning o'ng tomoniga o'tkazib, tenglamalar (3.76) tizimini quyidagi shaklga keltiramiz:

$$R_{in} I_n = E_i - R_{ia} J_a = \bar{E}_i. \quad (3.77)$$

$\bar{E}_i$ qiymatni konturning keltirilgan EYKi deb nomlash mumkin.

Misol ta'rifasida 3.17, b-rasmdagi zanjirni ko'ramiz; uning o'ng shoxobchasida tok manbai mavjud. Zanjir sxemasida ko'rsatilgan ikki konturning tenglamalarini tuzish etarlidir. Ularni tuzishda J_a tokning hosil qilgan kuchlanishlar pasayuvini kiritish zarur.

$$\left. \begin{aligned} R_{11}I_1 + R_{12}I_2 &= E_1 = E_b \\ R_{21}I_1 + R_{22}I_2 + R_k J_a &= E_2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.78)$$

Bunda, $R_{11} = R_b + R_p$, $R_{12} = R_r$, $R_{22} = R_k + R_c + R_p$ va $R_{21} = R_r$. Agar, J_a toki k -shoxobcha orqali oqib o'tadi, deb faraz qilsak, u holda J_a toki birinchi konturning birorta shoxobchasi orqali o'tmaydi, $J_a R_k$ kuchlanishlar pasayuvi esa faqat ikkinchi konturda ishtirok etadi va J_a yo'nalishi ikkinchi kontur toki yo'nalishi bilan mos bo'ladi. Shunga e'tiborni qaratish muhimki, J_a toki uchun boshqa yo'l, masalan, s va r shoxobchalari orqali oqib o'tishini ham tahmin qilish mumkin edi. Bu holatda (3.78)ning birinchi ifodasiga

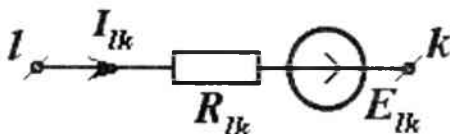
$R_p J_a$, ikkinchi ifodasiga esa $R_k J_a$ o'rniga $(R_s + R_p) J_a$ qo'shimchalar kiritiladi. Ularning ishoralari, mos ravishda, I_1 va I_2 toklarning yo'nalishlari bilan muvofiqlashtiriladi. Natijada, (3.78) o'rniga quyidagi tenglama hosil bo'ladi.

$$\left. \begin{aligned} R_{11}I_1 + R_{12}I_2 + R_k J_a &= E_b \\ R_{21}I_1 + R_{22}I_2 + (R_s + R_p)J_a &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.79)$$

Tugun potentsiallari usuli. Ushbu usulning nomidan kelib chiqilsa, toklar tenglamalarini tugunlar uchun tuzish kifoyadir.

Faraz qilaylik, l va k tugunlari (3.18-rasm) birorta shoxobcha bilan bog'langan bo'lsin: I_{lk} - tugun l dan k tugunga yo'nalgan shu shoxobcha toki; E_{lk} - tugun l dan k tugun tomon yo'nalgan shu shoxobcha EYKi; R_{lk} - ushbu shoxobchani qarshiligi. Unda (3.7)ga ko'ra l va k tugunlar orasidagi potentsiallar farqi quyidagicha yoziladi.

$$\varphi_l - \varphi_k = u_{lk} = -E_{lk} + R_{lk} I_{lk} \quad (3.80)$$



3.18-rasm. Elektr zanjir tarmog'i.

Kirxgof kuchlanishlar qonunini berik konturning barcha shoxobchalari uchun shu kabi tenglamalarni qo'llash va so'ngra ularning algebrik yig'indisini hosil qilish natijasi deb qarash mumkin. Shuning uchun shoxobchalardagi toklar aynan (3.80) tenglama bo'yicha yozilsa

$$I_{lk} = (\varphi_l - \varphi_k + E_{lk}) g_{lk} \quad (3.81)$$

KKQ o'z-o'zidan bajariladi: bunda $G_{lk} = 1/R_{lk}$; ushbu (3.80) tenglikni Omning umumlashtirilgan qonuni ifodasi deb qarash mumkin.

Ushbu belgilashlarda $I_{lk} = -I_{kl}$, $E_{lk} = -E_{kl}$, biroq

$$G_{lk} = G_{kl} \quad (3.82)$$

Zanjirning $T = N + 1$ tugumi bo'lgan barcha shoxobchalarining qarshiliklari (yoki o'tkazuvchanliklari), kuchlanish manbalarining EYK E_{im} lari va tok manbalarining tok J_{tk} lari berilgan deb faraz qilib, tugun tenglamalarini tuzishga o'tamiz.

Agar 1-tugunga tashqaridan (tok manбайдan) J_1 toki oqib kelayotgan bo'lsa, u holda KTOga muvofiq 1-tugun uchun toklar tenglamasi quyidagicha bo'ladi:

$$I_{12} + I_{13} + \dots + I_{1, n+1} = J_1;$$

ikkinchi tugun uchun

$$I_{21} + I_{23} + \dots + I_{2, n+1} = I_2$$

ixtiyoriy k tugun uchun

$$I_{k1} + I_{k2} + \dots + I_{k, n+1} = J_k.$$

Har bir tok ifodalarini (3.81)ga ko'ra yoyib chiqsak, k -tugun uchun quyidagini hosil qilamiz:

$$\begin{aligned} & (\varphi_k - \varphi_1 + E_{k1})G_{k1} + (\varphi_k - \varphi_n + E_{kn})g_{kn} + \dots \\ & \dots + (\varphi_k - \varphi_{n+1} + E_{k, n+1})G_{k, n+1} = J_k \end{aligned} \quad (3.83)$$

No'malum potentsiallar oldidagi ko'paytuvchilarni guruhlab, oxirgi tugunning potentsialini nolga teng deb ($\varphi_{n+1} = 0$) faraz qilib, barcha ma'lum qiymatlarni tenglik alomatining o'ng tomoniga o'tkazib, k -tugun uchun tenglamani quyidagi ko'rinishga keltiramiz:

$$-G_{k1}\varphi_1 - G_{k2}\varphi_2 - \dots + G_{kk}\varphi_k - \dots - G_{kn}\varphi_n = J_{kkel} \quad (3.84)$$

Ushbu bog'lanishdagi yozuvlarni qisqartirish uchun quyidagi belgilashlar kiritildi:

$$G_{kk} = G_{k1} + G_{k2} + \dots + G_{kn} + G_{k, n+1}; \quad (3.85)$$

bu k tugunga ulanuvchi barcha shoxobchalarning o'tkazuvchanliklari yig'indisidir.

$$\bar{J}_{kkel} = J_k + G_{1k}E_{1k} + G_{2k}E_{2k} + \dots + G_{nk}E_{nk} + G_{n+1,k}E_{n+1,k} \quad (3.86)$$

Bu belgilashlardagi ikki indeksli tartibi o'zgarishi bilan EYKlar oldidagi ishoralar o'zgartirildi. E'tibor bersak, qo'shiluvchi hadlar orasida G_{kk} keltirilmagan. (3.86) yig'indining mazmunini oddiy talqin qilish mumkin: J_k - bu barcha haqiqiy va ekvivalent manbalardan k tugunga keluvchi to'la tokdir. Uning qiymatini tugun tokining $\bar{J}_{kkel}$ keltirilgan qiymati deb atash mumkin.

ekvivalent shoxobchaniing o'tkazuvchanligi $G_{kp} = G'_{kp} + G''_{kp} + \dots$ ga teng bo'lar edi.

Agar har bir shoxobchaniing tarkibida o'zining $E', E'', \dots$ EYKlari bo'lsa, u holda parallel shoxobchalar uchun ekvivalent tok manbainig toki (tashqaridan tugunga kiruvchi tok) qiymati

$$J_k = G_{kp} E' + G_{kp} E'' + \dots \quad (3.90)$$

ga teng bo'ladi. Bunda, *ilgari keltirilgan ta'riflar o'zgarmaydi*. Masalan: 3.17, b-rasmdagi $T = n + 1 = 3$ tugunli zanjir uchun, $\varphi_3 = 0$ ni tanlab (3.90) tenglamani 1 va 2 tugunlar uchun yozamiz; (3.89) va (3.90)larni e'tiborga olib quyidagini hosil qilamiz.

$$\left. \begin{aligned} G_{11}\varphi_1 - G_{12}\varphi_2 &= E_b/R_b \\ -G_{21}\varphi_1 + G_{22}\varphi_2 &= J_a \end{aligned} \right\}$$

Bunda,

$$G_{11} = 1/R_b + 1/R_p + 1/R_c; G_{12} = G_{21} = 1/R_c; G_{22} = 1/R_c + 1/R_d.$$

Tenglamalar tizimi (3.91) ning potentsiallarga nisbatan yechimini matritsa shaklida keltirish mumkin:

$$\varphi_1 = a_{1k} \cdot \bar{J}_k \quad \text{kel} \quad (3.91)$$

[(3.71) va (3.72) ifodalar ta'rifiga qarang]. Berilgan (3.87) tizimda shartga ko'ra $b_{kt} = b_{tk}$ bo'lganligi uchun, elementlar a_{tk} tizimi matritsasi simmetrikdir.

$$a_{kt} = a_{tk}.$$

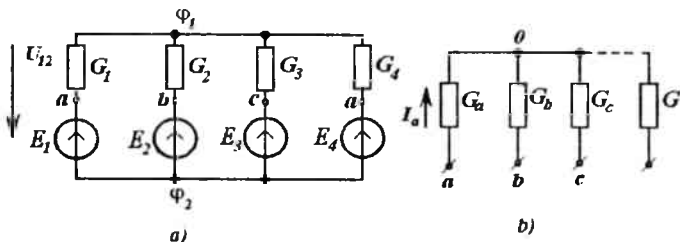
Qilingan farazga ko'ra oxirgi $(n+1)$ tugun uchun $(n+1)$ indeks o'rniga bu tugunni «b»-bazis tugun deb belgilasak. uning potentsialini nolga teng deb qabul qilamiz. Ayonki, qolgan barcha tugunlarning potentsiallari bazis tugunga nisbatan kuchlanishlar $\varphi_1 = U_{1b}; \varphi_2 = U_{2b}; \dots$ deb qabul qilinadi. Shuning uchun tugun potentsiali deyish o'rniga tugun kuchlanishlari deyiladi va bu usulning nomi *tugun kuchlanishlari usuli* deb qabul qilingan.

Tugun potentsiallari tenglamalar tizimini qo'llash, parallel ulangan shoxobchali zanjirlarni hisoblashda ayniqsa, yuqori samaralidir. Masalan, 3.19, a-rasmdagi *ikki tugunli zanjir*da tugunlar orasidagi kuchlanish bitta tenglama orqali aniqlanadi.

Tanlashda $\varphi_1 = 0, k=1$ va $J_k = 0$ shartlari qabul qilinsa. (3.87) va (3.86)lardan quyidagini hosil qilamiz.

$$G_{11}\varphi_1 = G_1E_1 + G_2E_2 + G_3E_3 + G_4E_4,$$

bunda, G_{11} koeffitsiyentning qiymati quyidagicha aniqlanadi:



3.19-rasm. Ikki tugunli zanjir.

$$G_{11} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 = \Sigma G = S.$$

Bulardan

$$U_{12} = \varphi_1 = \Sigma GE / S \quad (3.92)$$

bunda,

$$\Sigma GE = G_1E_1 + G_2E_2 + \dots$$

Ba'zi shoxobchalarda kuchlanish manbalari bo'lmashligi mumkin; bunday holatda (3.92)ning suratida ushbu had tushirib qoldiriladi, biroq $S = \Sigma G$ ning tarkibida ushbu shoxobchani ham o'tkazuvchanligi qatnashadi.

Yuqorida keltirib chiqarilgan (3.92) ifodani amaliyotda ko'p uchraydigan quyidagi masalani yechishda qo'llash mumkin:

- shoxobchalarning potentsiallari $\varphi_a, \varphi_b, \dots$ berilgan tugunlariga potentsiallari noma'lum bo'lgan va umumiy 0 tugunida uchrashadigan shoxobchalar ulangan bo'lsa;

- o'tkazuvchanliklari ma'lum bo'lgan shoxobchalar toklarini aniqlash zarur bo'lsa.

Bunday zanjir 3.19.b-rasmida tasvirlangan: u *yulduz* deb ataladi, shoxobchalari esa *yulduzning nurlari* deyiladi.

3.19.a va b-rasmlardagi zanjirlarni taqqoslangandan so'ng shunga ishonch hosil qilish mumkinki, (3.92) ifodadagi $E_1; E_2; \dots$ larni potentsiallar $\varphi_a, \varphi_b, \dots$ lar bilan va mos ravishda, $G_1, G_2, \dots$ larni $G_a, G_b, \dots$ lar bilan almashtirib, 0 nuqtaning potentsialini aniqlash mumkin bo'lar ekan.

$$\varphi_0 = (\varphi_a G_a + \varphi_b G_b + \dots) / S. \quad (3.93)$$

Agar barcha tugunlar potentsiallari ma'lum bo'lsa, o'rta nuqtaning potentsialini aniqlab, ixtiyoriy shoxobchanning tokini aniqlash oson; masalan,

$$I_a = (\varphi_a - \varphi_0) G_a \text{ va h.k.}$$

Tenglamalar tizimlarini tanlash. Kirxgof tenglamalari yordamida zanjirlarni hisoblashda doimo kontur toklari yoki tugun potentsiallari usuli bilan ularning tenglamalarini yozish kerak. Bu ikki tenglamalar tizimidan birini tanlashda, tabiiyki, ularni yechish osonrog'ini, ya'ni tenglamalar soni kamroq bo'lganini tanlash zarur bo'ladi.

3.10. O'zarolik prinsipi

3.20,*a*-rasmida keltirilgan zanjirda ikki tashqi (1 va 2) shohobchalar o'zaro chiziqli elementlari bo'lgan, manbalari bo'lmagan ixtiyoriy tarmoqlangan elektr zanjiri bilan bog'langan bo'lsin: bunday passiv zanjir P harfi bilan belgilangan; passiv zanjirning to'rtburchak ichiga olingan barcha parametrlari o'zgarmas bo'lib qoladi. Ikki tashqi zanjir uchun o'zarolik prinsipi quyidagi tenglik bilan ifodalinishi mumkin.

$$I_1' U_1'' + I_2' U_2'' = I_1'' U_1' + I_2'' U_2', \quad (3.94)$$

bunda bir va ikki shtrixlar bilan belgilangan tok va kuchlanishlar ikki har xil rejimlar uchundir.

Xususiyl holda, bir kuchlanish manbai bir rejimda (3.20,*b*-rasm) birinchi shoxobchaga ($U_1' = E$; $U_2' = 0$), ikkinchi rejimda esa (3.20,*v*-rasm) ikkinchi shoxobchaga ($U_1'' = 0$; $U_2'' = E$) ulangan. Bunda (3.94)dan quyidagi hosil bo'ladi:

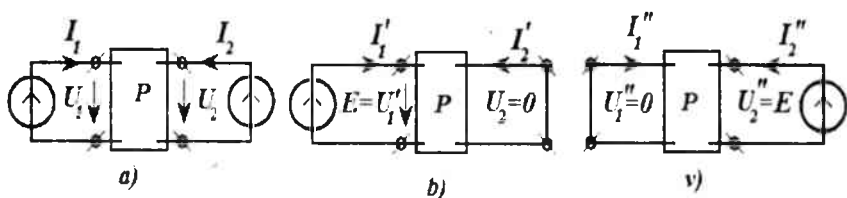
$$0 + I_2' E = I_1' E = 0 \quad \text{yoki} \quad I_2' = I_1'', \quad (3.95)$$

Ko'rilgan rejimlarda (3.94) tenglamadan I_1' va I_2'' toklari orasidagi bog'lanish haqida biror xulosa chiqarib bo'lmaydi.

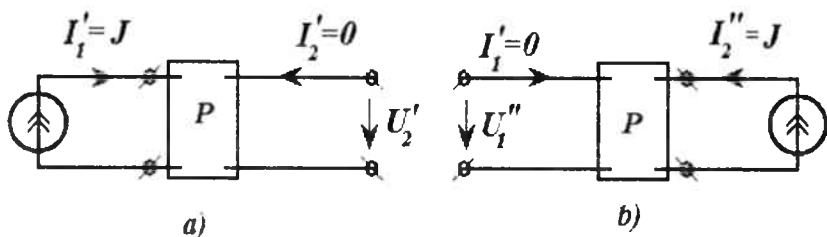
(3.95) tenglik bilan ifodalangan xususiyl hol, kontur toklari tenglamalaridan bevosita kelib chiqadi. I_1'' va I_2' larni kontur toklari deb hisoblab, (3.73)dan quyidagilarni aniqlaymiz:

$$I_2' = y_{21} E \quad \text{va} \quad I_1'' = y_{12} E.$$

Birinchil holatda faqat birinchi kontur EYK ning qiymati $E_1 = E$ noldan farq qilsa, ikkinchisida $E_2 = E$ noldan farq qiladi, shuning uchun o'tkazuvchanlik koeffitsiyentlari $G_{21} = G_{12}$ uzatish o'tkazuvchanliklari $y_{21} = y_{12}$ bilan mos keladilar (kontur toklari shoxobcha toklari bilan mos bo'ladilar).



3.20-rasm. Passiv zanjir.



3.21-rasm. O'zarolik prinsipi.

Boshqa xususiy holda, tok manbai birinchi shoxobchadan ikkinchisiga (3.21, *a* va *b*-rasmlar) o'tkazilsa va boshqa shoxobcha uzilganligicha qolsa, (3.94) tenglamadan quyidagilarni aniqlaymiz:

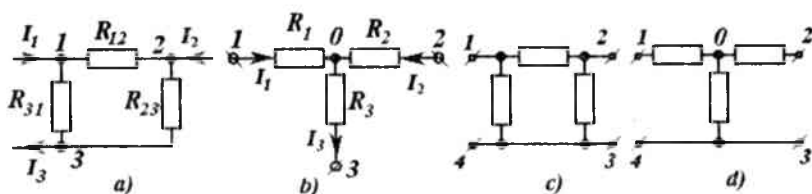
$$JU_1'' + 0 = 0 + JU_2' \quad \text{yoki} \quad U_1'' = U_2'.$$

Shunga e'tiborni qaratish zarurki, o'zarolik prinsipi asosida U_1' va U_2' kuchlanishlar bog'lanishlari haqida birorta xulosaga kelib bo'lmaydi.

Ikki rejim uchun yozilgan tenglamalar tizimini tahlil qilish natijasida va uzun algebraik o'zgartirishlardan so'ng umumlashtirilgan ifodani keltirib chiqarish mumkin (3.94). Biroq uning isboti maydonlar nazariyasidan juda oson keltirib chiqarilishi mumkin.

3.11. Elektr zanjir sxemalarida «uchburchak» ulashdan ekvivalent «yulduz» ulashga va aksincha o'tkazish tenglamalari

Yuqorida elektr zanjirlarini soddalashtirish maqsadida ularni o'zgartirish usullari birnecha marta ko'rilgan edi: parallel shoxobchalar o'rniga bir ekvivalent qarshilik olindi, tarmoqlangan aktiv zanjir o'rniga ekvivalent generator qabul qilindi; barcha holatlarda ham bitta ikki qutblik o'rniga boshqa - ekvivalent ikki qutblik qabul qilindi.



3.22-rasm. Uchburchak va yulduz usulida ulanish.

Elektr zanjirlarining hisoblash va tahlilini soddalashtirish maqsadida, ba'zan zanjirning boshqa qismlari bilan uch yoki ko'proq nuqtalar orqali bog'langan (uch qutbliklar yoki ko'p qutbliklar) zanjirning bir qismini o'zgartirish zarurati tug'iladi. Ularning o'zgartirilishi ushbu ko'p qutblikning o'rniga elektrik nuqtai nazardan unga ekvivalent bo'lgan, biroq ichki bog'lanishlari bilan farq qiluvchi boshqa ko'p qutblikni qabul qilish ko'zda tutiladi. Bunday o'zgarishlar zanjir o'zgartirilmagan qismlarining ishlash rejimiga ta'siri bo'lmagandagina ekvivalent hisoblanadi.

Ikki yoki undan ko'p qutbliklar ekvivalentligi shuni anglatadiki, ularning har qanday rejimlarida ham, ya'ni tashqaridan birinchi va ikkinchi ko'p qutbliklarning qutblari (klemmalari)ga oqib kelayotgan toklar ($I_1 = I'_1; I_2 = I'_2$) teng bo'lganda, shu klemmalar (birinchisining $\varphi_1; \varphi_2; \dots$) va (ikkinchisining $\varphi'_1; \varphi'_2; \dots$) potentsiallari teng bo'ladi.

Elektr zanjirlarini hisoblash jarayonlarida *passiv uchburchaklarni passiv uch qirrali yulduzlarga to'g'ri va teskari o'zgartirishlar* keng qo'llaniladi.

3.22-rasmda shoxobchalarni uchburchak (a) va yulduz (b) usulida ulanishlari ko'rsatilgan; bunday uch qutblik sxemalari P va T harflariga o'xshashligi tufayli (3.22, c va d- rasmlar) P-simon va T-simon deb nomlangan. Bunda, yulduz ulanishning (3.22, b-rasm) umumiy "0" nuqtasi tashqi zanjir bilan ulanmagan deb hisoblanadi, aks holda u uch qutblik emas, balki to'rt qutblik bo'lar edi. Uchburchak va yulduz ulangan uch qutbliklar ekvivalent bo'lgandagi ular shoxobchalari qarshiliklarining qiymatlari orasidagi bog'lanishlarni aniqlaymiz.

Uchburchak va yulduz uchun ular tugunlarining potentsiallari va tugunlarga oqib kelayotgan toklar orasidagi bog'lanish tenglamalarini keltirib chiqaramiz. Yulduz uchun

$$\varphi_1 = a_{11}I_1 + a_{12}I_2; \varphi_2 = a_{21}I_1 + a_{22}I_2,$$

uchburchak uchun

$$\varphi_2 = a'_{11}I_1 + a'_{12}I_2; \varphi_2 = a'_{21}I_1 + a'_{22}I_2.$$

Uchinchi tugunning potentsiali nolga teng deb qabul qilindi; aniqki, uchinchi tok birinchi va ikkinchilarning algebratik yig'indisiga teng.

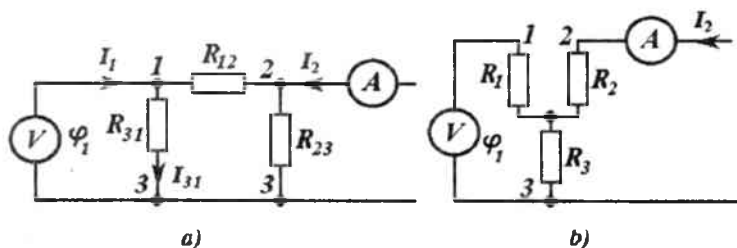
Ko'rilayotgan uch qutbliklarning ekvivalentlik shartlari uchta tenglamalar bilan ifodalanadi.

$$a_{11} = a'_{11}; a_{12} = a'_{12}; a_{22} = a'_{22}, \quad (3.96)$$

chunki (3.75) ga ko'ra koeffitsiyentlar

$$a_{21} = a_{12}; a'_{21} = a'_{12}.$$

Ekvivalent uchqutblikni tanlaganda uchchala qarshiliklarning kerakli qiymatlarini tanlash imkoniga ega bo'lamiz. Shuning uchun, masalaning yechimi bor, ya'ni uch qarshiliklarning qiymatlari shunday miqdordagi shartlarni bajaradi deb faraz qilamiz.



3.23-rasm. Ekvivalentlik shartlari.

Koeffitsient a_{12} va a'_{12} larni aniqlash uchun I_1 tokning qiymatini nolga tenglashtiramiz va berilgan I_2 tok uchun birinchi tugun (3.23-rasm) potensialini aniqlaymiz.

Bunda yulduz (3.23, b-rasm) uchun

$$\varphi_1 = R_3 I_2 \quad (3.97)$$

va, demak, $a_{12} = R_3$.

Uchburchak (3.23, a-rasm) uchun

$$\varphi_1 = r_{31} I_{13}, \quad (3.98)$$

bunda, I_{13} - tok I_2 ning bir qismidir, shuning uchun, bu tok ikki parallel shoxobchalarda taqsimlanishini e'tiborga olib, uni aniqlash mushkul ish bo'lmaydi.

$$I_{13} = I_2 R_{23} / (R_{12} + R_{23} + R_{31}). \quad (3.99)$$

Tokning (3.81)dagi qiymatini (3.82)ga quyib, quyidagini aniqlaymiz:

$$a_{12} = R_{31} R_{23} / (R_{12} + R_{23} + R_{31}). \quad (3.100)$$

Koeffitsientlar a_{12} va $\bar{a}_{12}$ ni tenglashtirib, ekvivalentlik shartlaridan birini aniqlaymiz.

$$R_3 = R_{31} R_{23} / R, \quad (3.101)$$

bunda,

$$R = R_{12} + R_{23} + R_{31}.$$

Ushbu shart uchburchakning uchta shoxobchalari qarshiliklari berilganda yulduz qirrasidan birining qarshiligini aniqlash imkonini beradi.

Yulduzning qolgan ikki qirralari qarshiliklarining ekvivalent uchburchak tomonlari qarshiliklari orasidagi bog'lanishni hisoblashda qolgan koeffitsiyentlarni o'zaro tenglashtirib aniqlaymiz. Biroq, simmetriya prinsipidan foydalanish ishini keskin osonlash-tiradi. Yulduzda ham, uchburchakda ham barcha shoxobchalar tashqi klemmalarga nisbatan simmetrik joylashgan. Demak, yulduzning qolgan ikki qirralari uchun yoziladigan ifodalar ham (3.86)ga o'xshash strukturaga ega bo'ladi. Shuning uchun (3.86) dagi indeksni aylana bo'ylab o'zgartirib, ularni aniqlash mumkin

$$R_1 = R_{12} R_{31} / R; \quad R_1 = R_{23} R_{12} / R. \quad (3.102)$$

Yulduz ulanishning bunday qarshiliklar qiymatlarida ushbu yulduz ulash uchburchak ulashga ekvivalent bo'ladi.

Qarshiliklarning keltirilgan qiymatlarida $a_{11} = \bar{a}_{11}$ shartning ham bajarilishini mustaqil ravishda tekshirishni o'quvchiga havola etamiz; bunda, $a_{22} = a'_{22}$ sharti 1 indeksini 2ga, 2 indeksini esa 1ga o'zgartirib hosil qilmadi.

Tenglamalar tizimi (3.101 - 3.102) ni uchburchak tomonlari qarshiliklariga nisbatan yechib, berilgan qirra shoxobchalari qarshiliklari R_1, R_2, R_3 bo'lgan yulduz ulashga ekvivalent bo'lgan uchburchak qarshiliklarini aniqlaymiz

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2 + R_1 R_2 / R_3; \\ R_{23} &= R_2 + R_3 + R_2 R_3 / R_1; \\ R_{31} &= R_3 + R_1 + R_3 R_1 / R_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.103)$$

Ushbu natijalarni boshqa usulda, toklar tenglamalarini potentsiallar orqali ifodalab aniqlash ham mumkin. Bunda yulduzchaning nol nuqtasi potentsiali ifodasi (3.93)dan foydalanish qulayroq.

Barcha qarshiliklarni o'tkazuvchanliklar bilan almashtirib, keyingi tenglamalarni simmetrik shaklga keltirish mumkin.

$$G_{12} = G_1 G_2 / S; \quad G_{23} = G_2 G_3 / S; \quad G_{31} = G_3 G_1 / S; \quad (3.104)$$

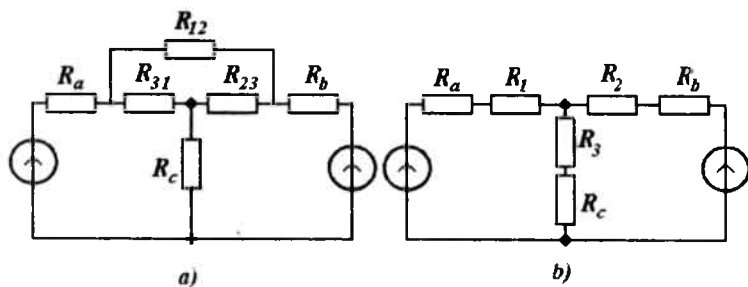
bunda, $S = G_1 + G_2 + G_3$.

Xususiyl holda, yulduzcha barcha qirralarining qarshiliklari uchburchak barcha tomonlarining qarshiliklariga teng bo'lganda, ular orasidagi bog'lanish

$$R_Y = 3R_\Delta. \quad (3.105)$$

Uchburchak va yulduzlarning shoxobchalarida EYK manbalari bo'lganda ham, keltirib chiqarilgan ekvivalentlik shartlarini tatbiq etish mumkin. Biroq, bunday holatlarda manbalarni zanjirning tashqi qismiga chiqarish lozim; bunda uchburchak uchun EYK manbalarini ekvivalent tok manbalari bilan almashtirish zarur.

Uchburchakni yulduzchaga yoki teskari o'zgartirish natijalari hisoblashni keskin soddalashtiradi. Masalan, to'rtta tuguni bo'lgan zanjir (3.24,a-rasm) tarkibida uchburchak ulangan R_{12}, R_{23}, R_{31} qarshiliklar mavjud. Ularni ekvivalent yulduz bilan almashtirgandan so'ng (3.24,b-rasm) soddalashadi va ikkita tugunli zanjirga aylanadi.



3.24-rasm. To'rtta tuguni bo'lgan zanjir.

Ko'p qirrali yulduzni ko'p burchakka aylantirishning umumiy holati. Bunday almashtirish, agar umumiy tugunga tashqi tok oqib kelmasa, har doim amalga oshirilishi mumkin.

Yulduz qirralaridagi toklar uchun (3.25,a-rasm) tenglamalar tuzib

$I_1 = G_1(\varphi_1 - \varphi_0)$; $I_2 = G_2(\varphi_2 - \varphi_0)$;... hamda umumiy nuqta potensialini (3.93)tenglik bilan ifodalab (bunda, $S = G_1 + G_2 + \dots$ - yulduz barcha qirralarining o'tkazuvchanliklari yig'indisi), quyidagilarni aniqlaymiz.

$$I_1 = G_1(1 - G_1/S)\varphi_1 - (G_1G_2/S)\varphi_2 - (G_1G_3/S)\varphi_3 - \dots;$$

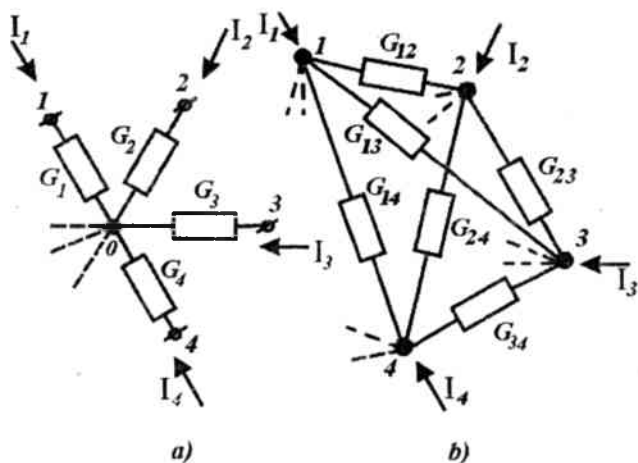
$$I_2 = -(G_2G_1/S)\varphi_1 - G_2(1 - G_2/S)\varphi_2 - (G_2G_3/S)\varphi_3 - \dots;$$

Tashqaridan ko'pburchak tugunlariga kelayotgan toklar (3.26,b-rasm) shunga o'xshash tenglamalari (3.67) ifodalari kabi o'xshash yozilishi mumkin.

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= G_{11}\varphi_1 - G_{12}\varphi_2 - G_{13}\varphi_3 - \dots; \\ I_2 &= -G_{21}\varphi_1 - G_{22}\varphi_2 - G_{23}\varphi_3 - \dots; \\ &\dots \end{aligned} \right\}$$

Keyingi ikki tenglamalar tizimini taqqoslab, quyidagilarni aniqlaymiz:

$$\left. \begin{aligned} G_{12} &= G_1G_2/S, & G_{13} &= G_1G_3/S, \\ G_{11} &= G_1(G_2 + G_3 + \dots)/S \dots \end{aligned} \right\} \quad (3.106)$$



3.25-rasm. Ko'p qirrali yulduzni ko'p burchakka aylantirishning umumiy holati.

Shunday qilib, k va ℓ nuqtalarni bog'lovchi ekvivalent ko'pburchaklikning ixtiyoriy shoxobchasi o'tkazuvchanligi uchun quyidagi umumiy bog'lanishni yozish mumkin.

$$G_{k\ell} = G_k G_\ell / S. \quad (3.107)$$

Ko'rib chiqilgan o'zgartirish - berilgan tenglamalar tizimidagi noma'lum φ_0 ning bartaraf etilishi, ya'ni sxemadagi bir tugunni qisqartirilishi bilan teng kuchga ega.

Umumiy holda, ko'pburchakni ekvivalent yulduzga qayta o'zgartirish mumkin emas, chunki (3.107) ifodadagi ko'pburchak shoxobchalari o'tkazuvchanliklari ma'lum bog'lanishlarda bo'lishi talab etiladi.

$$G_{21} / G_{31} = G_2 / G_3 = G_{2n} / G_{3n}. \quad (3.108)$$

Ixtiyoriy ko'pburchakliklarda ushbu talablar bajarilmasligi ham mumkin.

Uch qirrali yulduzlar va uchburchaklar uchun ham to'g'ri, ham teskari o'zgartirishlar so'zsiz bajariladi.

4. O'ZGARUVCHAN TOK ZANJIRLARI

4.1. Umumiy tushunchalar

O'garuvchan tok, ya'ni vaqtga bog'liq ravishda o'zgaradigan tok $i(t)$ haqida gapirganda, u bilan bog'liq bo'lgan va elektr zanjirini tasvirlovchi kuchlanish $u(t)$, zaryad $q(t)$, magnit oqimi $\psi(t)$ va boshqa qiymatlarning ham vaqt bo'yicha shunday o'zgarishi nazarda tutiladi. Ular o'zgaruvchan bo'lganligi ($du/dt \neq 0, di/dt \neq 0$, ya'ni kuchlanish va tok hosilalari nolga teng bo'lmaganligi) sababli induktivliklarda kuchlanishlar hosil bo'ladi, kondensatorli shoxobchalarda toklar oqadi (o'zgarmas toklardagi bilan solishtiring).

Davriy va nodavriy o'zgaruvchan kuchlanish va toklar. Agar 4.1,a-rasmdagi sxemada r - L zanjir, kuchlanishi E bo'lgan o'zgarmas EYK manbaiga «K» kalit bilan ulansa, undagi tok qiymati $i=0$ dan $i=\text{const}$ bo'lgunga qadar $i(t)$ ifoda bo'yicha o'zgarib (4.1,b-rasm) aperiodik o'suvchi nodavriy bo'ladi. Agar zanjir (4.1,v-rasm) kalitini T davr bilan t_1 vaqt oralig'ida ulab, t_2 vaqt oralig'ida uzib turilsa, davriy nosinusoidal $u(t)$ kuchlanish yoki $i(t)$ tok (4.1,g-rasm) hosil bo'ladi. Bunday misollarni ko'plab keltirish mumkin. Bunday o'tkinchi jarayonlar darslikning keyingi boblarida o'rganiladi. Oldingi misoldagi kabi

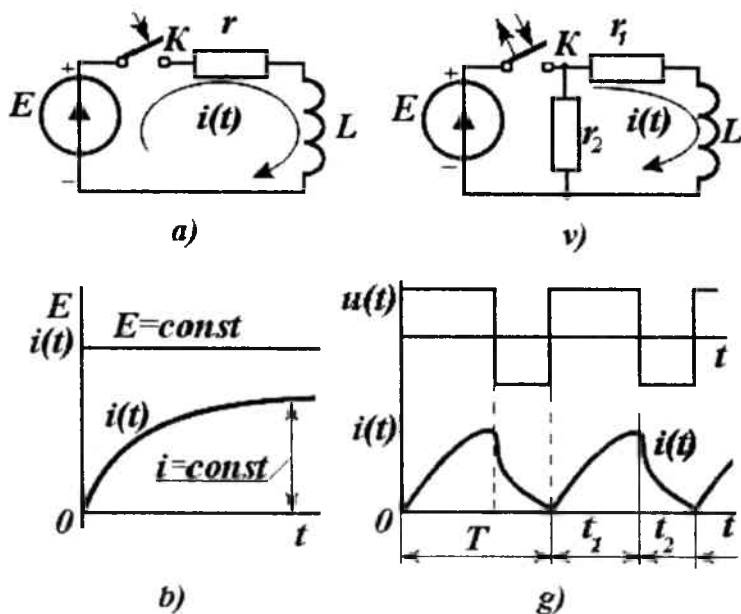
$$f(t) = f(t+T), \quad (4.1)$$

$T=\text{const}$ shartni bajaruvchi davriy o'zgaruvchan qiymatlarni ko'rish bilan cheklanamiz.

Bu (4.1) tenglik shuni anglatadiki, ko'rilayotgan qiymat o'zgarishi har T vaqt oralig'ida (4.1,g va 4.2-rasmlar) takrorlanib turadi; bunda T -davrlar deb ataladi.

Davrga teskari bo'lgan qiymat, ya'ni 1 sekund (s) vaqt birligidagi davrlar soni

$$f = 1/T \quad (4.2)$$



4.1-rasm. Davriy va nodavriy o'zgaruvchan kuchlanish va toklar.

chastota deb ataladi. Uning o'lchov birligi Gers (Hz). Axborot tizimlari elektr tarmog'i kuchlanishi standart chastotasi $f=50$ Hz ga teng bo'lib, kuchlanishning har $T=0,02$ s da bir davr o'zgarishiga mos keladi. Davri $T=10^{-6}$ s = 1 mks (mikrosekund) bo'lgan signal chastotasi $f=1$ MHz (megogers) bo'ladi.

Oddiy garmonik tebranishlar - sinusoidal (yoki kosinusoidal) o'zgaruvchi qiymatlar (4.2-rasm) quyidagicha ifodalanadi:

$$f(t) = F_m \sin(\omega t + \alpha) \equiv F_m \cos(\omega t + \alpha - \pi/2), \quad (4.3)$$

bunda, $f(t)$ - oniy qiymat; F_m - amplituda; ω - burchak (yoki aylanaviy) chastota; $\omega t + \alpha - \pi/2$ - radianda yoki gradusda ifodalangan faza; $\alpha - \pi/2$ - boshlang'ich faza.

Chastotalari teng bo'lgan garmonik funksiyalar yig'indisi, zarur bo'lganda, shu chastotali garmonik funksiya shaklida ifodalanishi mumkin; uning amplituda va fazalari, hech bo'lmaganda, oddiy trigonometrik o'zgarishlar yordamida ifodalanishi mumkin.

$$F_{m1} \sin(\omega_1 + \alpha_1) + F_{m2} \sin(\omega t + \alpha_2) = F_m \sin(\omega t + t).$$

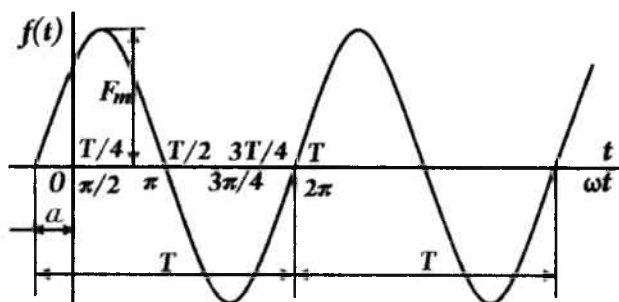
Bunda,

$$F_m = \sqrt{(F_{m1} \sin \alpha_1 + F_{m2} \sin \alpha_2)^2 + (F_{m1} \cos \alpha_1 + F_{m2} \cos \alpha_2)^2};$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_{m1} \sin \alpha_1 + F_{m2} \sin \alpha_2}{F_{m1} \cos \alpha_1 + F_{m2} \cos \alpha_2}. \quad (4.4)$$

Garmonik o'zgaruvchan tok keng qo'llanilishi sabablari.

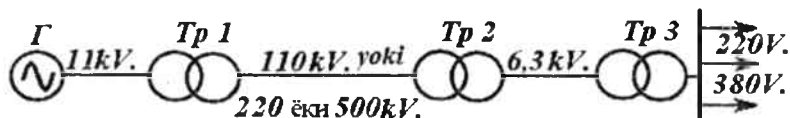
Garmonik o'zgaruvchan tokning qo'llanilishi, bir tomondan, o'tayotgan jarayonlarning murakkablashuviga olib kelgan bo'lsa, ikkinchi tomondan, elektr zanjirlarining samarali ishlashiga yangi imkoniyatlar yaratdi. 1831-yilda Faradeyning o'zgarma tok generatori va motorini ixtiro qilishi shundan keyingi 50-60 yillar davomida sanoatning keskin rivojlanishiga deyarli ta'sir ko'rsata olmadi.



4.2-rasm. Davriy sinusoidal o'zgaruvchan kattalik.

Ammo, elektr zanjirlar nazariyasi fanining asosini tashkil etgan elektromagnit induksiya qonunining kashf etilishi, o'zgaruvchan toklardan hosil bo'ladigan o'zgaruvchan magnit maydonining elektr yurituvchi kuchlarini induktivlashi hodisalarini kashf qilinishi, 1889-yilda o'zgaruvchan elektr generatorlari, motorlari va transformatorni ixtiro qilishga olib keldi. Shu sababli, aynan o'zgaruvchan tok va kuchlanishni osonlik bilan transformatsiyalash, elektr energiyasini uzoq masofalarga uzatish imkoniyatini yaratdi. Bu esa uning sanoatda keng qo'llanilishiga sabab bo'ldi. Bunda transformatorlar tuzilishining soddaligi, ular ishlashining ishonchiligi, foydali ish koeffitsiyentining yuqori darajada ekanligi

hal qiluvchi ahamiyatga ega bo'ldi. Shu tufayli aloqa korxonalarini elektr energiyasi bilan ta'minlash tizimlarida kuchlanishning qiymatini bir necha marta o'zgartirilishini ko'rishimiz mumkin.



4.3-rasm. Axborot tizimlarining elektr ta'minoti.

Masalan, axborot tizimlarining elektr ta'minoti 4.3-rasmda keltirilgan sxema bo'yicha amalga oshiriladi. Bunda G -generator elektr energiyasini bir kuchlanishda ishlab chiqaradi (masalan, $U_1 = 11 \text{ kV}$); bu kuchlanish birinchi transformotorda ($Tr1$) $U_2 = 110 \text{ kV}$ (yoki 220 kV yoki 500 kV) gacha kuchaytiriladi, tok esa $n = U_2 / U_1$ marta pasaytiriladi; shu tokning pasaytirilgan miqdori yuqori kuchlanish bilan uzoq masofalarga liniyalar yordamida uzatiladi. $Tr2$ ga kelib kuchlanish $10,3 \text{ kV}$ yoki $6,3 \text{ kV}$ gacha pasaytiriladi, tok shuncha marta ortadi va kabel liniyalari orqali taqsimlanadi; so'ngra uchinchi transformator $Tr3$ dan energiya iste'molchilarga kichik kuchlanish ($0,4 \text{ kV}$ yoki $380/220 \text{ V}$)da kam quvvat isrofi bilan yetkaziladi. Keltirilgan sxemadagi yuqori kuchlanishli uzatish liniyalarida tokning qiymati energiyani qabul qiluvchi iste'molchilardagiga nisbatan 500-1000 marta kichikroq bo'ladi, Joul-Lens qonuni asosida liniyalardagi quvvat isrofi tokning kvadratiga proporsional ravishda pasaytirilib, istemolchiga yetkaziladi. Bu misoldan transformatorning iqtisodiy samaradorligi qanchalar baland ekani ko'rinib turibdi.

Bu sxemada elektr ta'minoti tizimi juda ham sodda holatda keltirilgan: mavjud bo'lgan elektr liniyalarining ko'plab tarmoqlari, o'nlab, yuzlab generatorlarning o'zaro aloqalari keltirilmagan, va h.k. Aslida transformatorlar soni aksariyat, uchtdan ko'proq bo'ladi, eng yuqori kuchlanish esa magistral elektr tarmoqlarida 220 yoki 500 kV bo'ladi. Markaziy Osiyo davlatlarida bunday liniyalar umumiy uzunligi minglab kilometrni tashkil etadi.

O'zgaruvchan tok chastotasi. Evropa va Osiyo davlatlari elektr ta'minoti tizimida standart chastota $f=50\text{ Hz}$, $\omega=2\pi\cdot f=314\text{s}^{-1}$. Shimoliy Amerikada esa $f=60\text{ Hz}$, $\omega=2\pi\cdot f=367\text{s}^{-1}$ qabul qilingan. Bulardan kichikroq chastotalar maxsus chastotali boshqariluvchi elektromexanik uskunalarda, undan katta chastotalar esa minglab Gers (kilogers - kHz), millionlab Gers (Megogers - MHz) axborot texnologiyalari tizimlarida qo'llaniladi.

Tovush chastotalarining diapazoni 20 Hz dan 20 kHz gacha bo'ladi. Radiotexnikada oddiy qabul qiluvchi radiolarning chastotalari 150 kHz dan 12 MHz gacha oraliqda bo'ladi. O'ta yuqori chastota (o'.yu.ch.) texnikasida bir necha minglab megagers (ya'ni GHz -gigagers)li chastotalar ishlatiladi. O'.yu.ch. texnikasining rivojlanishi radiolokatsiya ixtiro qilinishiga olib keldi. Keyinchalik bu chastotalar aloqaning har xil turlarida, fizik kuzatuvlar texnikasida va eksperimentlarda qo'llanila boshlandi. Bular qatoriga radioastronomiya, elektron texnikasi, ayniqsa, molekulyar elektronika kiradi.

4.2. Rezistor va kondensatorli zanjirda o'zgaruvchan tok

Kondensatorda zaryadlanish va razryadlanish jarayoni. O'zgaruvchan kuchlanishi u ga teng bo'lgan manba kondensator C ga ulanib (4.4,a-rasm) berk kontur hosil qilsa, zanjirdan o'zgaruvchan tok i oqib o'tadi. Misol uchun, o'zgaruvchan kuchlanish generatoriga kabel tarmog'i ulanganini ko'raylik (4.4,b-rasm). Tarmoqning izolyatsiyalangan o'tkazgichlari orasida elektr maydoni hosil bo'ladi, o'tkazgichlarda esa ortiqcha zaryadlar to'plami paydo bo'ladi: potentsiali yuqoriroq bo'lgan o'tkazgichda musbat zaryadlar ($+q$) va quyi potentsialli o'tkazgichda - manfiy zaryadlar ($-q$). Bunda zaryadning qiymati sig'im va kuchlanishning qo'paytmalariga teng.

$$q = Cu_c = Cu.$$

Zaryadning o'zgarishi tokning quyidagi o'zgarishi bilan mos bo'ladi.

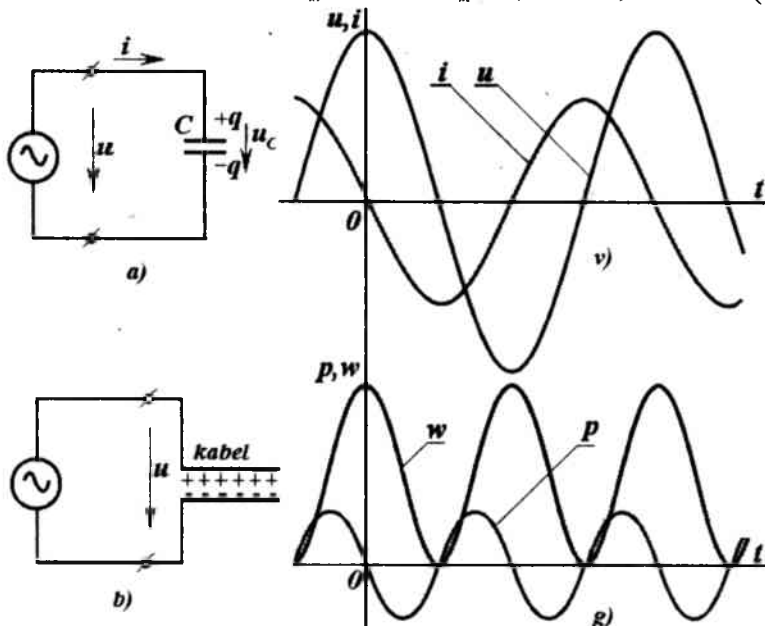
$$i = dq/dt = Cdu_c/dt = Cdu/dt.$$

Manbaning kuchlanishi berilgan, deb faraz qilib

$$u = U_m \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + \pi/2) \quad (4.5)$$

so'ngra differensiallab, tok qiymatni aniqlaymiz

$$i = -C \omega U_m \sin \omega t = I_m \sin(\omega t + \pi) \quad (4.6)$$



4.4-rasm. Kondensatorda zaryadlanish va razryadlanish jarayoni.

Kuchlanish chastotasiga proporsional bo'lgan garmonik tokning amplitudasi

$$I_m = C \omega U_m \quad (4.7)$$

ga teng bo'lib, fazasi bo'yicha kuchlanishdan $\pi/2$ burchakka ilgarilab ketadi.

Shunga e'tibor qaratish zarurki, ushbu ifodani kondensator kuchlanishining har qanday boshlang'ich fazasi uchun ham qo'llash mumkin.

Kabel tormog'ining uzunligi katta bo'lganda, sig'imin tokining qiymati sezilarli darajada bo'ladi. Misol uchun, umumiy uzunligi 25 km bo'lgan kabel tarmog'i sig'imi $C=10 \cdot 10^{-6} \text{ F}$ (Farada) bo'lsa,

kuchlanishl $U_m = 9,5 \text{ kV}$ va chastotasi $f = 50 \text{ Hz}$ bo'lganda, tokning amplitudasi $I_m = 29,8 \text{ A}$ (Amper) bo'ladi.

Agar (4.7)da sig'im toki amplitudasining qiymati chastotaga proporsional ekanligini e'tiborga olsak, yuqori chastotali va o'ta yuqori chastotali kuchlanishlarni uzatishning qanchalar katta muammolari bor ekanligini bilamiz.

4.4,v-rasmda kuchlanish va toklar oniy qiymatlarining grafigi keltirilgan. Bunda, kuchlanishning musbat (yarim davr) qiymati, 4.4,a-rasmdagi belgilanganiga muvofiq, kondensatorning yuqoridagi elektrodi potentsiali pastdagi elektrodi potentsialidan balandroq bo'lgan vaqt oralig'iga mos keladi. Tokning 4.4,a-rasmdagi musbat ishorasi kondensatorning yuqoridagi elektrodiga musbat zaryadning oqib kelishiga mos keladi.

Biror funksiya va uning hosilasi orasidagi bog'lanish haqidagi mulohazalarni kondensatorga tatbiqi shuni ko'rsatadiki, sig'imdagi kuchlanish ekstremal bo'lgan onda tokning oniy qiymati nolga teng (ya'ni zaryadlanish tokining oqishi to'xtagan) bo'ladi; kuchlanishlar qiymatlari nolga teng bo'lsada, zaryadlar oqishi tezligi katta bo'lganligidan, shu ondagi tokning qiymatlari ekstremal ($\pm I_m$) darajaga erishadi.

Kondensator elektr maydoni energiyasining o'zgarishi

$$w = w_f = \frac{Cu^2}{2} = \frac{qu}{2} = \frac{q^2}{2C} \quad (4.8)$$

generator va zaryadlanayotgan kondensator orasidagi *energiya almashinuvi* bilan bog'liq. Generatordan har onda uzatilayotgan quvvat, ya'ni uning oniy qiymati tok va kuchlanishlar oniy qiymatlarining ko'paytmasiga teng.

$$p = ui = dw / dt. \quad (4.9)$$

Quvvatning yuqorida keltirilgan ixtiyoriy bog'lanishlaridan shuni ko'rish mumkinki, u kuchlanish chastotasidan ikki marta katta bo'lgan chastota bilan o'zgarar ekan.

$$p = u \cdot i = -C\omega U_m^2 \cos \omega t \cdot \sin \omega t = -\frac{CU_m^2}{2} \omega \cdot \sin 2\omega t. \quad (4.10)$$

Quvvat (p_s) va energiyaning (w_f) grafigi 4.4,g-rasmda keltirilgan. Shunga e'tibor berish zarurki, kuchlanish va tokning ishoralari bir xil bo'lganda, quvvat musbat, tok va kuchlanish

ishoralari har xil bo'lganda-manfiy va tok yoki kuchlanishning qiymatlari nolga teng bo'lganda, quvvat ham nolga tengdir. Bir T davr o'tishi bilan kondensator energiyasi ilgarigi qiymatiga teng bo'ladi. Shu sababdan, generatordan kondensatorga bir davr ichida uzatilayotgan o'rtacha quvvat nolga teng

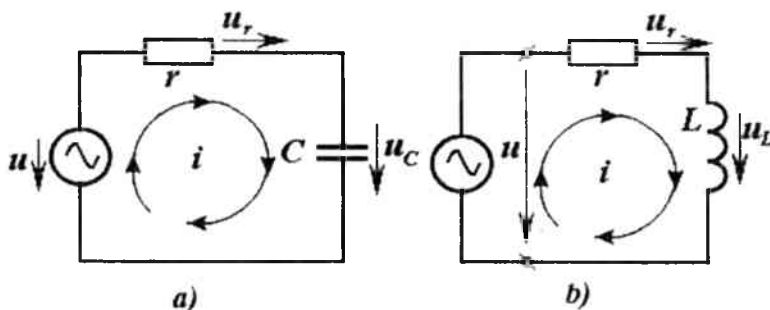
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = 0 \quad (4.11)$$

Bunda, o'zgaruvchan toklar nazariyasida qabul qilingan belgilashlarga muvofiq, o'rtacha (bir davr ichidagi) quvvat bosh harf « R » bilan belgilandi. O'rtacha quvvatning nolga tengligi, uning aynan sinusoidal funksiya ekanligidan kelib chiqadi.

C, r - zanjir. C kondensatorga rezistor r ketma-ket ulangan bo'lsin. Bunday zanjirlar (4.5, a-rasm) aksariyat, elektron sxemalarda ko'p uchraydi.

Kondensator kuchlanishi quyidagicha o'zgaradi, deb faraz qilaylik.

$$u_C = U_{Cm} \sin \omega t. \quad (4.12)$$



4.5-rasm. C va L elementli zanjirda o'zgaruvchan tok.

Bunday vaziyatda ushbu zanjirdan

$$i = \frac{C du_C}{dt} = C \omega U_{Cm} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \cos \omega t = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.13)$$

tok oqib o'tadi. Tokning qiymati ma'lum bo'lgani uchun rezistor r dagi kuchlanishni Ohm qonuni asosida aniqlash mumkin.

$$u_r = r i = r I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.14)$$

KKQ asosida C - r li zanjirning kirishidagi kuchlanish

$$u = U_m \sin(\omega t + \beta) = u_r + u_c = I_m \cdot r \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{I_m}{\omega C} \sin \omega t. \quad (4.15)$$

Bu erda kondesatordagi kuchlanish amplitudasi (4.7) tenglikdagi tokning amplitudasi orqali ifodalangan.

Trigonometrik (4.4.) o'zgartirishlar yordamida quyidagicha yozish mumkin.

$$U_m = I_m \sqrt{r^2 + 1/(\omega C)^2} = \sqrt{U_{rm}^2 + U_{Cm}^2}; \quad (4.16)$$

$$\operatorname{tg} \beta = r \cdot \omega \cdot C \quad (4.17)$$

Qarshilik r dagi quvvat isrofi. O'zgaruvchan tok $i = I_m \sin \omega t$ qarshilik r orqali oqib o'tganda, unda Joule-Lens qonuniga binoan quvvat ajralib chiqadi.

$$p = u_R \cdot i = i^2 \cdot r. \quad (4.18)$$

Bir davrdagi o'rtacha quvvat tokning o'rtacha kvadratik qiymati orqali ifodalanadi.

$$P = I^2 \cdot r, \quad (4.19)$$

bunda, R , I^2 - quvvat va tokning o'rtacha kvadratik qiymati.

Garmonik tokli r rezistor uchun

$$P = I_m^2 \cdot (\sin^2 \omega t) \cdot r = \frac{I_m^2}{2} (1 - \cos 2\omega t) \cdot r \quad (4.20)$$

Biroq, garmonik funksiya $\cos 2\omega t$ ning bir davr mobaynida o'rtacha qiymati nolga teng.

Shuning uchun r dagi o'rtacha quvvat

$$P = \frac{1}{2} I_m^2 \cdot r. \quad (4.21)$$

4.3. Davriy miqdor ta'sir etuvchi (effektiv) qiymati

Garmonik funksiyalarda o'rtacha kvadratik qiymatni ta'sir etuvchi yoki effektiv qiymat deyiladi. Bunday nomlashni quyidagicha tushuntirish mumkin. Joule-Lens qonunidagi kabi, har qanday kattalik oniy qiymatlarining kvadratiga proporsional bo'lganda u o'rtacha hisobda har doim ta'sir etuvchi (effektiv) qiymatning kvadratiga proporsionaldir. O'rtacha kvadratik qiymat bosh harf bilan hech qanday qo'shimcha indeksiz belgilanadi.

Tokning o'rtacha kvadratik qiymati

$$I = \sqrt{i^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}; \quad (4.22)$$

kuchlanishning o'rtacha kvadratik qiymati

$$U = \sqrt{u^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad (4.23)$$

va h.k.

(4.19) va (4.21) dan ko'rinadiki, garmonik funksiyalar uchun o'rtacha kvadratik qiymatlar amplitudani $\sqrt{2}$ ga bo'linganiga teng, ya'ni

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (4.24)$$

Shunday qilib, (4.21) o'rmiga quyidagi yozish mumkin.

$$P = I^2 \cdot r. \quad (4.25)$$

Qarshilik r orqali o'zgarmas tok oqib o'tganda, amplitudasi $I_m = I\sqrt{2}$ bo'lgan garmonik tok oqib o'tgandagi kabi ta'sir bir xil bo'ladi.

4.4. Induktivlik va rezistori bo'lgan zanjirda o'zgaruvchan tok

Ikki o'tkazgichli l uzunlikdagi, uzunlik birligining qarshiligi r_0 va induktivligi L_0 bo'lgan havo liniyasini ko'raylik. Liniya boshida generator ulangan, ketida esa qisqa tutashgan bo'lsin. Bunday liniya qarshiligi $r = r_0 \cdot l$, induktivligi $L = L_0 \cdot l$ ga teng bo'lgan ketma-ket r va L zanjirning o'zgaruvchan tok generatoriga ulangan sxemasini (4.5, b-rasm) anglatadi.

Agar liniyadan $i = I_m \sin \omega t$ tok oqib o'tayotgan bo'lsa, unda generatorning kuchlanishi quyidagicha:

$$u = u_r + u_L = ir + L di/dt \quad (4.26)$$

yoki

$$u = r I_m \sin \omega t + I_m \omega L \sin(\omega t + \pi/2) \quad (4.27)$$

bo'ladi.

Ikki garmonik funksiyaning yig'indisi uchun (4.4)da keltirilgan trigonometrik o'zgartirishlarni qo'llab, generator kuchlanishini

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

va uning amplitudasini

$$U_m = I_m \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} \quad (4.28)$$

aniqlaymiz. Tok fazasi kuchlanishdan φ burchakka kechikadi, bunda,

$$\varphi = \omega L / r \quad (4.29)$$

Quvvat. Generatordan zanjirga uzatilayotgan quvvatning oniy qiymati tok va kuchlanishlar oniy qiymatlarining ko'paytmasiga teng

$$p = u \cdot r = U_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot I_m \sin \omega t = \frac{1}{2} U_m I_m [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] \quad (4.30)$$

Tenglikning o'ng tomoni shuni anglatadiki, quvvatning tarkibida o'zgarmas tashkil etuvchisi mavjud ekan. Uning qiymati esa o'rtacha quvvatga teng:

$$P = \frac{1}{2} U_m I_m \cos \varphi = UI \cos \varphi \quad (4.31)$$

Bu ifodani kuchlanish va tok orasidagi fazalar farqi φ ga teng bo'lgan barcha zanjir quvvatlari uchun qo'llash mumkin.

Ikki marta katta chastota bilan pulslanuvchi quvvatning qiymati $\cos(2\omega t + \varphi)$ ga proposional bo'lib, uning o'rtacha qiymati nolga teng. Uning mavjudligini qarshilikda isrof bo'luvchi quvvat ($i^2 r$) o'zgarmas bo'lmasligi va, shu bilan birga, magnit maydon energiyasi ($Li^2/2$) uzluksiz o'zgarib turishi bilan tushuntirish mumkin.

(4.30) ifodani energetik jarayon orqali ham isbotlash mumkin. Darhaqiqat,

$$p = i^2 r + \frac{d}{dt} \left(\frac{Li^2}{2} \right) \quad (4.32)$$

uchun tokning qiymati $i = I_m \sin \omega t$ bo'lganda (4.32) tenglikning o'ng tomoni oddiy o'zgartirilishi natijasida (4.30)ga yoki shunga o'xshash bog'lanishga olib kelishi mumkin.

$$p = \frac{1}{2} r I_m^2 (1 - \cos 2\omega t) + \frac{1}{2} I_m^2 \omega L \sin 2\omega t = p_r + p_i, \quad (4.33)$$

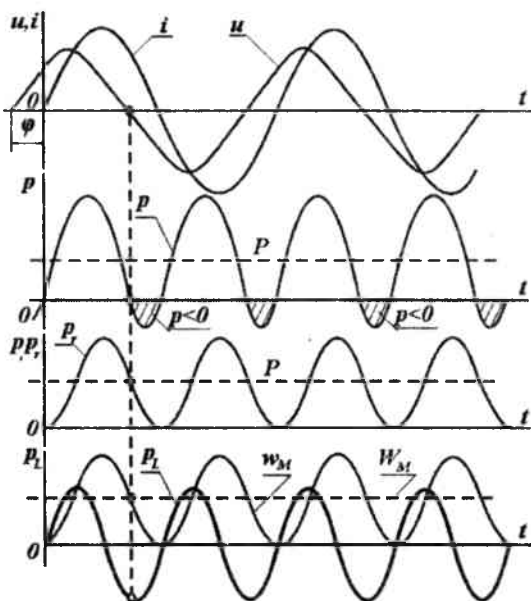
bunda, $p_r = i^2 r$, $p_i = \frac{d}{dt} (Li^2/2)$

4.6-rasmda tok, kuchlanish, quvvatning oniy qiymatlari, quvvatning ikki tashkil etuvchilari va magnit maydon energiyasining grafigi keltirilgan. Punktir chiziqlar bilan quvvatning oʻrtacha qiymatlari (R) va magnit maydon energiyasining oʻrtacha qiymatlari koʻrsatilgan

$$w_m = (Li^2/2) = LI^2/2 \quad (4.34)$$

Grafiklar tahlilida quyidagi xususiyatlarga eʼtiborni qaratish mumkin:

1) kuchlanishning oniy qiymati nolga teng boʻlganda ham, tokning oniy qiymati nolga teng boʻlganda ham, quvvatning shu onlardagi qiymati nolga aylanadi. Generator uzatayotgan quvvati ushbu onlarda ($u=0, i \neq 0$ yoki $i=0, u \neq 0$) nolga teng boʻlganda ham, aktiv qarshilikdagi ajralayotgan quvvat ($p_r=i^2r$) nolga teng emas. Bu, yuzaki qaragandagi nomuvofiqlik faqat elektromagnit maydon energiyasining almashinuvi hisobiga shunday boʻladi: shu onlarda p_L manfiy va u absolyut qiymati boʻyicha quvvat p_r ning musbat qiymatiga teng;



4.6-rasm. Oʻzgaruvchan tok zanjirida energiya tebranishi.

2) p_L ning o'rtacha qiymati nolga teng bo'lgani uchun, hamma quvvatning o'rtacha qiymati aktiv qarshilikda sarflanayotgan quvvatning o'rtaga qiymatiga teng;

3) o'zgaruvchan magnit maydoni uzatayotgan quvvat (ya'ni p_L) rezistor qarshiligida sarflanayotgan quvvatdan (p_r) katta bo'lgan vaqt oralig'ida (4.6-rasm), o'zgaruvchan tok generatori berayotgan quvvat manfiy ($p < 0$) bo'ladi.

Shunga o'xshash tahlilni r - C zanjiri uchun mustaqil bajarilsa, o'quvchi uchun katta foydali bo'ladi.

4.5. Induktivlik, sig'im va rezistorli zanjirda o'zgaruvchan tok

Tarkibida induktivlik (L) bilan birga sig'im (C) bo'lgan o'zgaruvchan tok zanjirlarini o'rganish alohida qiziqish uyg'otadi, chunki L va C elementlari tebranma kontur hosil qiladi: sig'imdagi energiya $w_C = Cu_C^2 / 2$ kamayish onida, induktivlikdagi $w_m = Li^2 / 2$ energiya ortadi, davrning keyingi yarmida bu jarayon teskarisiga qaytariladi. Oldindan zaryadlangan kondensatorli L - C kontur (4.7, a-rasm) ideallashtirilgan, ya'ni isrofsiz ($r=0$) bo'lsa, kalit ulangandan so'ng L - C konturda «so'nmas» energiya tebranishlari hosil bo'ladi. Rasmda tanlangan musbat tok yo'nalishi kondensatorning razryadlanishiga mos keladi, shuning uchun

$$i = -C du_C / dt \quad (4.35)$$

Lekin KKQ asosida, ixtiyoriy tanlab olingan on uchun kondensator kuchlanishi u_C miqdori induktivlikdagi u_L kuchlanishga teng bo'lishi shart $u_C = u_L = L di / dt$; shu sababli keyingi tenglama o'ng tomonidagi tokni (4.35) dagi u_C orqali ifodalasak, quyidagi hosil bo'ladi.

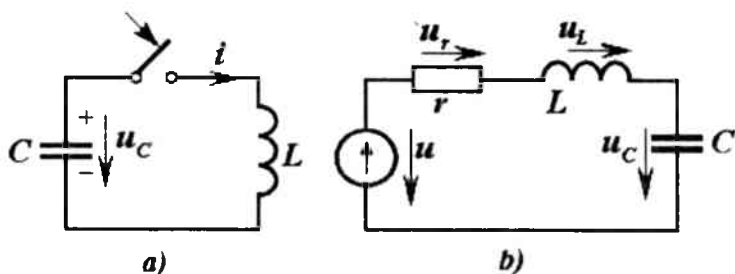
$$u_C = -LC \frac{d^2 u_C}{dt^2}. \quad (4.36)$$

Bu tenglamaga quyidagi garmonik funksiya mos keladi.

$$u_C = U_0 \cos \omega_0 t, \quad (4.37)$$

bunda, U_0 - kondensator kuchlanishining boshlang'ich vaqt uchun qiymati $U_C(0)=U_0$. (4.37)dagi u_C ni (3.36)ga qo'ysak, quyidagini aniqlaymiz.

$$U_0 \cos \omega_0 t = LC \omega_0^2 U_0 \cos \omega_0 t,$$



4.7-rasm. Erkin tebranishlarni hosil bo'lishi.

ya'ni quvvat isrofi bo'lmagan zanjirdagi erkin so'nmas garmonik tebranish xususiy burchak chastotasi quyidagicha aniqlanadi.

$$\omega_0^2 LC = 1 \text{ yoki } \omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (4.38)$$

Real zanjirlarda aktiv qarshilik mavjud ($r \neq 0$) va unda sarf bo'layotgan energiya mavjudligi sababli, tebranishlar so'nuvchan bo'ladi.

Endi tarkibida L - r - C bo'lgan ketma-ket ulangan kontur, ω chastotali garmonik kuchlanish manbaiga ulangandagi holatni ko'raylik. Tok chastotasi ω konturning xususiy chastotasi ω_0 ga teng bo'lgan ($\omega = \omega_0$) rezonans holatda (4.7,b-rasm) L va C elementlarda, yuqorida ko'rsatilganidek, energiya tebranishlari hosil bo'ladi; manbadan kelayotgan energiya esa r qarshilikdagi ajralayotgan energiya isrofiga sarflanadi.

Konturda $\omega = \omega_0$ (ya'ni, $\omega_0^2 LC = 1$ yoki $\omega L = 1/\omega C$) bo'lganda, induktivlik va sig'imdagi kuchlanishlar hamma vaqt bir birini kompensatsiyalaydi, $\varphi = 0$ va $\cos \varphi = 1$ bo'lganligi sababli manbaning hamma kuchlanishl qarshilik r ga qo'yilgan bo'ladi, ya'ni $u = u_r$. Bu holatni zanjirning umumiy tenglamasidan ko'rish mumkin

$$u = u_L + u_r + u_C = L \frac{di}{dt} + ri + u_C \quad (4.39)$$

4.7, b-rasm zanjirida tok $i = C du_C / dt$, chunki yuqorida tanlangan tokning musbat yo'nalishida tok kondensatorni zaryadlaydi va uning kuchlanishini ko'paytiradi.

(4.39) tenglamaning o'ng tomonidagi qiymatlarni kondensator kuchlanishi orqali ifodalasak, quyidagi tenglama hosil bo'ladi

$$u = LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C \quad (4.40)$$

Kondensatordagi kuchlanish ifodasi $u_C = U_{cm} \cos \omega t$ deb faraz qilib tenglamani differensiallasak, quyidagi yechimlarni olamiz.

$$\left. \begin{aligned} u_L &= -LC \omega^2 U_{cm} \cos \omega t; \\ u_r &= -r \omega C U_{cm} \sin \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (4.41)$$

KKQ binoan, manba kuchlanishi uchchala elementlar kuchlanishlari yig'indisiga teng.

$$u = U_m \cos(\omega t + \beta) = U_{cm} (1 - LC \omega^2) \cos \omega t - U_{rm} r \omega C \sin \omega t \quad (4.42)$$

Rezonans bo'lganda $U_L + U_C = 0$, ya'ni $1 - LC \omega^2 = 0$ bo'lgani uchun manbaning kuchlanishi r qarshilikdagi kuchlanishga teng.

$$u = u_r = -U_{cm} r \omega C \sin \omega t. \quad (4.43)$$

Shu sababli, kondensatordagi kuchlanishning amplitudasi bilan manba kuchlanishining amplitudasi quyidagi bog'lanishda bo'ladi.

$$U_m = U_{cm} \cdot r \cdot \omega \cdot C. \quad (4.44)$$

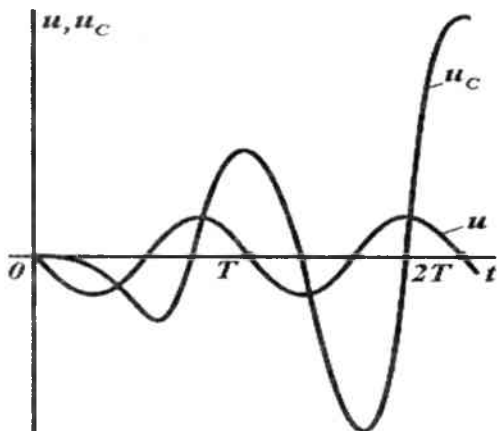
Bu ifodadan radiotexnika asosini tashkil etgan ajoyib xulosa kelib chiqadi, ya'ni $r \omega C$ ning qiymati birdan kichik ($r \omega C < 1$) bo'lganda kondensatordagi kuchlanish amplitudasi manba kuchlanishining amplitudasidan bir necha marta, ba'zida o'nlab, yuzlab marta katta bo'lishi mumkin.

Tebranish tizimida tebratuvchi kuch chastotasi xususiy chastotaga teng bo'lgandagi ($\omega = \omega_0$) tebranishning bir maromda juda katta amplitudalargacha (rezonans) oshib borishini oddiy arg'imchoq misolida har birimiz ko'rganmiz. Avval, kichik bo'lgan kuch ta'sirida tebranma tizim muvozanat holidan ozgina og'ishi ko'riladi. Davriy bo'lgan kuch (xususiy chastota bilan) ta'sirida tebranishlar amplitudasi ortib boradi. Rezonans tizimlari

amplitudalarining oshib borishi mana shunday kichik kuchlar ta'siri yig'ililgan jarayoniga o'xshash bo'ladi.

4.8-rasmda L, r, C konturini $t=0$ vaqtdagi $u = -U_m \sin \omega t$ kuchlanishli manbaga ulangandagi ($LrC=0,002$) tebranishlarning bir maromda ortib borishining grafigi keltirilgan.

Ikkinchi davrning tugashidayoq kondensatordagi kuchlanishning maksimal qiymati manba kuchlanishi amplitudasining qiymatidan taxminan 6 marta ortganligini ko'rish mumkin. Barqarorlik jarayonida esa - kuchlanish ekstremumining ortishi tugagandan so'ng, kondensator kuchlanishi amplitudasining qiymati manbanikiga nisbatan $1/\omega rC = 500$ marta ortiq ekanligini ko'ramiz.



4.8-rasm. L, r, C konturda tebranishlar.

Sig'im kuchlanishi amplitudasining ortib borish jarayonida, tokning har bir davrida manbadan konturga kelayotgan energiya qisman aktiv qarshilikda isrof bo'lsa, qisman tebranish konturida (L va C da yig'ilayotgan) energiyaning oshirib borishlga sarflanadi.

Barqarorlashgan rejimda esa tebranishlar amplitudasining ortishi tugaydi va manbadan kelayotgan quvvat $p = u \cdot i$ ixtiyoriy olingan vaqt uchun qarshilikdagi quvvat isrofi $u_R i = i^2 r$ ga teng.

4.6. O'zgaruvchan tok zanjiri uchun Kirxgof qonunlari

Yuqorida ko'rsatilganidek L, r, C zanjir ixtiyoriy elementidagi kuchlanish potentsiallar farqi sifatida keltirilishi mumkin. Shuning uchun bu elementlarning ikki nuqtalari orasidagi kuchlanishni ham potentsiallar farqi deb ko'rsatish mumkin. Mana shu Kirxgofning ikkinchi qonunini tatbiq etish shartidir.

Masolan, 4.9-rasmda keltirilgan zanjir sxemasi uchun manba (generator) kuchlanishi quyidagicha yoziladi

$$u_r = u_{ad} = u_{ab} + u_{bd} \quad \text{va} \quad u_{bd} = u_{bc} + u_{cd}, \quad (4.45)$$

bunda, $u_{mn} = \varphi_m - \varphi_n$.

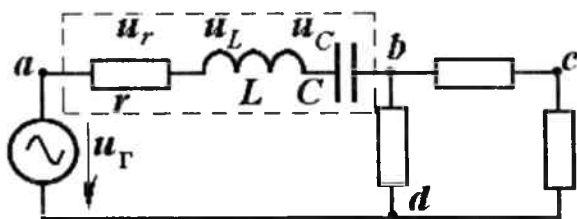
Bu tengliklarning tashkil etuvchilari o'rnida potentsiallar va kuchlanishlarning oniy qiymatlari nazarda tutilmoqda. Har bir shoxobcha uchun alohida, masalan, ab shoxobcha uchun (4.9-rasm) kuchlanish quyidagi yig'indi sifatida keltirilishi mumkin.

$$u_{ab} = u_r + u_L + u_C,$$

bunda, $u_r = i \cdot r$; $u_L = L di/dt$; $i = C du_C/dt$

yoki $u = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i dt$

Garmonik tokli zanjirlarda faqat barqarorlik rejimini ko'rganda shunga iqror bo'lish mumkinki, bu toklarga aynan shu chastotali garmonik kuchlanishlar mos kelar ekan. Bunda (4.26), (4.27)larni differentsiallashtirish yoki (4.15)ni integrallashtirish natijalari funksiya boshlang'ich fazasini $+\pi/2$ yoki $-\pi/2$ burchakka siljishiga olib kelar ekan va amplitudaning qiymati ω marta ko'payishi yoki kamayishiga sabab bo'lar ekan.



4.9-rasm. Kuchlanishlar yig'indisi.

Ushbu mulohazalar L, r, C parametrlar faqat o'zgarmas bo'lganida haqlidir.

Tarmoqlangan zanjirni tahiil qilganda va hisoblaganda KTQ tadbiiq etilishi zarur. O'zgaruvchan tokli zanjirlarga uni qo'llash mumkinmi? Mumkin bo'lsa, zanjir qanday shartlariga javob berishi lozim?

KTQ - bu elektr miqdori saqlanish qonunidir, elektr zanjirlari nazariyasi tilida esa bu quyidagicha ta'riflanadi: tugunda birlashayotgan hamma shoxobchalar toklari algebraik yig'indisi shu tugun zaryadining o'zgarish tezligiga teng. O'zgarmas tokli zanjirda tugunlardagi zaryadlar ko'payishi yoki kamayishi mumkin emas, chunki zaryadlar miqdori o'zgarganda tugunlar potentsiali ham o'zgarishi zarur edi. O'zgaruvchan tokli zanjirda esa, agar ushbu tugun boshqa tugunga nisbatan biror sig'imga ega bo'lsa, u holda tugun zaryadi o'zgarishi mumkin.

4.10-rasmdagi «1» tugunda i_a , i_b va i_c toklar olib kelayotgan zaryad ortayapti deb faraz qilaylik. Unda zaryadlar saqlanishi qonuniga asosan

$$dq_1/dt = i_a + i_b + i_c. \quad (4.46)$$

Agar biror tugun (masalan, «1») zaryadi ortayotgan bo'lsa, u holda boshqa («2» yoki «3») tugunlarning zaryadlari shunday kamayishi lozimki, unda quyidagi tenglik bajarilishi shart.

$$dq_1/dt = -dq_2/dt - dq_3/dt.$$

Bunda faqat, zanjirda elektr miqdori saqlanish qonuni buzilmaydi, degan shart bajarilishi lozim.

$$\frac{d}{dt} \sum q_n = 0.$$

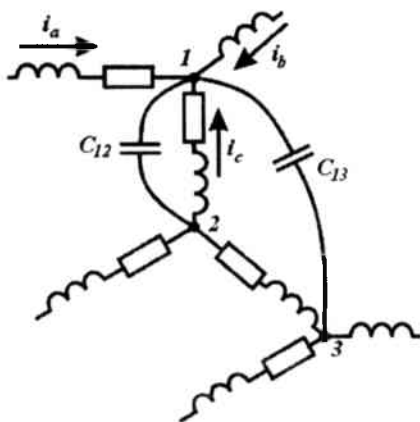
Demak, ushbu holatda 1 va 2 hamda 1 va 3 tugunlar orasida C_{12} va C_{13} sig'implar mavjud bo'lishi zarur ekan; bu sig'implarni ushbu tugunlar orasiga ulangan kondensatorlar sifatida ko'rsatish mumkin (4.10-rasm). Shuning uchun, «1» tugun uchun a , b , s shoxobchalardan tashqari, «1» tugunga ulanayotgan (aslida mavjud

bo'lmagan) yana ikki kondensatorli C_{12} va C_{13} ikki shoxobchani e'tiborga olish zarur. Ushbu shoxobchalar orqali «1» tugundan

$$i_{C12} = C_{12} du_{12}/dt \quad \text{va} \quad i_{C13} = C_{13} du_{13}/dt$$

toklari oqadi. Shu sababli, (4.46) zaryadning saqlanish qonunini «1» tugunga tatbiq etsak, qo'yidagini aniqlaymiz

$$i_a + i_b + i_c = dq_1/dt = C_{12} du_{12}/dt + C_{13} du_{13}/dt.$$



4.10-rasm. L, C larni murakkab ulanishi.

Shunday qilib, KTQga qaytdik. Uning o'zgaruvchan toklar zanjiri uchun ta'rif quyidagicha bo'ladi: tugunga kelayotgan toklarning yig'indisi, tugundan qaytayotgan toklar yig'indisiga teng. Ushbu qonun faqat sig'imlarni zaryadlovchi toklarni hisobga olgandagina o'z kuchini saqlab qoladi.

4.7. Oddiy garmonik funksiyalar ustida matematik amallar, geometrik usul

Chiziqli elektr zanjirlarini hisoblashda ko'p martalab ularni qo'shish, ayirish, u yoki bu o'zgarnas qiymatlarga ko'paytirib integrallash va differensiallashtirish amallarini bajarishga to'g'ri keladi.

Eng oddiy holatlarda, berilgan funksiyalar bir hil chastotaga ega bo'lsa, yuqorida ko'rsatilgan hamma chiziqli operatsiyalar natijasida shu chastotali garmonik funksiya hosil bo'ladi. Demak, funksiyaning faqat amplitudasi va boshlang'ich fazalari aniqlansa kifoya.

Ikki gapmonik funksiyani qo'shish (yoki ayirish) uchun (4.4)ga o'xshash trigonometrik o'zgartirishning analitik ifodalarini qo'llash mumkin. Bunday o'zgartirishlarning geometrik talqini har doim amallarning ko'rgazmali, har xil qiymatlarni keltirib chiqarish hulosalarining sodda bo'lishini ta'minlaydi hamda vujudga kelishi mumkin bo'lgan hatolarning oldini olishga imkon beradi. Geometrik usuldan keyin ko'riladigan kompleks usul esa yanada kattaroq imkoniyatlar borligini ko'rsatadi.

Tekislikdagi A vektorni uning uzunligi $|A|$ va boshlang'ich hisob uchun tanlangan ixtiyoriy o'q bilan shu vektor orasidagi σ burchagi orqali ifodalash mumkin (4.11, a-rasm). Bu burchakning musbat ishorasiga shu vektorning soat miliga teskari yo'nalishdagi burilishi mos keladi. Bunda vektorning

$$A = A \angle \sigma, \quad (4.45)$$

kabi belgilanishi qulay hisoblanadi. A va σ - *quth koordinatalari* yoki *moduli* va *argumenti* deyiladi.

Bosma nashr (kitob yoki maqolalarda) vektorlarni quyuq shriftli bosh harf bilan (A), qo'lyozma matnlarda quyuq bo'lmagan bosh harf yuqorisiga gorizantal chiziqcha chizib belgilash qabul qilingan ($\bar{A}$).

Agar argument vaqtning chiziqli funksiyasi bo'lsa

$$\sigma = \alpha + \omega t, \quad (4.46)$$

u holda boshlang'ich o'qqa vektorning proeksiyasi kosinusoida sifatida berilgan garmonik funksiyaning oniy qiymatini ko'rsatadi.

$$\alpha = A \cos(\omega t + \alpha). \quad (4.46, a)$$

Unga perpendikulyar bo'lgan o'qqa vektorning proeksiyasi esa sinusoida bilan ko'rsatilgan garmonik funksiyaning oniy qiymatiga teng.

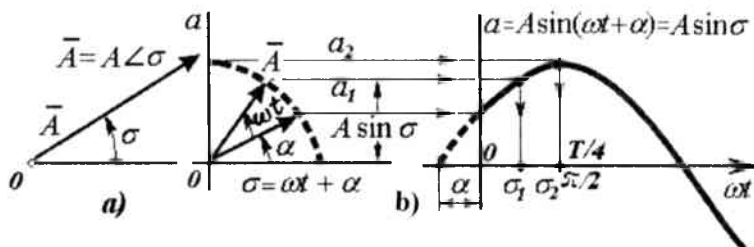
$$\alpha = A \sin(\omega t + \alpha). \quad (4.46, b)$$

Sinusoidani (yoki kosinusoidani) aylanuvchi vektor proektsiyalari yordamida ifodalash ana shunga asoslangan (4.11,b-rasm).

Vektor A ni garmonik funksiya « a »ning *tasviri* deb atash mumkin. Agar chastota ω berilgan bo'lsa $A=A\angle\varphi$ vektori barcha kerakli axborotni o'z ichiga olgan bo'ladi: uning moduli - garmonik funksiya « a »ning amplitudasini, argumenti - boshlang'ich fazasini anglatadi.

Garmonik funksiyalar oniy qiymatlarining yig'indisini vektorlar tasvirlarining yig'indisi orqali almashtirish mumkin. Chunki vektorlar yig'indisining proektsiyasi vektorlar proektsiyalarining yig'indisiga teng.

Garmonik funksiyalarni tasvirlovchi vektorni geometrik qurish, hamda vektorlarni grafik qo'shish *vektor diagrammasi* deyiladi. Bunday diagrammalar yechimning yo'llarini ko'rgazmali qilib tushuntiradi. Vektorlarni aniqlik bilan qurish natijasida izlanayotgan (aniqlanishi zarur bo'lgan) amplituda va fazani topish mumkin. Taxminiy vektor diagrammalarini qurish analitik hisoblashning ishonchli tekshiruvi bo'lishi mumkin va vektorlarning qaysi kvadrantda bo'lishi lozimligini oson yo'l bilan aniqlash imkonini beradi.



4.11-rasm. Sinusoidani aylanuvchi vektor.

4.8. Kompleks (simvolik) usul

Yuqorida bayon etilgan yechimlarni aniqlashdagi geometrik usul, aksariyat hollarda sermehnat ekanligi ko'rinib turibdi; muhimi, undan foydalanish natijasida zanjirning tenglamalarini umumiy

holda yozib olish va uni tahlil qilish ko'p qiyinchiliklarga sabab bo'ladi.

Shuning uchun amerikalik olim Shteynmets tomonidan mukammal qilib ishlab chiqilgan kompleks usulini barcha elektrotexniklar qabul qilganlar. Bu usul *simvolik usul* deb ataladi.

Usulning asoslanishi. Berilgan garmonik funksiya

$$a = A_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (4.47)$$

ni kompleks son sifatida tasvirlash imkoniyatini ko'raylik. Buning uchun *vaqtning kompleks garmonik funksiyasi* « $\tilde{a}$ » tushunchasini kiritamiz.

$$\tilde{a} = A_m e^{j(\omega t + \alpha)} = A_m [\cos(\omega t + \alpha) + j \sin(\omega t + \alpha)], \quad (4.48)$$

bunda eksponenta Eyler trigonometrik funksiyalari ifodasi orqali keltirilgan.

Kompleks garmonik funksiya « $\tilde{a}$ » ning mavhum qismi, ya'ni $\text{Im} \tilde{a}$ vaqtning quyidagi garmonik funksiyasiga aynan tengdir.

$$a = \text{Im} \tilde{a} = \text{Im} A_m e^{j(\alpha + j\omega t)} \quad (4.49)$$

Ko'rsatkichli funksiyaning

$$A_m e^{j\alpha} = A_m \angle \alpha = \dot{A}_m \quad (4.50)$$

deb qabul qilib, yanada soddaroq qilib yozish mumkin.

$$a = \text{Im} \dot{A}_m e^{j\omega t} \quad (4.49, a)$$

$\dot{A}_m$ qiymatni « a » *garmonik funksiyani tasvirlovchi kompleks* deyiladi. Tasvirlovchi kompleks quyidagi effektiv qiymat orqali ifodalanishi ham mumkin.

$$\dot{A}_m = A_m / \sqrt{2} = A \cdot e^{j\alpha} = A \angle \alpha \quad (4.51)$$

(oxirgi holatda bosh harf ketiga « m » indeksi qo'yilmaydi).

Agarda $\omega = 2\pi \cdot f$ chastota qiymati ma'lum bo'lsa, u holda kompleks $\dot{A}$ yoki $\dot{A}_m$ unga aynan o'xshash garmonik funksiya haqida to'liq axborot bera oladi. Bu funksiyaning « a » oniy qiymatini topish uchun $\dot{A} = A \cdot e^{j\alpha}$ kompleksni $\sqrt{2}$ va $e^{j\omega t}$ ga ko'paytirish va olingan natijaning

$$a = A\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \alpha) = \text{Im}(A\sqrt{2} \cdot e^{j\alpha} \cdot e^{j\omega t}) \quad (4.52)$$

mavhum qismini aniqlash zarur.

Garmonik funksiyani kompleks tasvirga tenglashtirib bo'lmaydi; faqat ularning mos kelishligi to'g'risida gapirish va quyidagicha yozish mumkin.

$$a \sim A,$$

bunda, « $\sim$ » o'xshashlik belgisidir.

Adabiyotlarda tok i , kuchlanish u va boshqa garmonik funksiyalarning kompleks shakldagi yozuvi o'zgaruvchining katta harfdagi belgisi ustiga nuqta qo'yish bilan (i, u va h.k.) amalga oshiriladi.

Garmonik funksiyalarni qo'shish. Ikki garmonik funksiya « a » va « b » larning yig'indisi « c »ni aniqlash lozim bo'lsin

$$a + b = \text{Im } \tilde{a} + \text{Im } \tilde{b} = c = \text{Im } \tilde{c}, \quad (4.53)$$

bunda, $\tilde{b}$ va $\tilde{c}$ — mos ravishda kompleks garmonik funksiyalar.

Biroq, ikki kompleks sonlar mavhum qismlarining yig'indisi komplekslar yig'indilarining mavhum qismiga teng, shuning uchun

$$a + b = \text{Im}(\tilde{a} + \tilde{b}), \quad (4.54)$$

yoki, agar qo'shiluvchilarning chastotalari teng bo'lsa

$$a + b = \text{Im}[(A_m + B_m)e^{j\omega t}], \quad (4.55)$$

va (4.54) va (4.53) ni solishtirsak, quyidagi aniqlanadi

$$c = C_m e^{j\omega t} = (A_m + B_m)e^{j\omega t}$$

yoki

$$\tilde{C}_m = \tilde{A}_m + \tilde{B}_m, \quad (4.56)$$

ya'ni bir xil chastotali garmonik funksiyalar yig'indisini ifodalovchi kompleks - qo'shiluvchilarni ifodalovchi komplekslarning yig'indisiga teng; shunday qilib, oniy qiymatlarni qo'shish amallarini kompleks tasvirlarni qo'shish bilan almashtirish mumkin. Tenglik (4.56)ni $\sqrt{2}$ ga bo'lish bilan quyidagi yig'indining to'g'ri ekanligini isbotlash mumkin.

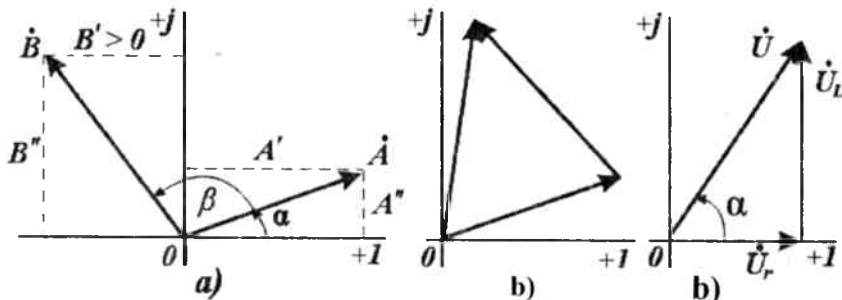
$$\tilde{C} = \tilde{A} + \tilde{B} \quad (4.57)$$

Kompleks tekislik. Har qanday ixtiyoriy olingan kompleks $\tilde{A}$ va $\tilde{B}$ sonlar uchun ikki ortogonal koordinata o'qlaridan biriga haqiqiy qiymatlar, ikkinchisiga mavhum qiymatlar qo'yilgan tekislikda (4.12, a-rasm) konkret nuqtalar mos keladi. Bunda kompleks $\tilde{A}$ va

$\dot{B}$ sonlar tekislikdagi kompleks koordinata boshidan shu nuqtalarga o'tkazilgan vektorlar sifatida taqdim etiladi.

$$\left. \begin{aligned} \dot{A} &= A' + jA'' = A(\cos\alpha + j\sin\alpha); \\ \dot{B} &= B' + jB'' = B(\cos\beta + j\sin\beta) \end{aligned} \right\} \quad (4.58)$$

uning haqiqiy va mavhum tashkil etuvchilari ikki koordinata o'qlariga shu vektorning proeksiyasi sifatida aniqlanadi.



4.12-rasm. Kompleks tekislik.

Keltirilgan komplekslar qutb koordinatalarida ham ifodalanishi mumkin.

$$\left. \begin{aligned} \dot{A} &= Ae^{j\alpha} = A\angle\alpha; \\ \dot{B} &= Be^{j\beta} = B\angle\beta, \end{aligned} \right\} \quad (4.59)$$

bunda, $\dot{A} = Ae^{j\alpha} = A\angle\alpha$, A va B kompleks moduli (vektorlar uzunligi); α , β - argument (haqiqiy o'qqa nisbatan vektorlarning burilganlik burchagi).

Ikki kompleks yig'indisini aniqlashda har doim algebraik ikki hadlik shakliga o'tish maqsadga muvofiqdir.

$$\dot{A} = A' + jA'', \quad \dot{B} = B' + jB''$$

so'ngra alohida haqiqiy va alohida mavhum hadlar yig'indilari aniqlanadi.

$$\dot{C} = \dot{A} + \dot{B} = \dot{C}' + j\dot{C}'' = (\dot{A}' + \dot{A}'') + j(\dot{B}' + \dot{B}'') \quad (4.60)$$

Shunday qilib, garmonik funksiyalarni qo'shish amali bajarilishida kompleks usulni qo'llash (4.12,b-rasm), geometrik usuldan farq qilmas ekan. Bunda (4.58) va (4.60) tengliklardan uzviy ravishda (4.4) trigonometrik bog'lanishlar ham kelib chiqadi.

Kompleks usuldan foydalanganda vektor diagrammalarini qurish tavsiya etiladi. Bu holning ilgari ko'rilganlardan farqi shu bo'ladiki, koordinata o'qlaridan biri mavhum qiymatlar o'qi deb qaraladi.

Shuni ko'rish mumkinki, qo'shish amalini bajarish doirasida, kompleks usulning geometrik usulga nisbatan afzalligi sezilarli emas. Farqni faqatgina mavhum qiymatni haqiqiy qiymatdan yaqqol ajratib turuvchi $j = \sqrt{-1}$ ko'paytmaning mavjudligida ko'rish mumkin.

Garmonik funksiyalarni differentsiallashtirish. Garmonik funksiyani differentsiallashtirishda uning tasviri $j\omega$ ga ko'paytiriladi. Boshqacha qilib aytganda, agar kompleks qiymat $\dot{A}$ differentsiallanuvchi garmonik funksiyani ifodalasa, u holda shu funksiyaning hosilasi $j\omega\dot{A}$ kompleks bilan tasvirlanadi.

Darhaqiqat, agar $a = \text{Im } \tilde{a} \sim \dot{A}$ bo'lsa, unda

$$da/dt = \text{Im } d\tilde{a}/dt = \text{Im } j\omega\tilde{a} \sim j\omega\dot{A}. \quad (4.61)$$

Chunki $\tilde{a} = \dot{A}_m e^{j\omega t}$ va mavhum qismning hosilasi, hosilaning mavhum qismiga teng.

L , r zanjiri uchun (4.5,b-rasm), kuchlanish quyidagi yig'indi sifatida yozilishi mumkin

$$u = ir + L di/dt.$$

Agar zanjirdan $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \alpha) \sim I \cdot e^{j\alpha} = \dot{I}$ toki oqayayotgan, deb faraz qilinsa, bunda, aniqki i va $\dot{I}$ o'zaro mos deb ko'riladi.

Differentsiallashtirish ($j\omega$) ga ko'paytirish bilan almashtirib, qo'shish qoidalarini e'tiborga olsak, kuchlanishni tasvirlovchi kompleks uchun quyidagi bog'lanishni yozish mumkin.

$$\dot{U} = U \cdot e^{j\theta} = (r + j\omega L) \cdot \dot{I} \quad (4.62)$$

L , r – *zanjir uchun kompleks qarshilik*. Ifoda (4.62) o'ng tomonining birinchi ko'paytmasi (qavs ichidagi qiymat) L , r – *zanjirning kompleks qarshiligi* deyiladi.

Kompleks qarshilik har doim bosh harf $\underline{Z}$ bilan belgilanadi va ko'rsatkichli yoki ikki had shaklida keltiriladi, ya'ni

$$\underline{Z} = ze^{j\varphi} = z \angle \varphi = r + j\omega L = r + jx_L \quad (4.63)$$

Bunda kichik harfli $z = |Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ yoki bosh harfli absolyut miqdor $|Z|$ modul yoki to'la qarshilik ifodasi; $\varphi = \arctg(\omega L / R) > 0$ – argument; $x_L = \omega L$ – induktiv qarshilik deb ataladilar. Kompleks qarshilikdan foydalanib, (4.62) kompleks tenglikni Om qonuni shaklida yozish mumkin.

$$\dot{U} = \underline{Z} \cdot \dot{I} \quad (4.64)$$

va uni quyidagicha ta'riflash mumkin: *agar hamma qiymatlarni kompleks shaklda tasvirlasak, zanjirdagi kuchlanish qiymati tok va qarshiliklar ko'paytmalariga teng*. Unda (4.64) dagi komplekslarni quyidagicha yozish mumkin.

$$\dot{U} = U \angle \beta = z \angle \varphi \cdot I \angle \alpha = z I \angle (\alpha + \varphi).$$

Ikki kompleks sonlar ko'paytmasini hosil qilishda ular argumentlari algebrik yig'indisi olinadi; bu esa ko'rsatkichli shakldan foydalanib yozganda ko'zga yaqqol tashlanadi: $e^{j\varphi} \cdot e^{j\alpha} = e^{j(\varphi+\alpha)}$. Demak, β , ya'ni (4.64) dagi kuchlanishning boshlang'ich fazasi kompleks qarshilik Z ning argumenti φ bilan tok I ning boshlang'ich fazasi α yig'indilariga teng.

$$\beta = \varphi + \alpha. \quad (4.65)$$

Bunda kuchlanish amplitudasining qiymati tok amplitudasi va qarshilik moduli ko'paytmasiga teng.

$$U_m = U\sqrt{2} = z \cdot I_m = z \cdot I\sqrt{2}. \quad (4.66)$$

Garmonik funksiyalarni integrallash. Garmonik funksiyani integrallaganda uning tasviri $j\omega$ ga bo'linadi. Boshqacha qilib aytganda, agar kompleks qiymat $\dot{A}$ integrallanuvchi funksiyani tasvirlasa, unda uning integrali $A / j\omega$ kompleks bilan tasvirlanadi.

Komplekslik belgisi j ga bo'lish, argumentni $-\frac{\pi}{2}$ burchakka o'zgartiradi (yoki vektorni shu burchakka buradi). Bularni quyidagi bog'lanishlar orqali ko'rsatish mumkin.

$$a = A_m \sin(\omega t + \alpha) \sim A \cdot e^{j\alpha} = \dot{A};$$

$$s = \int a dt = \frac{A_m}{\omega} \sin(\omega t + \alpha - \pi/2) \sim \dot{A} / j\omega = \dot{S} \quad (4.67)$$

Bu yerda yana qayta eslatish zarurki, ushbu integrallashtirish olingan funksiyani faqat garmonik tashkil etuvchisi e'tiborga olayapmiz, ya'ni faqat barqarorlik rejimni ko'rayapmiz. O'zgaruvchi tashkil etuvchisi, noldan farqli bo'lsa ham, uni e'tiborga olmaymiz.

Yuqorida keltirilgan qoidani, differensiallashda qabul qilingan tahlilga o'xshash yo'l bilan tekshirish mumkin. Lekin, integrallash-differensiallashga teskari bo'lgan amal ekanini eslatish bilan cheklansa ham bo'ladi.

Ketma-ket ulangan r va S li zanjir kuchlanishi shoxobcha toki i bilan quyidagi tenglama orqali bog'langan.

$$u = ri + \frac{1}{C} \int i dt, \quad (4.68)$$

bunga kompleks shakldagi quyidagi tenglama mos keladi.

$$\dot{U} = r \dot{I} + \frac{1}{j\omega C} \dot{I} = \left(r + \frac{1}{j\omega C} \right) \dot{I}, \quad (4.69)$$

C , r - zanjirning kompleks karshiligi. (4.69)da qavs ichidagi kupaytmani r , C li zanjirning kompleks karshiligi deb atash mumkin.

$$\underline{z} = r + 1/(j\omega C) = r - j[1/(\omega C)] = r - jx_C = ze^{j\varphi}, \quad (4.70)$$

bunda o'ng tomondagi ko'rsatkichli funksiya moduli

$z = \sqrt{r^2 + (1/\omega C)^2}$ - to'la qarshilik, $\varphi = \arctg \frac{-1/\omega C}{r} < 0$, uning argumenti; $x_C = 1/\omega C$ - sig'lm qarshiligi deyiladi.

Burchak φ manfiy ishorali bo'lishining sababi, mavhum tashkil etuvchining ishorasi minus bo'lganligidir.

$$1/(j\omega C) = -j[1/(\omega C)] = -jx_C$$

Kompleks va differensial tenglamalarning mosligi. Keltirilgan qoidalar asosida elektr zanjirining garmonik funksiyalari uchun Kirxgof qonunlari bo'yicha qurilgan *differensial tenglamalarga mos keluvchi kompleks algebraik tenglamalarini* tuzish mumkin. Yana bir marta ta'kidlash zarurki, bunda biz faqat barqarorlashgan rejimni nazarda tutamiz. Bu rejimda barcha tok va kuchlanishlar garmonik funsiyalardan iborat. Masalan, ketma-ket ulangan r , L , C li zanjirning (4.7,b-rasm) tenglamalari

$$u = L \frac{di}{dt} + u_C + ri$$

yoki

$$u = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + ri, \quad (4.71)$$

bunga quyidagi algebraik kompleks tenglama mos keladi

$$\dot{U} = (j\omega L + 1/(j\omega C) + r) \dot{I} \quad (4.72)$$

Oddiy ketma-ket-parallel ulangan zanjirdagi (4.13-rasm) jarayon ifodalanishi uchun KTQ asosida bir tenglama $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3$ va KKK asosida ikkita tenglama tuzish mumkin.

$$u = r_1 \dot{I}_1 + L_1 \frac{d\dot{I}_1}{dt} + \frac{1}{C_2} \int \dot{I}_2 dt + r_3 \dot{I}_3;$$

$$0 = \frac{1}{C_2} \int \dot{I}_2 dt + r_2 \dot{I}_2 - r_3 \dot{I}_3 - L_3 \frac{d\dot{I}_2}{dt}.$$

Bu tenglamalarga quyidagi algebraik kompleks tenglamalar mos keladi.

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3; \quad \dot{U} = (r_1 + j\omega L_1) \dot{I}_1 + (1/(j\omega C_2) + r_2) \dot{I}_2;$$

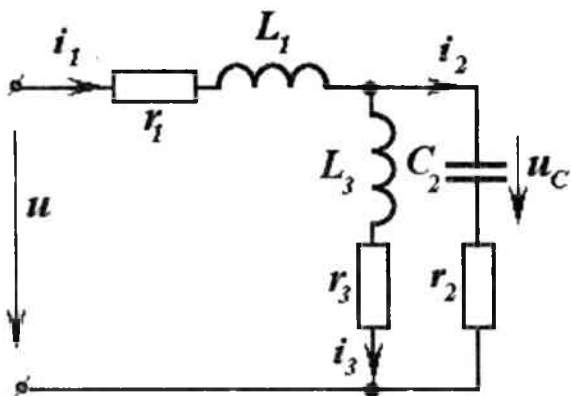
$$0 = (1/(j\omega C_2) + r_2) \dot{I}_2 - (r_3 + j\omega L_3) \dot{I}_3.$$

Shunday qilib, kompleks usulni taklif etish natijasida *nisbatan qiyin bo'lgan differensial tenglamalar tizimini yechish o'rniga, yengilroq bo'lgan algebraik tenglamalar tizimini yechish taklif etilmoqda.*

Kompleks usulning keng qo'llanilishini ta'minlaydigan uning asosiy xususiyati ham mana shundadir.

Komplekslarni qo'shganda va ayirganda hadlar (algebraik) shaklldan foydalangan maqsadga muvofiq, aksincha, ko'paytirish yoki bo'lish amallarini bajarishda qutubli (yoki ko'rsatkichli)

shakldan foydalanish zarur. Shuning uchun komplekslar bilan amallar bajarishda algebraik shakldan qutb shaklga va qutb shakldan algebraik shaklga, ya'ni biridan boshqasiga tez-tez o'tib turishga to'g'ri keladi.



4.13-rasm. Aralash ulangan zanjir.

Kirxgof qonunlarining kompleks shakldagi ifodasi. Yuqorida keltirilgan fikrlarni umumlashtirib, Kirxgorf qonunlarini quyidagi shaklda yozish mumkin.

$$\sum \dot{I}_n = J;$$

$$\sum \underline{Z}_n \dot{I}_n = \sum \dot{E}_k.$$

Yuqoridagi misolardan foydalanib keltirilgan bog'lanishlarning mazmunini tushunish oson. Kompleks funksiyalardan foydalanishda, qiymatlarning musbat yo'nalishlarini tanlash va belgilash, avvalgidek, ahamiyatlidir.

O'zgarmas tok zanjirlari uchun keltirib chiqarilgan barcha bog'lanishlarni o'zgaruvchan tok zanjirlari uchun ham yozish mushkul ish emas. Masalan, kontur toklari va tugun potensialari tenglamalari matritsa shaklida quyidagicha yoziladi.

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{kl} \cdot \dot{I}_l &= \dot{E}_k; \\ B_{kl} \cdot \dot{\phi}_{kl} &= J_{kl}, \end{aligned} \quad (4.74)$$

bunda matritsaning barcha elementlari kompleks shaklda yozilgan, ilgorigidek $B_{k\ell} = -Y_{k\ell}$ - "k" va "ℓ" tuguhlar orasidagi ($k \neq \ell$) o'tkazuvchanlikdir va unda $B_{\ell\ell} = Y_{1\ell} + Y_{2\ell} + \dots + Y_{\ell+1,\ell}$ va h.k.

Chiziqli bog'langan tenglamalar

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_k &= A_k + Y_{k\ell} \cdot \dot{U}_\ell; \\ \dot{U}_\ell &= B_\ell + Z_{\ell k} \cdot \dot{I}_k; \\ \dot{I}_k &= C_k + H_{kn} \cdot \dot{I}_n \end{aligned} \right\} \quad (4.75)$$

va h.k. ham ilgorigidek o'z kuchiga egadir.

Bu ifodalarda uzatish o'tkazuvchanligi $Y_{k\ell}$, uzatish qarshiligi $Z_{\ell k}$, uzatish koeffitsiyenti H_{kn} , ilgorigi mohiyatlariga ega, lekin ular kompleks shaklda yoki kompleks holdidagi matritsa shaklida yozilgan. O'zgarmas qiymatlar $A_k, B_\ell, \dots$ ham umumiy holda komplekslardir.

I va Z turdagi komplekslarning farqlari. Ta'rifidan ko'rinib turibdiki, garmonik o'zgaruvchi funksiyalarni ifodalovchi kompleks $\dot{I} \sim i(t); \dot{U} \sim u(t), \dots$ qiymatlar $\underline{Z}$ turdagi komplekslardan farqlanadi.

Birinchilariga $\dot{I} = I \angle \alpha, \dot{U} = U \angle \beta, \dots$ vaqt bo'yicha garmonik funksiyalar mos kelsa, ikkinchi turdagi $\underline{Z} = z \angle \varphi$ komplekslar hoshqacha mazmunga ega - ular ikki garmonik funksiyalar orasidagi bog'lanishni ifodalovchi ko'paytuvchilardir. Masalan, Z kompleksi ikki garmonik funksiyalarni tasvirlovchi kuchlanish kompleksi va tok kompleksi nisbatlariga teng: $\underline{Z} = \dot{U} / \dot{I} = \dot{U}_m / \dot{I}_m$; uning moduli $z = U / I = U_m / I_m$ esa ushbu funksiyalar modullari nisbatiga teng, argumenti φ esa shu garmonik funksiyalarning hoshlang'ich fazalari orasidagi farqni ko'rsatadi, ya'ni $\varphi = \beta - \alpha$.

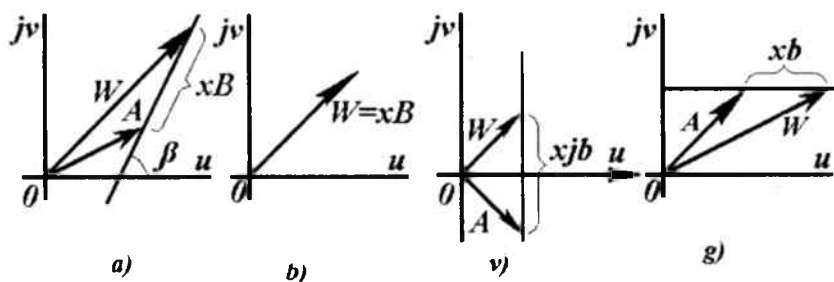
Ikkinchi turdagi komplekslar **kompleks operatorlari** deyiladi. Ularni kompleks tekislikda ko'rsatish mumkin, biroq ular bu tekislikda sinusoidal o'zgaruvchi qiymatlarni tasvirlamaydi.

Garmonik funksiyalarning tasvirlanishidan farqli ravishda ularni belgilovchi bosh harf ustiga nuqta qo'yilmaydi. Bu qiymatlarning kompleks ekanligini ataylab ko'rsatish zarur bo'lgan hollarda, ba'zi adabiyotlarda belgilanayotgan qiymat bosh harfi ustiga maxsus belgi ($\sim$, $\wedge$, $-$) qo'yiladi.

4.9. Kompleks tekislikda to'g'ri chiziq tenglamasi

O'zgaruvchan tokli elektr zanjirlarini tahlil qilganda zanjir parametrlaridan biri r, Z yoki chastota ω o'zgarganda, unga bog'liq ravishda kompleks toki $\dot{I}$, kuchlanishi $\dot{U}$ yoki kirish qarshiligi Z_{ku} ning moduli va argumenti qanday o'zgarishini bilish katta ahamiyatga ega. Aksariyat, kompleks maydonida ushbu ko'rila-yotgan vektorlar uchlarining siljishini tasvirlovchi egri chiziq sifatida o'zgarish qonuniyatlarini aniqlashga imkon bo'ladi; bunday egri chiziqlar *godograf* deyiladi. Shuning uchun, kompleks tekislikda bunday *chiziqlar qanday tenglamalar yordamida ifodalanishini* bilish zarur.

Kompleks tekislikda amaliy ahamiyatga ega bo'lgan chiziqlar – bular to'g'ri chiziq va aylanadir ($w = U + jU$).



4.14-rasm. Godograf chiziqlari.

Kompleks maydonidagi to'g'ri chiziq, umumiy holda quyidagi chiziqli bog'lanish orqali ifodalanadi $W = A + x\dot{A}$, bunda, x - haqiqiy sondan iborat o'zgaruvchi; $A = a\angle\alpha, B = b\angle\beta$ - modullari a va b bo'lgan o'zgarmas komplekslar.

Bu to'g'ri chiziq haqiqiy sonlar o'qi bilan β burchak (4.14,a-rasm) tashkil etadi. Buni o'rganishda xususiy hollarni ko'rib chiqish zarurati bor: $A=0$ bo'lganda to'g'ri chiziq koordinata boshidan o'tadi. (4.14,b-rasm); $B=jb$ bo'lganda to'g'ri chiziq mavhum sonlar o'qiga parallel (4.14,v-rasm); $B=b$ bo'lganda to'g'ri chiziq haqiqiy sonlar o'qiga parallel (4.14,g-rasm).

5. TARKIBIDA L, R, C BO'LGAN CHIZIQLI O'ZGARUVCHAN TOK ZANJIRI NAZARIYASI VA HISOBLASH USULLARI

5.1. Elektr zanjiri tenglamalarining kompleks shakldagi ko'rinishlari

Kirxgof qonunlari. O'zgarmas L, r, C parametrli o'zgaruvchan tok zanjirlarini tahlil qilish va hisoblash usullari Kirxgof qonunlarini tok va kuchlanishlarning oniy qiymatlariga tatbiq etishga asoslangan, demak bu qonunlarni barqarorlik rejimi uchun va kompleks shaklda yozilgan garmonik toklar uchun qo'llashga asoslangan.

Kirxgof qonunlarini tatbiq etish shartlari quyidagilardir:

-zanjirning ko'rilayotgan nuqtalari orasidagi kuchlanishni potentsiallar farqi deb qarash mumkunligi;

-ko'rilayotgan zanjirning ixtiyoriy tuguni uchun undagi toklar oniy qiymatlari yig'indisining nolga tengligi.

Ushbu shartlarning mukammalroq tahlilini faqatgina elektromagnit maydoni nazariyasi ko'rilayotganda bajarish mumkin. Quyidagi barcha bayonlarimizda esa ko'rilayotgan zanjir uchun ushbu shartlar bajariladi, deb hisoblaymiz.

Mazkur fikrlar o'zgarmas tok zanjirlari nazariyasining barcha teorema va hisoblash usullarini o'zgaruvchan tok chiziqli zanjirlariga qo'llash mumkinligi haqidagi xulosaga olib keladi. Bunda elektr zanjiri kompleks shakldagi tenglamalar tizimining yechimlarini o'zgarmas tok zanjirlari uchun ilgari aniqlangan andozalar (qoliplar)ga keltirish mumkin. Albatta, bunda o'ziga yarasha xosliklar paydo bo'ladi. Masalan, ikki kuchlanish o'zaro yoki ikki kompleks qarshiliklar o'zaro tengligi haqida gap ketganda, ularning ham modullari tengligini, ham argumentlari tengligini nazarda tutish zarur; zanjirning ish rejimi na faqat manba kuchlanishi va toki qiymatlari bilan aniqlanadi, balki ular fazalar farqiga (boshlang'ich fazasiga) ham, chastota va h.k.larga ham

bog'liq. O'zgaruvchan toklar nazariyasida butkul yangi tushunchalar ham uchraydi.

Qarshilik. Ixtiyoriy shoxobcha yoki ikki qutblik kompleks qarshiligi, umumiy holda, haqiqiy va mavhum tashkil etuvchilardan iborat bo'ladi.

$$\underline{Z} = r + jx \quad (5.1)$$

Bu yerda, albatta, quyidagi yozuvning haqli ekani shubhasiz

$$\dot{U} = \dot{I} \underline{Z}, \quad (5.2)$$

bunda, $\dot{U} = U \angle \beta$ va $\dot{I} = I \angle \alpha$ - ikki qutblikning kirish qismidagi kuchlanish va tok.

Tenglik (5.1)da

$$\text{yoki} \quad \underline{Z} = ze^{j\varphi} = r + jx, \quad (5.3)$$

bunda, $z = \sqrt{r^2 + x^2}$ va $\operatorname{tg} \varphi = x/r$ yoki $\varphi = \arctg(x/r) = \beta - \alpha$.

Kompleks qarshilik $\underline{Z}$ ning moduli z ni *to'la qarshilik* ham deb ataladi. Uning haqiqiy qismi r ni, sodda qilib qarshilik yoki *aktiv qarshilik* deyiladi (bu passiv zanjirning *aktiv qarshiligidir!* Aktiv zanjir bilan adashtirilmasin!).

Mavhum qismini esa *reaktiv qarshilik* deyiladi.

Induktivlikning reaktiv qarshiligi musbatdir.

$$\underline{Z}_L = jx = j\omega L = jx_L; \quad x = x_L > 0 \quad (5.4)$$

Sig'imning reaktiv qarshiligi manfiydir

$$\underline{Z}_C = jx = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C} = -jx_C; \quad x = -x_C < 0 \quad (5.5)$$

Ketma-ket ulangan L , r , S li zanjirning kompleks qarshiligi

$$\underline{Z} = r + jx = r + j(\omega L - 1/\omega C) = r + j(x_L - x_C) \quad (5.6)$$

Demak, bu holda reaktiv qarshilik yoki musbat yoki manfiy bo'lishi mumkin.

$$x = \omega L - 1/\omega C = x_L - x_C;$$

$$\text{agar, } x > 0 \text{ bo'lsa, u holda } x_L > x_C \text{ yoki } \omega^2 > 1/LC; \quad (5.7)$$

$$\text{agar, } x < 0 \text{ bo'lsa, u holda } x_L < x_C \text{ yoki } \omega^2 < 1/LC. \quad (5.7,b)$$

Rezonans holatda, ya'ni

$$\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (5.8)$$

bo'lganda reaktiv qarshilik x nolga teng; agar $\omega < \omega_0$ bo'lsa x manfiy; yuqori $\omega > \omega_0$ chastotalarda x musbat ishorali.

Qarshilik $\underline{Z}$ ni kompleks maydonda grafik sifatida tasvirlash mumkin. Bu grafik zanjir parametrining u yoki bu qiymatlari o'zgarganda $\underline{Z}$ ning qanday o'zgarishini aniqlamoqchi bo'lganda ancha qulaydir (godograf).

Biror zanjir ketma-ket ulangan L, r, C li shoxobchasida (5.1.a-rasm) chastota o'zgargandagi qarshilikning godografi mavhum o'qqa parallel bo'lgan to'g'ri chiziq bilan tasvirlanadi (5.1.b-rasm).

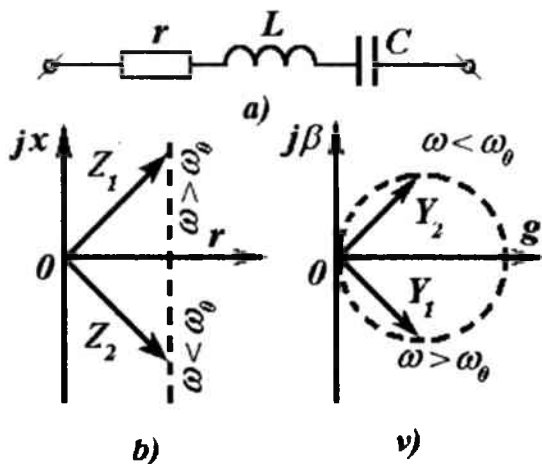
O'tkazuvchanlik. Kompleks qarshiligi $\underline{Z}$ ga teskari bo'lgan qiymat kompleks o'tkazuvchanlik deyiladi.

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{-je^{j\varphi}} = \frac{1}{-j} e^{-j\varphi} \quad (5.9)$$

$$\text{yoki} \quad \underline{Y} = ye^{-j\varphi} = y\angle -\varphi = g + jb, \quad (5.10)$$

$$\text{bunda,} \quad y = 1/z = \sqrt{g^2 + b^2} \quad \text{va} \quad \varphi = \arctg(b/g).$$

O'tkazuvchanlikning moduli y (absolyut qiymati), uning to'liq o'tkazuvchanligi deb ataladi; g va b — aktiv va reaktiv o'tkazuvchanligi deyiladi. Bazi adabiyotlarda $\underline{Y} = y\angle -\varphi = g - jb$ ifodaning reaktiv o'tkazuvchanligi ishorasini o'zgacha qabul qilinadi. Biz keyingi matnlarda reaktiv o'tkazuvchanlik ishoralarini (5.9) va (5.10) dagi kabi olamiz, deb qabul qilamiz.



5.1-rasm. Ketma-ket ulangan r, L, C li zanjir.

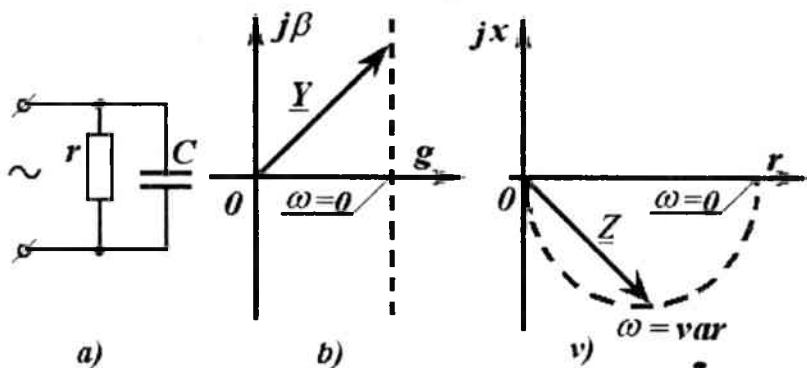
Parallel ulangan shoxobchalardagi toklarni hisoblaganda, o'zgaras tok zanjirlaridagi kabi, ularning o'tkazuvchanligi qo'shiladi, ya'ni ikki parallel shoxobcha (yoki zanjir bo'lagi)ning ekvivalent o'tkazuvchanligi

$$\underline{Y}_3 = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2, \quad (5.11)$$

har bir parallel shoxobcha (yoki zanjir bo'lagi)ning kompleks o'tkazuvchanliklar yig'indisiga teng.

O'z-o'zidan kelib chiqadiki, umumiy holda, yig'indi $\underline{Y}_3$ ning moduli, modullar yig'indisi ($y_1 + y_2$)ga teng emas.

Bunda $\underline{Y}$ vektorning godografi $\underline{Z}$ egri chizig'iga teskari bo'lgan chiziqni tasvirlaydi. Shuning uchun ketma-ket ulangan L, r, C li zanjir shoxobchasining o'tkazuvchanligi ω o'zgarganda uchlari aylanani hosil qiluvchi vektor bilan ifodalanadi (5.1, v-rasmda $\beta = -b$).



5.2-rasm. Zanjirning kompleks o'tkazuvchanliklari va qarshiliklarining vektor godograflari

Agar ω o'zgargandagi $\underline{Y}$ vektor godografi parallel ulangan r va C 5.2,a-rasm zanjiridagi kabi to'g'ri chiziq bo'lsa (5.2,b-rasm), u holatda $\underline{Z}$ vektorning uchlari (ya'ni vektor uchining geometrik joylashuvi) aylanadan iborat bo'ladi (5.2,v-rasm). Shunga o'xshash tahliliy qurishni $\omega C = \text{const}$ va $r = \text{var}$ uchun bajarish mumkin.

Misol. Qarshiliklari $\underline{Z}_1 = 3 - j4\Omega$ va $\underline{Z}_2 = 4 + j3\Omega$ bo'lgan ikki parallel shoxobchalar o'zgaruvchan kuchlanish manbaiga ulangan (5.3,a-

rasm). Har bir shoxobchani o'tkazuvchanliklari hamda ularni qo'shib umumiy o'tkazuvchanlikni hisoblash talab qilinadi. Agar zanjirdagi voltmetr $U=100V$ ko'rsatayotgan bo'lsa va barcha ulangan asboblarning effektiv qiymatlar ko'rsatishini e'tiborga olsak, uchchala ampermetr ko'rsatayotgan qiymatlarni aniqlang.

Toklarning vektor diagrammalarini quring.

Yechish. Qarshiliklarga teskari bo'lgan qiymatlarni hisoblab, quyidagilarni aniqlaymiz:

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{3-j4} = \frac{3+j4}{25} = 0,12 + j0,16 \text{ Sm};$$

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{3+j4} = \frac{3-j4}{25} = 0,12 - j0,16 \text{ Sm}.$$

Umumiy o'tkazuvchanlik

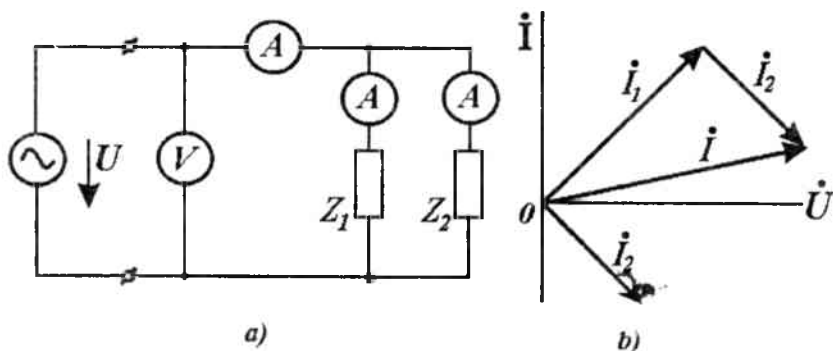
$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = 0,28 + j0 \text{ Sm}.$$

O'tkazuvchanlik moduliari $y_1 = 0,20 \text{ Sm}$; $y_2 = 0,20 \text{ Sm}$; $y = 0,282 \text{ Sm}$.

Shuning uchun, ampermetrlar ko'rsatayotgan toklarning qiymatlari

$$I_1 = y_1 U = 20 \text{ A}; \quad I_2 = y_2 U = 20 \text{ A}; \quad I = |\vec{I}_1 + \vec{I}_2| = y U = 28,2 \text{ A}.$$

Bunda, $\vec{I}_1 = \underline{Y}_1 \cdot \vec{U}$; $\vec{I}_2 = \underline{Y}_2 \cdot \vec{U}$ bo'lganda $\vec{U} = U$ ekanligini e'tiborga olinib, toklarning vektor diagrammasi 5.3,b-rasmda qurilgan.



5.3-rasm. Ikki parallel shoxobchalar.

Misol. Zanjirning ikki bo'lagi - biri aktiv qarshilik, ikkinchisi induktiv-aktiv qarshiliklardan iborat bo'lgan qismlari ketma-ket ulangan (5.4,a-rasm). Ulangan o'lchov asboblari ushbu effektiv qiymatlarni ko'rsatmoqda:

$$I = 2\text{ A}; U_1 = 20\text{ V}; U_2 = 36\text{ V}; U = 50\text{ V}.$$

Vektor diagrammasini qurib, ikkinchi qarshilik $Z_2 = r_2 + jx_2$ ning aktiv va induktiv tashkil etuvchilarini aniqlang.

Yechish. Kompleks shaklda berilgan kuchlanishlar uchun KKQ $\dot{U}_1 + \dot{U}_2 = \dot{U}$ bajarilishi shart; bunda kuchlanish $\dot{U}_1$ fazasi I tok fazasi bilan mos kelishi, $\dot{U}_2$ kuchlanishi esa I tokdan ilgarilab ketishi zarur. Berilgan modullarda ushbu shartlarga kompleks maydonda qurilgan birdan-bir vektorlar uchburchagi mos keladi. Bunday uchburchakni qurish (sirkul yordamida) yengil amalga oshiriladi (5.4,b-rasm). Tok vektori I barcha elementlar uchun umumiy, shuning uchun uning vektori yo'nalishida $\dot{U}_1$ kuchlanishning vektorini joylashtiramiz. Uning uchidan va ketidan radiuslari $|U|$ va $|U_2|$ bo'lgan yoylarni o'tkazamiz. Ushbu yoylar kesishgan nuqta $\dot{U}$ va $\dot{U}_2$ vektorlarning geometrik o'rnini ko'rsatadi.

Bunda $\dot{U}, \dot{U}_1, \dot{U}_2$ vektorlar uchun masshtablar bir xil bo'lishi shart. Qurilgan diagrammadan $\cos \varphi_2$ va $\sin \varphi_2$, hamda $\varphi_2 = 57^\circ 20'$ aniqlash mumkin. Izlanayotgan qarshilikning moduli o'lchov asboblari ko'rsatkichidan aniqlanadi.

$$z_2 = U_2 / I = 18\Omega. \text{ Kompleks qarshilik}$$

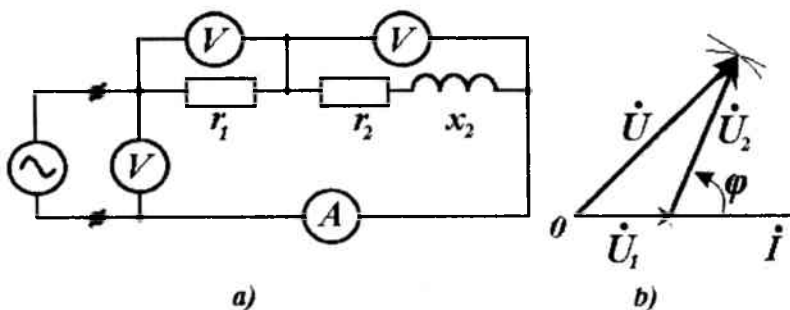
$$Z_2 = z_2(\cos \varphi_2 + j \sin \varphi_2) = 10 + 15j \Omega \text{ ga teng.}$$

Ushbu natijalarni analitik ifodalar yordamida aniqlash ham mumkin.

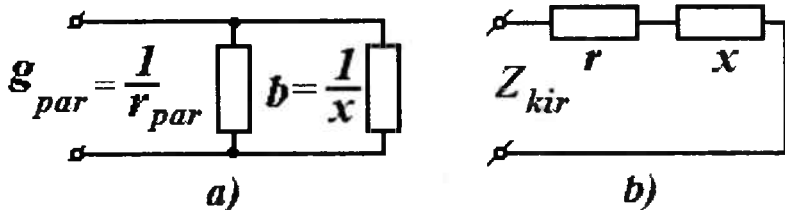
Passiv ikki qutblikning kirish qarshiligi va kirish o'tkazuvchanligi. Ushbu Z_{kir} va $Y_{kir} = 1 / Z_{kir}$ kattaliklar o'zaro teskari qiymatlardir. Ularning har biri aktiv va reaktiv qiymatlar yig'indisi sifatida tasvirlanishi mumkin.

$$Z_{kir} = r + jx \text{ va } Y_{kir} = g - jb. \quad (5.12)$$

Bundagi birinchi bog'lanish ketma-ket ulangan zanjirga, ikkinchisi esa parallel ulangan zanjirga (5.5-rasmi) mos keladi, deb tasavvur etish mumkin.



5.4-rasm. Ketma-ket ulangan zanjir.



5.5-rasm. Parallel ulangan zanjirni ketma-ket ulangan zanjirga keltirish.

Oddiy o'zgartirishlardan so'ng quyidagilarni aniqlaymiz:

$$\underline{Y}_{kir} = g - jb = 1/\underline{Z}_{kir} = 1/(r + jx) = (r - jx)/(r^2 + x^2), \quad (5.13)$$

$$\text{bunda,} \quad g = r/(r^2 + x^2) \text{ va } b = x/(r^2 + x^2). \quad (5.14)$$

Ekvivalent sxemaning ikki parallel shoxobchalari tarkibida aktiv qarshilik

$$R = 1/g = (r^2 + x^2)/r \quad (5.15)$$

va induktiv qarshilik

$$X = 1/b = (r^2 + x^2)/x \quad (5.16)$$

mavjuddir.

Misol. Sxemasi 5.5,a-rasmda keltirilgan zanjir tarkibida sig'imi C_{flap} bo'lgan parallel kondensator mavjud; kondensatorning izolyatsiyasi real bo'lgani uchun, uning tarkibida katta bo'lmagan $g_{parl} = 1/R_{parl}$ o'tkazuvchanlik mavjud. Bunday kondensatorning

kirish qarshiligini 5.5, *b*-rasmda keltirilgan tartibda ketma-ket ulangan C_Y (rasmda umumiy holat uchun x belgilangan) va R_i (rasmda r) bo'lgan almashtirish sxemasi bilan tasvirlash zarur bo'lsin. Parametrlardagi «*par*» va «*ket*» indeksleri ushbu elementlarning mohiyatini, ya'ni parallel zanjirni ketma-ket ulangan zanjirga almashtirilayotganini ta'kidlash uchun qo'yilgan.

Yechish. Avvalo, (5.5)dagi ishoralarni e'tiborga olib quyidagini aniqlaymiz:

$$b = 1/X = -1/X_c = -\omega C_{par}.$$

So'ngra, (5.13)ga teskari bo'lgan amalni bajaramiz: parallel ulangan zanjir parametrlari ma'lum deb hisoblab, ketma-ket ulangan zanjir parametrlarini aniqlaymiz.

$$Z_{ket} = R_{ket} + jX_{ket} = 1/Y_{ket} = 1/(g - jb) = (g + jb)/(g^2 + b^2),$$

undan ketma-ket ulangan zanjir elementlari

$$X_{ket} = b/(g^2 + b^2) = -\omega C_{par} / (\omega^2 C_{par}^2 + g^2_{par}) = -1 / \omega C_{ket}$$

Keyingi bog'lanishdan quyidagi aniqlanadi

$$C_{ket} = C_{par} + g^2_{par} / \omega^2 C_{par}.$$

Shunga o'xshash, quyidagilarni aniqlaymiz:

$$r_{ket} = g_{par} / (g^2_{par} + \omega^2 C_{par}^2) = R_{par} / [1 + (\omega C_{par} R_{par})^2]$$

Tok va kuchlanishning aktiv va reaktiv tashkil etuvchilari.

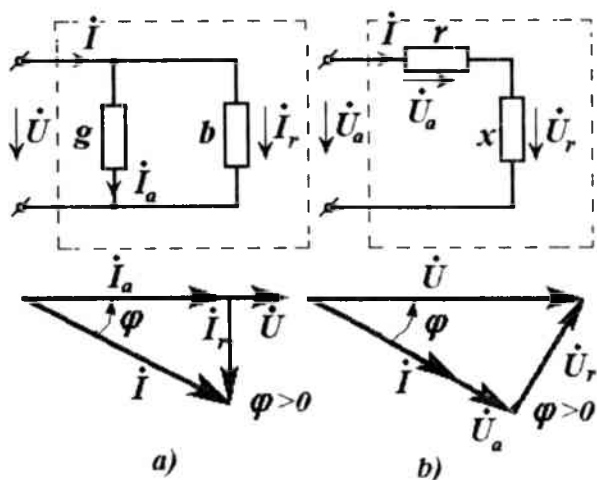
Passiv ikki qutblikning almashtirish sxemasi (5.6, a-rasm) parallel shoxobchalardagi toklar quyidagiga teng bo'lsin.

$$\dot{I}_o = \dot{U} \cdot g \quad \text{va} \quad \dot{I}_p = -\dot{U} \cdot jb, \quad (5.17)$$

ulardan biri ($\dot{I}_a$) tokning aktiv tashkil etuvchisi bo'lib, kuchlanish $\dot{U}$ bilan fazasi mos keladi, ikkinchisi ($\dot{I}_p$) esa kuchlanish $\dot{U}$ dan fazasi 90° ga kechikadi. Berilgan shartga ko'ra

$$\dot{I} = \dot{U} \cdot Y_{ket} = \dot{U}(g - jb) = \dot{I}_a + \dot{I}_p. \quad (5.18)$$

Umumiy tokning tashkil etuvchilarga ($\dot{I}_a$ va $\dot{I}_p$) ajratilishi 5.6,a-rasmda keltirilgan. Diagrammadan hamda (5.17)dan ko'rinishicha, ular ortogonaldir. Ulardan birinchisi $\dot{I}_a$ - *aktiv*, ikkinchisi esa $\dot{I}_p$ - *reaktiv tashkil etuvchilar* deyiladi. Agar tok $\dot{I}$ fazasi kuchlanishnikidan φ burchakka kechikayotgan bo'lsa, unda

$$I_a = I \cdot \cos \varphi \text{ va } I_p = I \cdot \sin \varphi \quad (5.19)$$


5.6-rasm. Elektr zanjir va uning vektor diagrammasi.

Tokni aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarga ajratish - bu ko'p jihatdan formal jarayondir. Bu ajratish, umumiy holda, haqiqiy va mavhum tashkil etuvchilarga ajratish bilan bog'liq emas.

$$\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_p = I' + jI'' \quad (5.20)$$

Misol. Kuchlanish va tok quyidagi kompleks shakllarda berilgan:

$$\dot{U} = 100 + j100 \text{ V}; \quad \dot{I} = 10 + j5 \text{ A.}$$

Tokning aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarini aniqlang.

Yechish. Hisoblash natijasida kuchlanish va toklar uchun quyidagilarni aniqlaymiz:

$$\vec{U} = 141 \angle 45^\circ \text{ V}; \quad \vec{I} = 11.2 \angle 26^\circ 30' \text{ A}.$$

Demak, $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 45^\circ - 26^\circ 30' = 18^\circ 30'$ va

$$I_a = 11.2 \cdot \cos \varphi = 1.7 \text{ A}, \quad I_p = 11.2 \cdot \sin \varphi = 3.52 \text{ A}.$$

Shunga o'xshash, kuchlanishning ham aktiv, ham reaktiv tashkil etuvchilari tushunchalarini kiritamiz; bu tashkil etuvchilar ketma-ket ulangan zanjirning aktiv va reaktiv qarshiliklaridagi kuchlanishiarni (5.6,b-rasm) ko'rsatadi.

$$\vec{U}_a = r\vec{I} \quad \text{va} \quad \vec{U}_p = jx\vec{I}$$

Qabul qilingan soddalashtirishlar. O'zgaruvchan tokli elektr zanjirlari sxemalarida keltirilgan manba, aksariyat ko'rsatilmaydi. Bunda, masalan, 5.6-rasmda keltirilganidek, berilgan kuchlanish U yoki tok I ga faqat strelka (musbat yo'nalish) va unga mos keluvchi harfli belgilari qo'yiladi; ba'zi hollarda, agar shunday soddalashtirish tushunmovchiliklar tug'dirmasa, o'zgaruvchan tok generatorini “~” ishora bilan belgilab qo'yiladi.

5.2. Kompleks tekislikda potensial diagramma

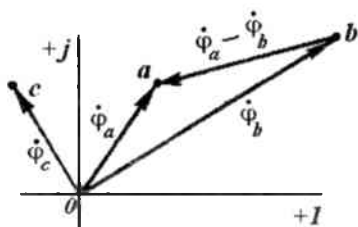
O'zgaruvchan tok zanjirining har bir $a, b, s, \dots$ nuqtalari potentsiallari $\vec{\varphi}_a, \vec{\varphi}_b, \vec{\varphi}_s, \dots$ kompleks qiymatlar bilan aniqlanadi, shuning uchun zanjirdagi potentsiallar taqsimotini kompleks tekisligida keltirish mumkin; bunda zanjirning har bir nuqtasini kompleks tekisligidagi ma'lum nuqta orqali ifodalanadi. Bundan shu malum bo'ladi, zanjirdagi ixtiyoriy ikki a va b nuqtalari orasidagi potentsiallar farqi, kompleks tekislikdagi a va b nuqtalarini birlashtiruvchi vektor bilan tasvirlashi ham mumkin ekan. Qabul qilingan qoidalarga muvofiq quyidagi vektor

$$\vec{U}_{ab} = \vec{\varphi}_a - \vec{\varphi}_b \quad (5.21)$$

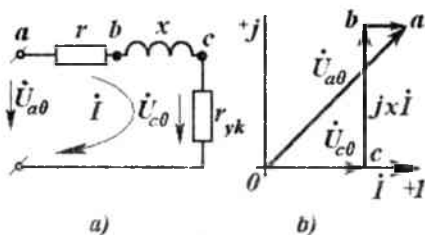
5.7-rasmda keltirilganidek, b nuqtadan a nuqta tomon yo'nalgan bo'ladi. Zanjirning har bir nuqtasiga kompleks tekisligida malum

nuqta mos kelishi tufayli qurilgan vektor diagrammasi, *topografik diagramma* deb ham ataladi.

Misol uchun, 5.8,a-rasmda keltirilgan sodda zanjir uchun topografik diagramma qurish yo'lini keltiramiz. Qarshiligi $r_{yuk}=20,0\Omega$ bo'lgan yuk tarmoqqa reaktiv qarshiligi $Z=5+j35\Omega$ bo'lgan induktiv g'altak orqali ulangan. Bu reaktiv element sxemada $r=5\Omega$ va $x=\omega L=35\Omega$ qarshiliklarni ketma-ket ulab ko'rsatilgan; zanjirdagi tok $I = 5\text{ A}$.



5.7-rasm. Topografik diagramma



5.8-rasm. Elektr zanjiriga topografik diagramma qurish.

Koordinata boshi potentsali nolga teng deb qabul qilib, s nuqtaning potentsiali 0 nuqta potentsalidan

$$\varphi_c - \varphi_0 = \varphi_c = I r_{y,k}$$

qiymatga yuqoriroq bo'lishini aniqlaymiz (qarshilikdagi tok potentsiali quyiroyq nuqtadan, potentsiali yuqoriroq nuqta tomon oqadi).

Tok I ning yo'nalishini ixtiyoriy [masalan, haqiqiy o'q yo'nalishida, ya'ni $\vec{I} = I$ (5.8-rasm)] tanlab olib, koordinata boshi ($\varphi_0 = 0$) dan shu yo'nalishda biror masshtabda $r_{y,k} \vec{I} = \vec{U}_{c,0}$ vektorni joylashtiramiz. Ushbu holatda $r_{y,k} \vec{I}$ vektorning uzunligi $5 \cdot 20 = 100\text{ V}$. Bu vektorning uchi s nuqtada bo'lib, φ_c potentsialni tasvirlamaydi (5.8,b-rasm). Shuni ma'lum qilish zarurki, diagrammani qurish 5.8,a-rasmdagi $r_{y,k} \vec{I}$ kuchlanishidan boshlab, *manba tomon davom ettirish* qulaydir.

Keyingi b nuqtaning potentsiali s nuqta potentsialidan jxI qiymatga balandroq joylashgan. Darhaqiqat, tokning qabul qilingan musbat yo'nalishi (5.8,a-rasm) uchun (b nuqtadan s nuqtaga) shu nuqtalar potentsiallari farqi $\dot{\varphi}_b - \dot{\varphi}_c = jxI$ yoki $\dot{\varphi}_b = \dot{\varphi}_c + jxI$ bo'ladi.

5.8,a-rasmdagi zanjir uchun $\dot{\varphi}_b = \dot{\varphi}_c + j35I$. Bundan ma'lum bo'ladiki, s nuqtadan tok vektoriga nisbatan $+\pi/2$ burchakka burilgan cb kesmani qurish kerak. Ushbu misolda $I = 5,0A$ bo'lgani uchun, cb kesma $175V$ ga teng bo'lgan kuchlanishga mos bo'lishi zarur. Bu kesmaning uchl zanjirda b nuqta bilan belgilangan nuqta potentsialini ifodalaydi.

Shunga o'xshash, b nuqtadan $rI = 25V$ kesmani joylashtiramiz va $\dot{\varphi}_a$ potentsialni tasvirlovchi a nuqtani aniqlaymiz.

Generator (manba) kuchlanishini (5.8,a-rasm) a va 0 nuqtalar potentsiallari farqi, ya'ni $\dot{U}_{a0} = \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_0$ ni tasvirlovchi topografik diagrammada 0 nuqtadan a nuqtaga (5.8,a-rasm) o'tkazilgan vektor sifatida tasvirlanadi. Bu kesmani o'lchasak, uning qiymati tanlangan masshtabda $214V$ ga mos ekan. Demak, zanjirda kuchlanish $214V$ bo'lganda tok $5A$ ga teng bo'lar ekan.

Aksariyat, misol sharti boshqacha qo'yiladi. Manbaning kuchlanishi va zanjir parametrlari berilgan bo'lib, tokning qiymatini aniqlanish kerak bo'ladi.

Proporsional qiymatlar usulimi qo'llaganda (§3.2), tokning ixtiyoriy qiymati I' ni tanlab, barcha diagrammani qurib, unga mos keluvchi kuchlanishni aniqlash mumkin. Haqiqiy kuchlanish $\dot{U}_{c0}$ ning diagramma yordamida aniqlangan kuchlanish $\dot{U}'_{c0}$ ga nisbatidan, ya'ni quyidagi nisbatdan

$$\eta = \dot{U}_{c0} / \dot{U}'_{c0} \quad (5.22)$$

tokning qiymatini aniqlash mumkin.

$$I = \eta \cdot I'. \quad (5.23)$$

O'zgarmas toklar zanjiridagidan farqli ravishda, hozirgi holatda koefitsiyent η kompleks sonidir. Demak, haqiqiy tok ixtiyoriy tanlangan tokdan, na faqat moduli bilan farqlanar ekan, balki argumenti bilan ham ajralib turar ekan.

Topografik diagramma qurishning hamma jarayoni juda sodda, faqat yodda tutish zarurki, doimo

$$\dot{\varphi}_m - \dot{\varphi}_n = \underline{Z}_{mn} \cdot \dot{I}_{mn}, \quad (5.24)$$

shuning uchun, agar shoxobchadagi $\underline{Z}_{mn}$ qarshilik toki m dan n ga musbat yo'nalgan deb qabul qilingan bo'lsa, u holda

$$\dot{\varphi}_m = \dot{\varphi}_n - \underline{Z}_{mn} \cdot \dot{I}_{mn}. \quad (5.25)$$

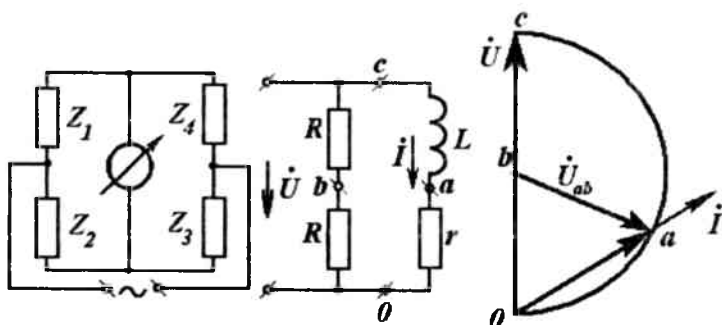
bo'ladi.

Topografik diagrammalar qurishning ikkinchi usulini o'rganishni o'quvchi uchun mustaqil bajarishga tavsiya etamiz.

Topografik diagrammalarni qurish ko'p foyda keltiradi; xususan, ko'pfazall zanjirlar nazariyasida hamda ko'priqli va kompensatsion sxemalarda va fazalarini o'zgartiruvchi sxemalarda keng qo'llaniladi.

O'lchov ko'priklari. O'zgaruvchan toklardagi kompleks qarshiliklarni o'lchash maqsadida ko'priksimon sxemalar ko'plab qo'llaniladi. Uiston ko'prigida, umumiy holda, to'rtta elkasida qarshiliklari (5.9-rasm) mavjuddir. Muvozanat holatiga kelgan ko'priqda quyidagi bog'lang'ich shart bajarilishi zarur.

$$\underline{Z}_1 / \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 / \underline{Z}_4 \quad (5.26)$$



5.9-rasm. Uiston ko'prigi.

Ushbu shart esa ikki mustaqil shartlarga bo'linadi.

$$\underline{z}_1 / \underline{z}_2 = \underline{z}_3 / \underline{z}_4, \varphi_1 / \varphi_2 = \varphi_3 / \varphi_4, \quad (5.27)$$

bunda, φ_n -tegishli kompleks qarshilikning argumenti.

Ikki mustaqil shartning mavjudligi qo'yilgan maqsadga muvofiqdir: agar berilgan uch $\underline{Z}_x$ qarshiliklar orqali to'rtinchi noma'lum kompleks qarshilikni aniqlash zarur bo'lsa, u holda biz ikki parametрни - modul hamda argumentni bilishimiz zarur.

Berilgan $\underline{Z}$ qiymatlar uchun ko'priк elklarining muvozanatiga erishish mumkin; buning uchun uch kompleks qarshiliklardan bittasini o'zgartirish (rostlash) yetarilmi, yoki hech bo'lmaganda, ulardan ikkitasini rostlash zarurmi; agar chastota qiymati o'zgarsa, berilgan ma'lum chastotada erishilgan muvozanat saqlanadimi? (5.27) tenglamani u yoki bu muayan shartlar uchun tahlil qilganimizda osonlik bilan yuqoridagi savollarga javob topamiz.

5.3. O'zgaruvchan tok zanjirida quvvat

Quvvatning oniy qiymati $p=u \cdot i$ va o'rtacha quvvat P tushunchalari qo'shimcha izohlar talab etmaydi. Yuqorida (4.79) keltirilganidek, oddiy garmonik tok bo'lganda aktiv quvvat quyidagicha aniqlanadi:

$$P = UI \cos \varphi = \operatorname{Re} \dot{U} \dot{I}, \quad (5.29)$$

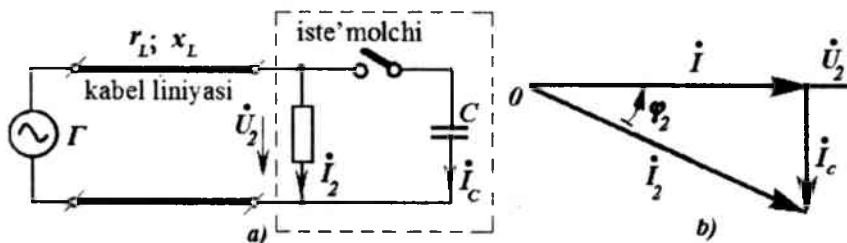
Bunda, $\varphi = (\psi_u - \psi_i)$ - tok va kuchlanish orasidagi *fazalar farqi* yoki tokning kuchlanishga nisbatan *kechikish fazasi* yoki *faza burchagi*; $\cos \varphi$ - *quvvat koeffitsiyenti* deb ataladi.

Zanjirlarni tahlil qilganda, quvvatga taalluqli bo'lgan boshqa tushunchalar ham ahamiyatlidir - bular to'la, reaktiv hamda kompleks quvvatlardir.

To'la quvvat. U kuchlanish va tokning effektiv (ta'sir etuvchi) qiymatlari ko'paytmasiga teng.

$$S = U \cdot I. \quad (5.30)$$

Faraz qilaylik, o'zgaruvchan tok generatori (G) iste'molchi bilan kabel liniyasi (qalin chiziq) orqali bog'langan (5.10, a-rasm).



5.10-rasm. O'zgaruvchan tok generatorini iste'molchi bilan kabel liniyasi orqali bog'lanishi.

Kabel liniyasi va generator uchun cheklangan (eng katta) kuchlanish izolyatsiyaning darajasi bilan chegaralanadi: tarmoq tizimi-ning elektrik mustahkamligi nuqtai nazaridan kuchlanishni nominal qiymati U_n dan yuqoriroq oshirish ruxsat etilmaydi. Tarmoq tizimidagi tokning eng katta qiymati, generator chulg'amlari, tarmoq simlari, kabel simlari qizib ketishining oldini olish uchun tokning nominal I_n qiymati bilan chegaralanadi. Ushbu ta'qiqlovchi cheklanishlar alohida kuchlanish hamda alohida tok uchun kiritiladi va, albatta, tok va kuchlanish fazalar burchagiga bog'liq emas. Nominal (joiz yoki ruxsat etilgan) kuchlanish va tok ko'paytmasi nominal (joiz) to'la quvvatni hosil qiladi.

$$S_N = U_N \cdot I_N. \quad (6.31)$$

To'la quvvatning (nominal S_N dan) ortiqroq bo'lishi taqiqlangan vaziyatda, kabel (tarmoq) orqali qanday o'rtacha quvvat uzatilishi mumkin? Bu qiymat tok va kuchlanish fazalari bilan aniqlanadi. O'z navbatida, faza farqi esa, tokning xarakteriga bog'liq. Masalan, tok induktiv xarakterda bo'lsa, iste'molchi toki I_2 kuchlanish U_2 dan fazasi bo'yicha φ_2 burchakka kechikadi. Bu holat uchun iste'mol qilinmayotgan foydali quvvat quyidagi qiymatdan

$$P_2 = U_N I_N \cdot \cos \varphi_2 = S_N \cos \varphi_2 \quad (5.32)$$

ortmasligi shart. Masalan, liniyaning oxirida tok va kuchlanishning nominal qiymatlari $U_N = 11,5 \text{ kV}$; $I_N = 200 \text{ A}$ va $\cos \varphi_1 = 0,8$ bo'lsin.

Bunday holatda iste'mol qilinayotgan quvvat

$$P_2 = 11500 \cdot 200 \cdot 0,8 = 2300 \cdot 10^3 \cdot 0,8 = 1840 \text{ kW} = 1,84 \text{ MW}$$

dan ortiq bo'lmashligi shart.

Quvvat koeffitsiyenti $\cos \varphi$, miqdori qanchalar kichik bo'lsa, istemol qilinayotgan quvvat shunchalar kam bo'ladi, chunki joiz to'la quvvat o'zgarmaydi.

Faza siljishini kompensatsiyalash. Keltirilgan 5.10,a– rasmda iste'molchiga parallel shunday qiymatdagi sig'imga ega bo'lgan kondensator ulaylikki, unda kabelning tok va kuchlanishi orasidagi faza φ_2 nolga teng bo'lsin, ya'ni quvvat koeffitsiyenti $\cos \varphi_2 = 1$ bo'lsin. Unda tarmoq orqali $P_2 = S_N$ to'la quvvat oqib o'tadi.

Bunda iste'molchining o'zidagi tok I_2 nominaldan ortiq bo'lishi mumkin, biroq liniyaning oxiridagi tok I nominal qiymatidan oshib ketmaydi.

Bayon qilingan fikrlarni 5.10,b–rasmdagi vektor diagrammasida tushuntirishni davom etish mumkin. Ko'rilayotgan sharoitda kondensator shoxobchasidagi tok $I_C = I_2 \sin \varphi_2$, tarmoq (kabel) oxiridagi tok esa $I = I_2 \cos \varphi_2$ ga teng.

$I_C = U_C \omega C$ bo'lgani uchun, ixtiyoriy berilgan shartlar uchun zarur bo'lgan qiymatdagi kondensatorni aniqlash oson.

Reaktiv quvvat. Bu kattalik tok va kuchlanish ta'sir etuvchi (effektiv) qiymatlari ko'paytmalarini ular orasidagi faza burchagining sinusiga ko'paytirilganiga teng:

$$Q = UI \sin \varphi = S \cdot \sin \varphi. \quad (5.33)$$

Eslatamiz, shartga ko'ra φ - induktiv tokning kuchlanishga nisbatan faza siljishi (kechikishi)dir. Kuchlanish $\vec{U}_L = j\omega L \vec{I}$ va $\sin \varphi = \sin \pi/2 = 1$ bo'lganligi uchun induktivlikning iste'mol qilayotgan reaktiv quvvati quyidagicha aniqlanadi:

$$Q = Q_L = U_L I = \omega L I^2 = \omega L I_m^2 / 2. \quad (5.34)$$

Sig'imdagi tok $\vec{I} = j\omega C \vec{U}_C$ kuchlanishdan $\varphi = \pi/2$ burchakka ilgarilashi sababli hamda $\sin \varphi = \sin(-\pi/2) = -1$ bo'lgani uchun, sig'imning reaktiv quvvati quyidagicha aniqlanadi:

$$Q = -Q_C = -U_C I = -\omega C U_C^2 = -\omega C U_{Cm}^2 / 2 \quad (5.35)$$

Reaktiv quvvatlarning ikkala (5.34) va (5.35) qiymatlari ma'lum fizik mazmunga ega; ularning qiymatlari mazkur element (L va S)larning maksimal maydon energiyalarini burchak chastotasiga ko'paytirilganiga teng. Shunday qilib, Q mazkur element

istemol qilayotgan reaktiv quvvatning maksimal oniy qiymatiga teng. Masalan, induktiv elementning magnit maydoni uchun

$$w_m = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} LI_m^2 \sin^2 \omega t;$$

$$p = dw_m / dt = \omega LI_m^2 \sin \omega t \cdot \cos \omega t = \frac{1}{2} \omega LI_m^2 \cdot \sin 2\omega t,$$

ya'ni

$$p_{\max} = \omega LI_m^2 / 2 = Q_L.$$

Reaktiv quvvatlarning (5.34) va (5.35) dagi ishoralari har xilligi ham fizik mazmunga ega. Buni faqat oddiy L va C li ketma-ket (yoki parallel) ulangan zanjirlarda ko'rish mumkin. Ikkala holda ham, biror elementning maksimal reaktiv quvvati iste'mol qilishni ikkinchisining maksimal reaktiv quvvati qaytarish oniga mos keladi: L va C lardagi reaktiv quvvat pulsatsiyasining bo'rchak siljishi π ga teng. Yuqorida keltirilgan faza siljishini kompensatsiyalash usuli aynan induktiv yukdagi reaktiv quvvat sig'imning reaktiv quvvati bilan kompensiyalashga asoslangan. Reaktiv quvvatlarning qay birini musbat, qay birini manfiy ishora bilan belgilash to'g'risidagi savol, mutlaqo shartlidir. Masalan, AQSh da Q ning ishorasini bizdagiga (Evropa va Osiyo) nisbatan teskari belgilash qabul qilingan.

Keltirilgan ta'riflashlardan shu ma'lum bo'ladiki, to'la quvvat — aktiv R va reaktiv Q quvvatlar kvadratiari yig'indisidan kvadrat ildiz chiqarilganiga teng.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ yoki } Q = \pm \sqrt{S^2 - P^2} \quad (5.36)$$

Kompleks quvvat. Bu qiymat kompleks kuchlanishning va tutash kompleks tokning ko'paytmalari bilan aniqlanadi

$$\dot{S} = \dot{U} I^* = P + jQ. \quad (5.37)$$

Bundagi haqiqiy qism o'rtacha (aktiv) quvvatga, mavhum qism esa reaktiv quvvatga teng. Komplekslar ko'paytmalarini yoyib chiqish orqali buni isbotlash mumkin. Agar, $\dot{U} = U \angle \psi_u$ va $\dot{I} = I \angle \psi_i$ bo'lsa, bunda

$$\dot{S} = \dot{U} I^* = U \angle \psi_u \cdot I \angle -\psi_i = U \cdot I (\cos \varphi + j \sin \varphi), \quad (5.38)$$

bunda, $\varphi = \psi_u - \psi_i$ — kuchlanish bilan tok orasidagi faza siljish burchagi.

Ma'lumki, quvvatning oniy va o'rtacha qiymatlari Vatlarda (W) yoki unga karrali [kilovatt (kW), megovatt (mW)], yoki Vattning

ulushlari [millivatt (mW), mikrovatt (μW) va h.k.] birliklarda o'lanadi; quvvatning boshqa turlari shartli birliklarda o'lanadi: to'la quvvat - Volt-Amper ($V \cdot A$). reaktiv quvvat - reaktiv Volt-Amper ($V \cdot Ar$) yoki unga karrali ($kV \cdot A$; $mV \cdot A$; $kV \cdot Ar$; $mV \cdot Ar$).

Elektr uzatish liniyalari va elektr manbalarining yuklanganligi na faqat aktiv quvvat bilan, balki to'la quvvat bilan ham aniqlanganligi uchun, elektr ta'minoti tizimlarida na faqat iste'molchining qabul qilib olgan energiya miqdori ($kW \cdot s$; $mW \cdot s$)

$$W_a = \int_0^t P dt, \quad (5.39)$$

qiziqtiradi, balki reaktiv quvvat bilan yuklanganligi yanada e'tiborli hisoblanadi.

$$W_p = \int_0^t Q dt. \quad (5.40)$$

Bu energiya «reaktiv energiyasi» deb ataladi va reaktiv kiloVolt-Amper-soat ($rkV \cdot Ar \cdot s$) yoki reaktiv megoVolt-Amper-soat ($rmV \cdot A \cdot s$) birliklarda o'lanadi.

Quvvatni kuchlanish va tokning aktiv va reaktiv tashkil etuvchilari orqali ifodalash. Kompleks tenglik (5.37) hamda aktiv va reaktiv tashkil etuvchilar tariflarini hisobga olgan holda quyidagicha ifodalash mumkin:

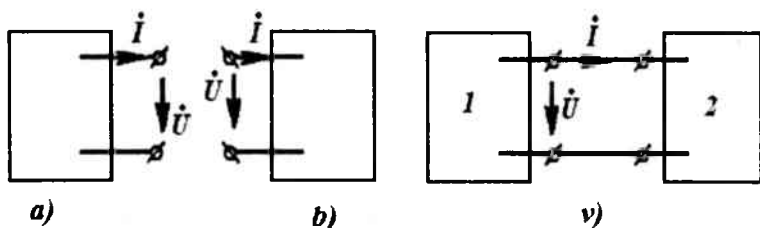
$$P = UI_a = U_a I \text{ va } Q = UI_p = U_p \cdot I. \quad (5.41)$$

Bir toifadagi tashkil etuvchilarning ko'paytmalari, masalan, $U_a I_a = UI \cos^2 \varphi$, fizik mazmunga ega emas, biroq ular yig'indilari to'la quvvatni ifodalaydi

$$U_a \cdot I_a + U_p \cdot I_p = S. \quad (5.42)$$

Qabul qilinayotgan va uzatilayotgan quvvat. Ixtiyoriy ikki qutblik bo'lganda (5.11-rasm) undagi qabul qilinayotgan (r_{qab}) va uzatilayotgan (r_{uzat}) quvvatlar haqida gapirish mumkin. Bunda doimo $r_{uzat} = -r_{qab}$ sharti bajariladi. 5.11,a-rasmda $p = ui$ - uzatiladigan va $p = -ui$ - qabul qilinadigan quvvat; 5.11,b-rasmda $p = ui$ - qabul qilinadigan va $p = -ui$ - uzatiladigan quvvat.

Bu tushunchalar oniy, kompleks, aktiv va reaktiv quvvatlarga xosdir. To'la quvvatga qolganda, tarifga ko'ra u har doim musbat ishora bilan belgilanadi.



5.11-rasm. Ikki qutblikda qabul qilinayotgan va uzatilayotgan quvvat.

Reaktiv quvvatning ishorasi na faqat quvvat uzatilayotgan yoki qabul qilinayotganiga bog'liq, balki musbat reaktiv (induktiv) quvvat yoki manfiy reaktiv (sig'im) quvvati ekanligiga ham bog'liq.

Shuning uchun ikki qutblik manfiy reaktiv quvvatni iste'mol qilayotgan bo'lsa, u musbat reaktiv quvvatni uzatayapdi deyish mumkin.

Misol. Bir juft ikki qutblikdan iborat bo'lgan zanjirda kuchlanish va tokning musbat yunalishlari 5.11,v-rasmdagidek qabul qilingan. Quyidagi kuchlanish va toklar qiymatlari uchun

$$A) \dot{U} = 100 + j100V; \dot{I} = 10 + j5A;$$

$$B) \dot{U} = 100 + j100V; \dot{I} = 20 - j60A.$$

birinchi ikkiqutblikdan uzatilayotgan va ikkinchi ikkiqutblik qabul qilayotgan kompleks quvvatlarni aniqlang.

Bundan tashqari, ushbu ikki qutubliklardan qaysi birini passiv deb qarashi mumkin va reaktiv qarshiliklarning xarakterini ($x < 0$ - sig'im; $x > 0$ - induktiv) aniqlang.

Yechish. Berilgan A shart uchun birinchi (5.11,v-rasm) ikki qutblikdan uzatilayotgan quvvat

$$S_{1uz} = \dot{U} \dot{I} = 1500 + j500.$$

Ikkinchi ikki qutblik ham shu quvvatni qabul qiladi ($S_{2qab} = S_{1uz}$).

Birinchi ikki qutblik tarkibida generator mavjud ekan, ikkinchi ikki qutblikni passiv deyish mumkin; uning qarshiligi induktiv xarakterga ega ($\varphi_2 > 0$).

Hisoblar natijasini avvalgi misol bilan solishtirsak, quvvatni aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarga ajratish imkoniyati borligiga ishonch hosil qilamiz.

Berilgan B shart uchun birinchi ikki qutublikdan uzatilayotgan quvvat $S_{\text{uz}} = \dot{U} \dot{I} = -4000 + j8000 \text{ VA}$, ya'ni ikkinchi ikki qutblik birinchisiga aktiv quvvat uzatayotganligi aniqlanadi. Passiv deb birinchi ikki qutblikni aytish mumkin, uning qarshiligi

$$\underline{Z}_1 = \dot{U} / (-\dot{I}) = 2,24 \angle -63^\circ 25' \Omega.$$

sig'im xarakteriga ega.

Birinchi ikki qutblik uzatayotgan reaktiv quvvat manfiydir, yoki boshqacha qilib aytganda - u musbat reaktiv quvvat uzatayapti.

Quvvat balansi (muvozanati). Energiyaning saqlanish qonuniga binoan, har qanday zanjir uchun ixtiyoriy onda quvvat balansi saqlanadi, ya'ni shu zanjirga uzatilayotgan barcha quvvatning oniy qiymati zanjirda iste'mol qilinayotgan barcha quvvatlar oniy qiymati (r) ga teng. Bundan esa quyidagi xulosa kelib chiqadi: zanjirga har xil manbalardan (generatorlardan) kelayotgan barcha o'rtacha quvvat, zanjirda iste'mol qilinayotgan barcha o'rtacha quvvatga teng.

Chiziqli zanjirda shunday balans reaktiv quvvat uchun ham bajariladi: zanjirning ayrim elementlaridan uzatilayotgan reaktiv quvvatlar yig'indisi, zanjirdagi boshqa elementlarning iste'mol qilayotgan reaktiv quvvatiari yig'indisiga teng.

Ushbu xulosa energiyaning saqlanish qonuniga asoslanmagan bo'lsa ham, uni quyidagicha isbotlash mumkin. Faraz qilaylik, ko'rilyotgan tizimda generator sifatida faqat tok manbalari xizmat qilayapti; bu farazni yetarli darajada umumiy deyish mumkin, chunki har qanday kuchlanish manbaini ekvivalent tok manbai deb qarash mumkin. Ilgarigidek, manbaning J_1 toki φ_1 potensialga ega bo'lgan ℓ tugunga oqadi, deb faraz qilamiz. Kirxgofning birinchi qonuniga asoslanib zanjirning barcha tugunlari uchun tenglamalar tizimini yozamiz, bunda ℓ tugundan biror p tugunga kelayotgan tokni « ℓn » indeks bilan belgilaymiz.

$$\dot{I}_{12} + \dot{I}_{13} + \dot{I}_{14} + \dots = \dot{J}_1;$$

$$\dot{I}_{21} + \dot{I}_{23} + \dot{I}_{24} + \dots = \dot{J}_2;$$

.....

Barcha toklarni ularning tutash qiymatlari orqali almashtirib hamda tenglikning har birini ushbu tugun potensialiga ko'paytirib, quyidagi tenglamalar tizimini hosil qilamiz.

$$\dot{\varphi}_1 \cdot (\dot{I}_{12} + \dot{I}_{13} + \dot{I}_{14} + \dots) = \dot{\varphi}_1 \dot{J}_1 = S_{1G};$$

$$\dot{\varphi}_2 \cdot (\dot{I}_{21} + \dot{I}_{23} + \dot{I}_{24} + \dots) = \dot{\varphi}_2 \dot{J}_2 = S_{2G};$$

.....

Ushbu tengliklarning o'ng tomonida birinchi S_{1G} , ikkinchi S_{2G} va h.k generatorlardan uzatilayotgan quvvatlar kompleksi mavjud. Bu tengliklarni qo'shib hamda $(\dot{I}_{lu} = \dot{I}_{ul})$ ekanini e'tiborga olib, quyidagi tenglamani hosil qilamiz.

$$\begin{aligned} & \dot{I}_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + \dot{I}_{13}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3) + \dots + \dot{I}_{23}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) + \\ & \dots + \dot{I}_{24}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_4) + \dots = \sum_i S_{iG} = S_G \end{aligned} \quad (5.43)$$

Tenglama chap tomonidagi har bir had, mazkur 12,13,... shoxobchalar istemol qilayotgan quvvatga teng.

$$S_{12} = \dot{I}_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) = \dot{I}_{12} \dot{U}_{12}; S_{13} = \dot{I}_{13} \dot{U}_{13} \dots,$$

o'ng tomoni esa har bir generatoridan keltirilayotgan quvvatlar yig'indisiga, ya'ni zanjirga tashqaridan kelayotgan barcha quvvatlar yig'indisiga teng.

$$S_G = S_{1G} + S_{2G} \dots$$

(5.43) tenglama kompleks quvvatning balansini ifodalaydi: zanjirdagi barcha iste'mol qilinayotgan quvvatlar yig'indisi $(S_{12} + S_{13} + \dots + S_{24} + \dots)$ unga barcha keltirilayotgan quvvatlar yig'indisi S_G ga teng, demak, reaktiv quvvatlar balansi ham

$$\sum Q_{in} = \sum Q_r. \quad (5.44)$$

Tarkibida Z qarshiligi bo'lgan shoxobchaniq iste'mol qilayotgan kompleks quvvatini Joule-Lens qonuniga o'xshash shaklda yozish ham mumkin.

$$S = \dot{U} \dot{I} = \dot{I} \underline{Z} \dot{I} = I^2 \underline{Z}.$$

Shuning uchun kompleks quvvatlar balansi, agar ixtiyoriy manbada tokning musbat yo'nalishini e.yu.k. yo'nalishi bilan mos keladi, deb hisoblansa, quyidagi tenglik bilan almashtirish mumkin bo'ladi

$$\sum \dot{E} \dot{I} = \sum I^2 \underline{Z}. \quad (5.45)$$

5.4. Energiyaning uzatilishi

Energiyani uzatishga qo'yiladigan talablar - signallarni uzatish bilan bog'liq bo'lgan telekommunikatsiya tizimlarida va energiya uzatishga mo'ljallangan elektr ta'minoti tizimlarida - bir biridan tubdan farq qiladi. Birinchisida signal manbadan, uning foydali ish koeffitsiyentiga (f.i.k.) e'tibor bermagan holda, imkon qadar maksimal quvvatni uzatishga xarakat qilinadi. Ikkinchisida, agar signalning chastotasi o'zgaruvchan bo'lsa, yoki uzatilayotgan signal tarkibida har xil chastotalar bo'lsa, u holda tizimning tahlilida ularning chastotaviy tavsiflari masalasi ko'riladi.

Elektr ta'minoti tizimlarida esa aksincha, f.i.k. haqidagi masala juda muhim bo'lib, chastota deyarli o'zgarmas qilib olinganligi sababli, uning energiya uzatish shartlariga ta'siri masalasi hech dolzarb emas. Iste'molchilar energiya ta'minotidagi kuchlanish qiymatining tebranishi bir necha foiz bilan cheklanganligi sababli, elektr ta'minoti tizimlarining tahlilida yukning o'zgarishida uning kuchlanishi qanday o'zgarishini bilish juda ahamiyatlidir.

Maksimal quvvatni uzatish shartlari. Ikki simli liniyada energiya uzatishni, aktiv ikki qutblikdan passiv ikki qutblikka (5.12,a-rasm) energiya uzatishga o'xshatib ko'rish mumkin. Bunda aktiv ikki qutblik biror EYK manbai E va ichki qarshiligi $\underline{Z}_s = R + jX$ ga ega bo'lgan ekvivalent generator sifatida, passiv ikki qutblik esa qarshiligi $\underline{Z}_n = r + jx$ ga teng shoxobcha sifatida ko'rilishi mumkin (5.12,b-rasm).

Iste'molchi olayotgan quvvat Joule-Lens qonuniga binoan

$$P = I^2 \cdot r, \quad (5.46)$$

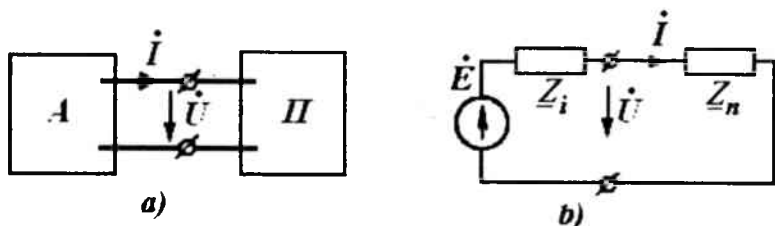
bunda,
$$I = \frac{E}{\sqrt{(r+R)^2 + (x+X)^2}} \quad (5.47)$$

Signalni uzatish tizimlarida, qabul qiluvchi imkon qadar maksimal aktiv quvvatni olishi uchun, manbaning berilgan ($E=\text{const}$, $\underline{Z}_i = \text{const}$) parametrlarida qabul qiluvchining qarshiligi qanday bo'lishi kerak, degan muammo turadi, ya'ni $R=R_{\max}$ bo'lgandagi r va x larning qiymatlari aniqlanishi talab etiladi. (5.46) va (5.47) tengliklardan yaqqol ko'rinadiki, $r = \text{const}$ bo'lganda tokning ortishi natijasida quvvat qiymati ortadi va

$$x = -X \quad (5.48)$$

bo'lganda maksimal qiymatiga erishadi.

Natijada o'zgarmas tok elektr zanjirlari nazariyasida keltirilganidek, $R=R_{\max}$ uchun quyidagi tenglikni hosil qilamiz.



5.12-rasm. Ikki simli liniyada energiya uzatish.

$$P = \frac{E^2 r}{(r+R)^2} \quad (5.49)$$

bunda, $r = R$ bo'lishi zarur. (5.50)

Bu (5.48) va (5.50) shartlarni kompleks shaklda bir bog'lanish yordamida ifodalaymiz.

$$\underline{Z}_{yk} = \underline{Z}_i \quad (5.51)$$

Ushbu shart bajarilganda iste'molchi qabul qilayotgan quvvat maksimal bo'ladi.

$$P_{\max} = E^2 / 4R \quad (5.52)$$

Qiymati shunga teng bo'lgan quvvat manbaning ichki qarishiligidagi sarf bo'ladi (chunki $r=R$). Shuning uchun tizimning f.i.k. 50% bo'ladi. Albatta, bunday kichik f.i.k. elektr ta'minoti tizimlarini mutlaqo qoniqtirmaydi.

Ularda, aksariyat, r ning qiymati R ga nisbatan ancha kichik bo'ladi.

Manba bilan iste'molchini muvofiqlash. Iste'molchining kirish qarshiligi va manbaning ichki qarshiligi tengligi shartiga *muvofiqlash sharti* deyiladi.

Agar maksimal quvvat uzatish sharti qo'yilgan, hamda qarshiliklar xarakteri kompleks tarzda bo'lsa, ularning tengligi (5.51) bog'lanishi bilan almashtiriladi. Ba'zan, fizik va konstruktiv sabablarga ko'ra, iste'molchining aktiv qarshiligini manba ichki aktiv qarshiligiga teng qilib olishning imkoniyati bulmaydi. Bunday hollarda, qo'shimcha reaktiv elementlar kiritib, hosil bo'lgan ikki qutublikning ichki qarshiliklarini $\underline{Z}_{kir} = r_{kir} + jx_{kir}$ muvofiqlash imkoniyati tug'ilishi mumkin ekan. Muvofiqlashtirish - manba bilan iste'molchi orasiga transformator kiritish bilan amalga oshirilishi mumkin.

Quyida qo'shimcha reaktiv element kiritib (5.13-rasm) muvofiqlash yo'lini ko'rsatamiz. Ikki reaktiv elementlar parametrlari (x_1 va x_2), hamda tanlangan sxemaga qarab, r_{kir} ning qiymatini r ga nisbatan yoki ortiq yoki kam olish mumkin.

Masalan, maksimal quvvat hosil qilish shartini quyidagicha yozib,

$$\underline{Z}_{kir} = R_{kir} + jX_i = Z_i = R - jX, \quad (5.53)$$

unda *ikki* mustaqil tenglama borligini ko'rami

$$k_{kir} = R \quad \text{va} \quad x_{kir} = X.$$

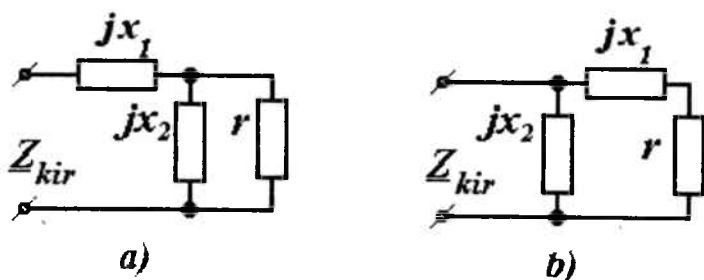
Tabiiyki, agar yechimlar haqiqiy qiymatlar bo'lishiga olib kelsa, yuqoridagi shartlarni x_1 va x_2 parametrlarni tegishli ravishda tanlash yo'li bilan ta'minlash mumkin.

R , X va r qiymatlari berilgan deb faraz qilib, 5.13-rasmda keltirilgan ikki sxema uchun izlangan x_1 va x_2 qiymatlarni aniqlaymiz. 5.13,a -rasmdagi sxema uchun kirish qarshiligi

$$\underline{Z}_{kir} = r_{kir} + jx_{kir} = jx_1 + jx_2 r / (r + jx_2) = j \left(x_1 + \frac{x_2 \cdot r^2}{r^2 + x_2^2} \right) + \frac{x_2^2 r}{r^2 + x_2^2}.$$

Yechim haqiqiy qismini manbaning berilgan qarshiligiga tenglashtirib

$$r_{kir} = x_2^2 r / (r^2 + x_2^2) = R. \quad (5.54)$$



5.13-rasm. Manba bilan iste'molchini muvofiqlash.

quyidagini aniqlaymiz:

$$x_2 = \pm r \sqrt{R/(r-R)}. \quad (5.55)$$

Izlanayotgan yechim faqat $r > R$ bo'lgandagina mavjuddir. Bunda 2 indeksli shoxobchaga yoki induktivlik (agar yechim ildizi oldida plus ishora bo'lsa ($x_2 > 0$) yoki sig'im (agar yechim ildizi oldida minus ishora olinsa $x_2 < 0$) kiritiladi.

Kirish qarshiligining mavhum qismi ishorasini manba induktiv qarshiligi ($-x$)ning teskari ishorasiga tenglashtirib, quyidagini hosil qilamiz.

$$x_1 = -\left[X + \frac{x_2 r^2}{r^2 + x_2^2}\right].$$

Bunga (5.55) dan x_2 ni qo'yib, oddiy o'zgartirishlardan so'ng quyidagini hosil qilamiz.

$$x_1 = -[X \pm \sqrt{R(r-R)}]. \quad (5.56)$$

Bu bog'lanishda ildiz oldi ishoralarining yuqorisidagi tanlangan x_2 ning musbat ishorasiga mos keladi.

Shunga e'tibor berish lozimki, faqat $r > R$ bo'lgandagina x_1 haqiqiy (musbat yoki manfiy) son bo'ladi.

5.13,b-rasmdagi sxema uchun ham bog'lanishlar shu usulda keltirib chiqariladi.

$$x_1 = \pm \sqrt{r[X^2/R + (R-r)]} \quad (5.57)$$

$$x_2 = (Xr + Rx_1)/(R-r). \quad (5.58)$$

Bu bog'lanishlardan ko'ramizki, 5.13,b-rasmdagi sxema uchun faqatgina

$$r < R + X^2 / R \quad (5.59)$$

bo'lgandagina yechim mavjud ekan.

Kuchlanish chastotasi o'zgarishi bilan muvofiqlashtirish uchun kiritilayotgan L va C qiymatлари ham o'zgaradi.

Misol. Berilgan $Z_1 = R + jX = 600 + j800 \, \Omega$ va $r = 1200 \, \Omega$ qarshiliklarni 5.13,a-rasm zanjiriga kiritib, iste'molchi va manbani muvofiqlash uchun reaktiv qarshilikni tanlang.

Yechish. 5.13,a-rasmdagi zanjir uchun keltirib chiqarilgan ifodalardan foydalanib quyidagilarni aniqlaymiz: $x_2 = \pm 1200 \, \Omega$ va $x_1 = -(800 \pm 600) \, \Omega$.

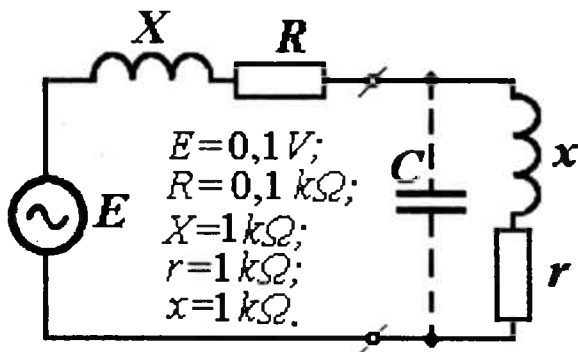
Qarshilik x_1 ning birinchi $x_1 = -1400 \, \Omega$ qiymati 2-shoxobchadagi induktivlikka ($x_2 = 1200 \, \Omega$) mos keladi; x_1 ning ikkinchi qiymati $x_1 = -200$ esa 2-shoxobchadagi sig'imga mos keladi ($x_2 = -1200 \, \Omega$).

Signal hosil qiluvchi manbaining yukini kamaytirish. Aksariyat muvofiqlash masalasi boshqacha tarzda qo'yiladi: manbanning yuklanishi imkoni boricha kamaytirish zarur; biroq, buning natijasida istemolchining (yuklanishning) istemol qilgan quvvati kamaymasligi zarur. Masalan, tarkibida kichik quvvatli signal manbai bo'lganda shunday shart qo'yiladi. Manba va iste'molchida katta induktivlik bo'lgan holatda eng sinalgan va oddiy usul yaxshi natijalar beradi. Bu usulning mohiyati shundaki, unda yukka parallel S sig'im ulanadi (5.14-rasm), natijada yukning kirish qarshiligi keskin ortadi. Bunda sig'im qiymati shunday tanlanadiki, iste'molchining to'liq kirish qarshiligi faqat aktiv tashkil etuvchiga ega bo'lishigacha erishiladi.

Keltirilgan usul barcha yirik korxonalar va energetika tizimlarida quvvat koeffitsiyenti sos ϕ ni oshirish uchun qo'llaniladi.

Misol. 5.14-rasmda manba va iste'molchi ko'rsatilgan. Ular parametrlarining qiymatlari sxema ostida keltirilgan.

Manbanning toki va iste'molchining olayotgan quvvati quyidagi holatlar uchun aniqlansin: a) punktir chiziq bilan belgilangan sig'im S uzilgan; b) sig'im S mavjud va ikki parallel shoxobchalar umumiy reaktiv o'tkazuvchanliklari nolga teng.



5.14-rasm. Manba va iste'molchi.

Yechish. a) sig'im ulanmagan holatda zanjirning toki quyidagiga teng edi: $I' = E / \sqrt{(R+r)^2 + (X+x)^2} = 49,7 \mu A$, iste'molchining iste'mol qilayotgan quvvati $P' = (I')^2 \cdot r = 0,248 \mu W$ bo'ladi;

b) umumiy reaktiv o'tkazuvchanlik nolga teng bo'lishi uchun zarur bo'lgan sig'imning qiymati quyidagi tenglikdan aniqlanadi.

$$\omega C = -\operatorname{Im}\left(\frac{1}{r + jx}\right) = \frac{x}{(r^2 + x^2)}$$

Bunda ikki parallel shoxobchalarning qarshiliklari

$$r = (r^2 + x^2) / r \approx 10,1 k\Omega.$$

Manbaning toki

$$I = E / \sqrt{(R+r_{br})^2 + X^2} = 9,75 \mu A.$$

Yuklanishning iste'mol qilayotgan quvvati $P' = (I')^2 \cdot r = 0,248 \mu W$.

Energiyani uzatish uchun mo'ljallangan zanjirlar. Soddalashtirilgan holatda mazkur zanjirning tarkihiga U_1 kuchlanishli manba, $\underline{Z}_{jk}$ qarshilikli iste'molchi bilan $\underline{Z}_L$ qarshiligi bo'lgan bog'lovchi liniya kiradi.

Agar manba kuchlanishi $\dot{U}_1$, hamda $\underline{Z}_L$ va $\underline{Z}_{jkL}$ qarshiliklar berilgan bo'lsa, zanjirning umumiy tokini

$$\dot{I} = \dot{U}_1 / (\underline{Z}_L + \underline{Z}_{jk}), \quad (5.60)$$

hamda iste'molchining kuchlanishini $\dot{U}_2$ ni aniqlash mumkin.

$$\dot{U}_2 = \dot{I} Z_{jk} = \dot{U}_1 Z_{jk} / (\dot{U}_1 + Z_{jk}). \quad (5.61)$$

Bunda iste'molchining tortayotgan quvvati

$$S_2 = \dot{U}_2 \dot{I} = P_2 + jQ_2 = I^2 Z_{jk}. \quad (5.62)$$

Manbaning uzatayotgan quvvati esa

$$S_1 = \dot{U}_1 \dot{I} = P_1 + jQ_1 = S_2 + I^2 Z_1. \quad (5.63)$$

Ko'rilayotgan zanjirning foydali ish ko'effitsiyenti

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + I^2 r_1). \quad (5.64)$$

Keltirilgan bog'lanishlardan foydalanib, boshqa berilgan qiymatlar U_2 , P_2 , Q_2 , Z_L uchun ham zanjirning ishlash rejimini aniqlash mumkin. Bunda (5.62) dan ma'lum bo'ladiki,

$$\dot{I} = S / \dot{U}_2 = P_2 / \dot{U}_2 - jQ_2 / \dot{U}_2 \quad (5.65)$$

va manbaning kuchlanishi

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{I} Z_1. \quad (5.66)$$

Tokning qiymati na faqat iste'molchining aktiv quvvatiga, balki uning reaktiv quvvatiga ham, boshqacha qilib aytganda, uning quvvat ko'effitsiyenti $\cos \varphi_2$ ga bog'liq ekan; tokning moduli

$$I = P_2 / U_2 \cos \varphi_2. \quad (5.67)$$

Ushbu qiymatni (5.64) ga qo'ysak, quvvat uzatishdagi f.i.k.ni hisoblashning eng sodda bog'lanishini keltirib chiqaramiz.

$$\eta = \frac{1}{1 + P_2 r_1 / U_2^2 \cos \varphi_2}. \quad (5.68)$$

Bundan ma'lum bo'ladiki, iste'molchining kuchlanishi va $\cos \varphi_2$ ning ortishi bilan uning f.i.k. ortar ekan, bundan ko'ra aniqroq qilib aytganda, liniya oxiridagi kuchlanishning aktiv tashkil etuvchisi ortsa, iste'molchining f.i.k. ham ortar ekan.

Agar $U_{2a} = \text{const}$ bo'lsayu, biroq uzatilayotgan quvvat ortsa, f.i.k. ning qiymatini ilgarigidek holatda saqlash uchun liniyaning aktiv qarshiligini kamaytirish zarur. (5.68) bog'lanish f.i.k. ning katta bo'lishi uchun liniya kuchlanishini oshirish nechog'lik muhim ekanini ko'rsatadi. Kuchlanishni, masalan, 6,3 kV dan 110 kVga (17,5 marta) kuchaytirib uzatilsa, f.i.k.ning o'zgarmas qiymatida liniya qarshiligini 10 marta oshirish (yoki simning kesim yuzasini

kamaytirish) va uzatilayotgan quvvatni 30 marta kuchaytirish mumkin.

Kuchlanish pasayuvi va yo'qotilishi. Liniyaning toki bilan kompleks qarshiligi ma'lum bo'lsa, unda kuchlanish pasayuvini aniqlash mushkul ish emas.

$$\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{I} \underline{Z}_L \quad (5.69)$$

Biroq, iste'molchi nuqtai nazaridan olganda, berilgan kuchlanish va tizim parametrlarida, liniya oxiridagi kuchlanish U_2 ning modulini aniqlash zarur. Boshqacha qilib aytganda, liniya boshi va oxiridagi kuchlanishlar modullarining ayirmasi

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (5.70)$$

yani *kuchlanish pasayuvini* aniqlash ahamiyatlidir.

Umumiy holda, ayirmaning moduli (kuchlash pasayuvi moduli) modullar ayirmasiga teng emas.

Faraz qilaylik $\dot{U}_2 = U_2 e^{\theta} = U_2$, ya'ni kompleks kuchlanish tarkibida faqat haqiqiy qiymat mavjud (mavhum had nolga teng) va $\varphi_2 > 0$

bo'lsin. Bu holatda $\dot{I} = I_a + jI_r = I_a - jI_r$ (5.6, a-rasmga qarang) va

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 + \dot{I} \underline{Z}_L = \dot{U}_2 + (I_a - jI_r)(r_L + jx_L) = \\ &= U_2 + I_a r_L + I_r \cdot x_L + j(I_a x_L - I_r r_L) \end{aligned}$$

Modulning qiymatini haqiqiy va mavhum qismlar kvadratlari yig'indisidan kvadrat ildiz chiqarilganiga teng deb hisoblab,

$\left(\frac{x_L I_a - r_L \cdot I_r}{U_2 + r_L I_a + x_L I_r} \right)^2 < 0,002$ bo'lganda 1% aniqlik bilan hisoblaymiz.

$$U_1 \approx U_2 + I_a r_L + I_r x_L \quad (5.71)$$

Ushbu sharoitda

$$\Delta U = U_1 - U_2 \approx r_L I_a + x_L I_r \quad (5.72)$$

deb hisoblash mumkin.

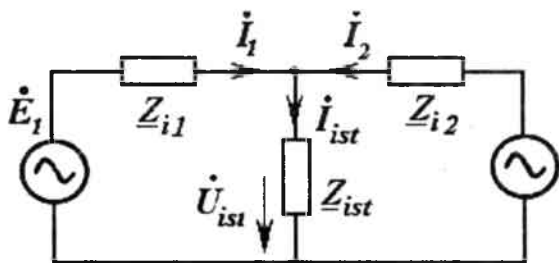
Yuqoridagi mulohazalardan ko'rinadiki, berilgan liniya va yuklanishda liniya oxiridagi kuchlanishlar pasayuvini reaktiv quvvat yordamida ma'lum chegaralarda boshqarish mumkin ekan.

Ikki manbali zanjir. Telekommunikatsiya korxonalarini elektr energiyasi bilan ta'minlash tizimlarida, aksariyat, bir necha manba qatnashadi.

Soddalashtirilgan (5.15-rasm) zanjirda $\underline{Z}_{ist}$ iste'molchi bilan kuchlanishi $\dot{E}_1$, $\dot{E}_2$ va ichki qarshiliklari $\underline{Z}_{i1}$, $\underline{Z}_{i2}$ bo'lgan manbalar ulangan. Bu qarshiliklar qiymatlari liniyalar va generatorlarning ichki qarshiliklarini o'z ichiga oladi. Bunday tizimning rejimi nafaqat e.yu.k.lar qiymatlari bilan, balki ular orasidagi fazalar farqi bilan ham aniqlanadi.

O'zgaruvchan tok zanjiridagi ikki manbaning ichki qarshiliklari tarkibida reaktiv elementlarning mavjudligi, shunga o'xshash bo'lgan o'zgarmas tok zanjiridan tubdan farq qiladi. O'zgarmas tok zanjirida bir manba e.yu.k.ning ortishi, u tomonidan uzatilayotgan quvvatning ulushiga ta'sir etadi, holos. Agar o'zgarmas tok manbasining e.yu.k. qiymati iste'molchi kuchlanishidan kichik bo'lsa, u uzatayotgan quvvat manfiy ishorada bo'ladi, ya'ni manba iste'molchiga aylanadi (akkumulyatorni zaryadlayotgan generator akkumulyatordan quvvat olayotgan motorga aylangani kabi).

O'zgaruvchan tok zanjirida manbalardan birining e.yu.k. qiymati ortishi, u uzatayotgan quvvatning ortishiga olib kelishi shart emas. U reaktiv quvvat ishlab chiqarishga olib kelishi mumkin, holos. Uzatilayotgan quvvatning qiymati e.yu.k.ning faza burchagi o'zgarishiga qo'pdan bog'liqdir.



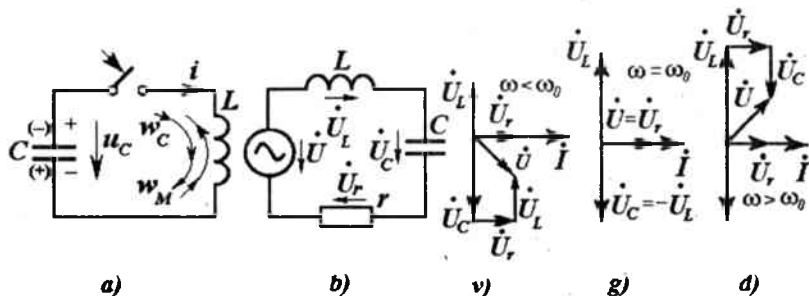
5.15-rasm. Ikki manbali zanjir.

6. REZONANS, CHASTOTAVIY TAVSIF VA UZATISH FUNKSIYASI

6.1. Elektr zanjirlarida rezonans hodisalarining tahlili

Rezonans hodisasi oldingi mavzularda qisqacha bayonda berilgan edi. Ushbu bobda uni batafsil fizik jarayonlar va matematik tahlil yordamida o'rganamiz.

O'zgaruvchan tok zanjirlari tarkibida induktivlik bilan sig'im bo'lgan holatda ularni o'rganish alohida qiziqish uyg'otadi. Chunki ma'lum shartlar bajarilganda L va C elementlari tebranma kontur hosil qilishi ayon. Masalan, sig'imi oldindan zaryadlangan L - C konturda (6.1,a-rasm) kalit ulanishi bilan garmonik tebranishlar hosil bo'ladi. Rasmda tanlangan musbat tok yo'nalishi sig'imning razryadlanishiga $i = -C du_C/dt$ mos keladi. Bu tok oqimi yordamida sig'imdagi zahiralangan elektr maydoni energiyasi $w_C = Cu^2/2$ induktivlik L ga o'tadi va unda magnit energiyasi $w_M = Li^2/2$ ga aylanadi. Induktivlikda magmit maydon energiyasi maksimum qiyamatiga erishib, sig'imga tokning shu yo'nalishida energiya qaytariladi va S teskari ishora bilan zaryadlanadi (6.1,a-rasm qavs ichidagi ishoralar). Sig'im energiyasi maksimal qiymatiga erishgach,



6.1-rasm. L - C konturda garmonik tebranishlar.

u energiyani tokning avvalgi yo'nallishiga teskari yo'nallishda induktivlikka qaytaradi. L da energiya maksimal qiymatga erishgach, shu tok yo'nalishida energiya C ga yana qaytariladi va kondensator dastlabki ishoralar bilan qayta zaryadlanadi (6.1.a-rasm qavssiz ishoralar). Shu tarzda $L-C$ konturda tebranishlar hosil bo'ladi. Ideal - rezistorsiz ($r=0$, ya'ni isrofsiz) zanjir bo'lsa «so'nmas» tebranishlar davom etaveradi. Konturda rezistor mavjud bo'lganda ($r \neq 0$) L va C orasidagi energiya almashinuvi natijasida rezistordan tok oqib o'tadi va unda $I^2 r$ quvvat isrofini hosil qiladi; tebranishlar esa so'nuvchi bo'ladi. Konturdagi energiya almashinuvi tebranishlari chastotasi faqat sig'im va induktivlik qiymatlariga bog'liq.

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}.$$

Agar konturni garmonik kuchlanishlar manbaiga ulansa, u holda energiya almashinuvidagi $I^2 r$ isroflar manbadan kelayotgan energiyadan olinadi; bunda tebranishlar chastotasi manba tokining chastotasiga teng bo'lishi ham mumkin.

$$\omega = \omega_0.$$

Rezonans hodisasi bir necha hil ta'riflanishi mumkin. Bu ta'riflardan biri C va L elementlarga ega bo'lgan passiv ikki qutblikning kirish qismida kuchlanish fazasi φ_u va tok fazasi φ_i mos (teng), ya'ni $\varphi_u - \varphi_i = \varphi = 0$ bo'lsa, rezonans hodisasi mavjud bo'ladi; bunda mazkur ikki qutblik tashqaridan reaktiv quvvat olmaydi ($\varphi = 0$). Bunday rezonans energetik yoki faza rezonansi deyiladi. Rezonansning bunday ta'rifi elektrotexnikada keng qo'llaniladi.

Ikkinchi ta'rif axborot texnologiyalari sohalariga ko'proq mos keladi. Unga ko'ra, rezonans hodisasi C va L passiv elementlari bo'lgan zanjirga tashqaridan berilayotgan kuchlanish yoki tokning burchak chastotasi ω zanjirning xususiy (rezonans) chastotasi ω_0 ga teng bo'lganda kuzatiladi. Bunday rezonans radiotexnik (to'lqin) rezonansi deb ataladi. Ushbu ikki hil ta'riflanayotgan hodisa aslida yagona fizik jarayondir, ya'ni $\varphi_u - \varphi_i = \varphi = 0$ bo'lganda $\omega = \omega_0$ kuzatiladi.

6.2. Kuchlanishlar rezonansi

Zanjirda L , r , C elementlar ketma-ket (6.1,b-rasm) ulangandagi rezonans shunday nomlanadi.

Ushbu ketma-ket ulangan zanjirdagi tok quyidagicha aniqlanadi.

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{r + j(x_L - x_C)} = \frac{\dot{U}}{r + jx}, \quad (6.1, a)$$

$$\text{yoki} \quad I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}}, \quad (6.1, b)$$

$$\text{bunda,} \quad x = x_L - x_C = \omega L - 1/\omega C.$$

Rezonans bo'lganda manba kuchlanishining burchak chastotasi xususiyl burchak chastotasiga teng bo'ladi

$$\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}, \quad (6.2)$$

va passiv elementlarning toki o'zining maksimal qiymatiga erishadi.

$$I_{\max} = U/r, \quad (6.3)$$

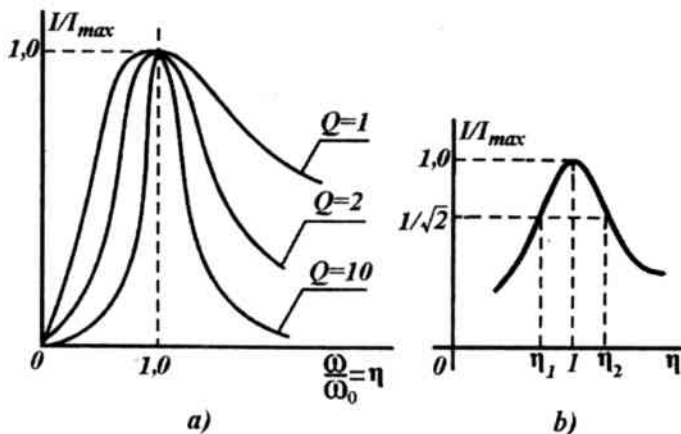
bunda, $x = 0$ bo'lganligi uchun *kirishdagi kuchlanish va tok fazalari teng* $\varphi_u = \varphi_i$ (yoki *mos*) *bo'ladi*. Bu holat uchun 6.1, g-rasmda sxemaning vektor diagrammasi tasvirlangan. Tenglik (6.3) dan shuni anglash mumkinki, rezonansga erishish uchun ikki usuldan birini qo'llash mumkin ekan: yoki manba kuchlanishining chastotasi ω ni yoki kontur L va C parametrlaridan biri (x_L va x_C , ya'ni xususiyl chastota ω_0) ning qiymatlarini o'zgartirish zarur ekan.

Tok I , kuchlanish U_L yoki U_C larning ω , L yoki C ga bog'liqligi rezonans funksiyalari deyiladi. Ushbu funksiyalarning nisbiyl chastota orqali ifodalari ko'proq qo'llaniladi.

$$\eta = \omega/\omega_0 = \omega\sqrt{LC}, \quad (6.4)$$

Rezonans konturining muhim parametrlaridan bir – Q asllikdir. *Asllik deb, reaktiv elementlardan biri qarshiligining (ya'ni $\omega_0 L$ yoki $1/\omega_0 C$) , unga ketma-ket ulangan aktiv qarshilikka nisbatiga aytiladi.*

$$Q = \omega_0 L / r = 1/(\omega_0 C r) = \rho / r. \quad (6.5)$$



6.2-rasm. Rezonans egri chiziqlari.

Ushbu tenglikning suratida konturning tavsifiy qarshiligi ρ keltirilgan. Uning qiymati

$$\rho = \sqrt{L/C}. \quad (6.6)$$

Berilgan kontur rezonans funksiyalarining nisbiy birlikdagi ko'rinishlari uning aslligiga bog'liqdir (6.2,a-rasm). Biroq bu bog'lanishlar masalaning mohiyatini ($\omega = \omega_0$ bo'lganda tokning maksimum I_{max} ga erishishini) ko'rsatgani bilan, I_{max} ning absolyut qiymati qanday o'zgarishini aniqlamaydi. Shuning uchun, $I(\omega)$ bog'lanishda tokni absolyut qiymatda oladigan bo'lsak, Q ning katta qiymatlarida va $\omega \neq \omega_0$ da I ning qiymati birnecha amporni tashkil etsa ham, $\omega = \omega_0$ bo'lgandagi I_{max} ning qiymati o'nlab, ba'zan esa yuzlab ampergacha yetishini ko'rish mumkin.

Tenglik (6.1,b) ga o'zgaruvchan η va Q parametrni kiritsak, tokning umumlashtirilgan rezonans funksiyasini aniqlaymiz.

$$I = \frac{U}{r \sqrt{1 + \frac{1}{r^2} (\eta \omega_0 L - 1 / \eta \omega_0 C)^2}} = \frac{I_{max}}{\sqrt{1 + Q^2 (\eta - 1/\eta)^2}}. \quad (6.7)$$

Hosil bo'lgan tenglik hamda 6.2,a- va 6.2,b-rasmlarda keltirilgan bog'lanishlardan shuni anglash mukinki, konturning aslligi qanchalar katta bo'lsa, tokning rezonans egri chizig'i shunchalar tik bo'ladi va I_{max} shunchalar katta bo'ladi.

Rezonans konturining yana bir muhim qiymatlaridan biri, rezonans funksiyasi kengligi yoki konturning uzatish kengligi deb nomlangan $\Delta\eta$ kattaligidir. U tokning qiymati $I_{max}/\sqrt{2}$ bo'lgandagi η_2 va η_1 chastotalar farqiga teng (6.2, b-rasmi). Bunda konturning kompleks qarshiligi rezonansdagi $Z_{min} = r$ minimal qarshilikka nisbatan $\sqrt{2}$ marta katta bo'ladi.

Tenglik (6.7) dan $I_{max}/I = \sqrt{2}$ deb hisoblab η_1 va η_2 larning qiymatlarini aniqlaymiz.

$$\sqrt{2} = \sqrt{1 + Q^2 (\eta_{1,2} - 1/\eta_{1,2})^2} \quad \text{yoki} \\ 1 = \pm Q (\eta_{1,2} - 1/\eta_{1,2}) \quad (6.8)$$

bundagi musbat ishora η_2 ning qiymatiga, manfiy ishora esa η_1 qiymatiga mos keladi. Shunday qilib,

$$\eta_2 - 1/\eta_2 = 1/Q \quad \text{va} \quad \eta_1 - 1/\eta_1 = -1/Q. \quad (6.9)$$

Bu qiymatlarning yig'indisini hisoblab, quyidagini aniqlaymiz:

$$\eta_1 + \eta_2 - (\eta_1 + \eta_2)\eta_1\eta_2 = 0 \\ \text{undan} \quad \eta_1 \cdot \eta_2 = 1 \quad \text{yoki} \quad \omega_0 = \sqrt{\omega_1\omega_2} \quad (6.10)$$

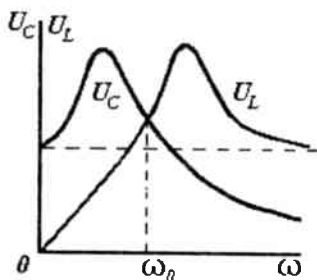
ekanligi ma'lum bo'ladi. Demak, rezonans chastotasi ω_0 uzatish kengligi chegaraviy chastotalarining o'rtacha geometrik qiymatiga teng.

Rezonans chastotasi ω_0 ni tajriba usuli bilan ham aniqlash mumkin. Buning uchun ω ning qiymatini o'zgartirib, tokning maksimal qiymatiga mos kelgan $\omega = \omega_0$ ni aniqlash kifoyadir. Biroq tajribalar shuni ko'rsatadiki, avval ω_1 va ω_2 (η_1 va η_2) chegaraviy chastotalarni o'lchab olib (bu qiymatlar orasida tok keskin o'zgarishini kuzatish mumkin), so'ngra (6.10) dagi o'rtacha geometrik qiymat orqali hisoblash aniqroq natija beradi.

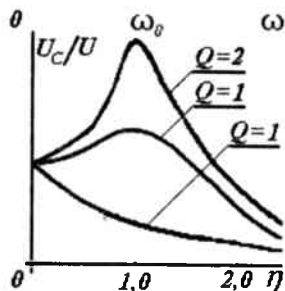
Yuqoridagi (6.9) tengliklarning ikkinchisini birinchisidan ayirsak, quyidagilarni aniqlash mumkin.

$$\eta_2 - \eta_1 + (\eta_2 - \eta_1)/\eta_1\eta_2 = 2Q \\ \text{yoki} \quad \eta_2 + \eta_1 = \Delta\eta = 1/Q. \quad (6.11)$$

Bu shunday xulosaga olib keladi: rezonans funksiyasining kengligi kontur aslligiga teskari bo'lgan qiymatga teng; demak, rezonans funksiyasi shakli orqali uning aslligini aniqlash mumkin ekan.



a)



b)

6.3-rasm. Rezonansni chastotaviy tavsifi.

Induktivlik va sig'imdagi kuchlanishning chastotaga bog'liqligi quyidagicha ifodalanadi.

$$U_L = \omega LI = \frac{\omega LU}{\sqrt{r^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}, \quad (6.12)$$

$$U_C = \frac{I}{\omega C} = \frac{U}{\omega C \sqrt{r^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}, \quad (6.13)$$

yoki nisbiy chastota η ni kiritib hamda (6.5) ni e'tiborga olib, quyidagilarni aniqlaymiz.

$$U_L = \eta \omega_0 LI = \frac{\eta Q}{\sqrt{1 + Q^2(\eta - 1/\eta)^2}} \cdot U = \frac{\eta Q}{\sqrt{1 + Q^2 \alpha^2}} \cdot U, \quad (6.14)$$

$$U_C = \frac{1}{\eta \omega_0 C} I = \frac{Q}{\eta \sqrt{1 + Q^2(\eta - 1/\eta)^2}} \cdot U = \frac{Q}{\eta \sqrt{1 + Q^2 \alpha^2}} U, \quad (6.15)$$

bunda, $\alpha = (\eta - 1/\eta)$ – konturda rezonansdan uzoqlashish darajasini ko'rsatuvchi parametr. Uni boshqacha ifodalash ham mumkin.

$$\xi = (\omega^2 - \omega_0^2) / \omega^2 = \alpha / \eta = \alpha \omega_0 / \omega.$$

Rezonans funksiyalari $U_L = f(\omega)$ va $U_C = f(\omega)$ 6.4,a-rasmda keltirilgan. Birinchisi (agar $Q > 1/\sqrt{2}$ bo'lsa) ω_0 ga nisbatan yuqoriroq chastotada maksimumga erishadi, chunki ω (6.12.) ifodaning suratida joylashgan, ikkinchisi - ω_0 dan quyiroyq chastotada maksimumga erishadi, chunki ω (6.13) ifodaning maxrajida joylashgan. Ushbu chastotalarning qiymatlarini mazkur funksiyalar maksimumlari orqali aniqlash mumkin.

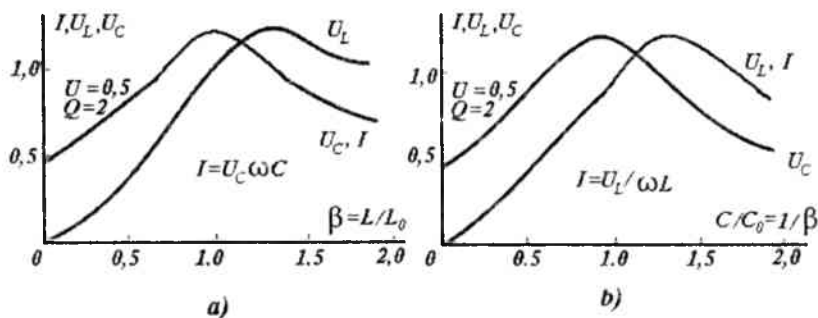
$$\eta_L = \frac{1}{\sqrt{1-1/2Q^2}}, \quad \eta_C = \sqrt{1-1/2Q^2}, \quad (6.16)$$

bunda, η_L va η_C - (6.14) va (6.15) qiymatlar maksimumiga mos keluvchi nisbiy chastotalar.

Bu kuchlanishlarning maksimal qiymatlari bir hil va quyidagicha aniqlanadi.

$$U_{L,\max} = U_{C,\max} = \frac{Q}{\sqrt{1-1/4Q^2}} \cdot U. \quad (6.17)$$

Agar rezonans vaqtida $x_L = x_C \gg R$ yoki $I x_L = I x_C \gg IR$, $U_L = U_C \gg U_R = U$ dan ayirilishi mumkin va ketma-ket tebranish konturida kuchlanishlar rezonansi bo'ladi. Sababi reaktiv elementlardagi kuchlanishlar zanjir kirishidagi kuchlanishdan ancha katta bo'lishi mumkin.



6.4-rasm. Rezonansdagi maksimal qiymatlar.

Ushbu (6.16) va (6.17) tengliklardan quyidagilar ma'lum bo'ladi. Asillikning qiymati $Q > 5$ bo'lganda rezonans chastotalar

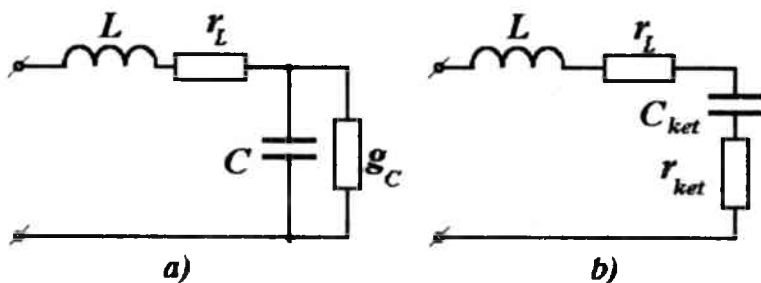
($\eta_0 \approx 1$)da U_L va U_C funksiyalar maksimumlarini 1% aniqlik bilan $Q \cdot U$ ga teng deb qabul qilish mumkin.

Bunda keltirilgan tahlil va xususan, (6.10), (6.11) shakldagi tenglamalar tarkibida L , r , C bo'lgan ekvivalent konturlarni hisoblash uchun qo'llanilishi mumkin, biroq ulardagi energiya tebranishi va sarflanishi boshqa fizik jarayonlar sifatida ko'rilishi mumkin.

Rezonansda o'lchashlar. Yuqorida ko'rsatilganidan, ketma-ket ulangan konturning sig'imi yoki induktivligi qiymatlarini o'zgartirib rezonans jarayoniga sozlash mumkin. Buning natijasida U_{Lmax} yoki U_{Cmax} ning holatlari chapga yoki o'ngga surilishi mumkin, chunki L va S qiymatlar (6.12) va (6.13) ifodalarning tarkibida mavjud.

6.3,a-rasmda (6.7), (6.12) va (6.13) tengliklar yordamida qurilgan - induktivlik o'zgargandagi (ya'ni $L=var$ bo'lgandagi) hamda 6.3,b-rasmda kondensatorning sig'imi o'zgargandagi (ya'ni $S=var$ bo'lgandagi) I , U_S , U_L ning o'zgarishlari keltirilgan; bunda qolgan parametrlar o'zgarmas.

Funksiyalar maksimumining sezilarli siljishi faqat asllikning kichik qiymatlaridagina ko'rilada, masalan, 6.3,a va b-rasmlar $Q=2$ uchun qurilgan; bundan tashqari, rezonans jarayonining o'zi ham sust ekanligi ko'zga tashlanadi. Q ning katta qiymatlarida, masalan, $Q>10$ bo'lganda U_L va U_C larning siljishlari 1% ga ham yetmaydi ((6.4-rasm)).



6.5-rasm. Sxemalarining o'zaro ekvivalentligi.

Parallel va ketma-ket almashtirish sxemalarining o'zaro ekvivalentligi. Soddashtirilgan holatda real induktivlikdagi

energiyaning so'nishi g'altak o'tkazgichlaridagi aktiv qarishilik r_L ning mavjudligi bilan tushuntiriladi. Shu sababli induktiv g'altak o'rniiga ketma-ket ulangan ikki elementlar L va r_L qabul qilinadi. Kondensatordagi energiyani so'nishi esa, plastinkalar orasidagi izolyatsiya takomil emasligi natijasida o'tkazuvchanlik mavjudligi bilan tushuntiriladi. Bunda, ushbu g_C o'tkazuvchanlik sig'im S bilan parallel ulangan deb hisoblanadi. Quvvat isrofi mavjud bo'lgan g'altak va kondensatorlar ketma-ket ulanganidagi (6.5,a-rasm) sxemani ekvivalent ketma-ket almashtirilgan sxema sifatida (6.5,b-rasm) keltirish qulaydir,

$$\text{unda} \quad r_{ket} = g_S / (g_S^2 + \omega^2 C^2) \quad (6.18)$$

$$\text{va} \quad C_{ket} = (g_S^2 C + g^2) / \omega^2 C, \quad (6.19)$$

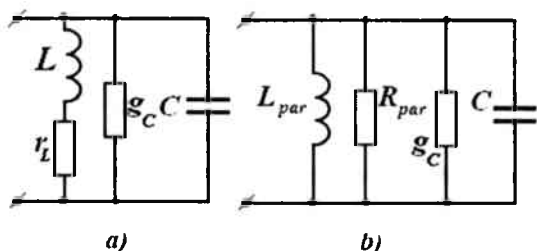
keyingi ifodalarda C va g_S kondensatorning parallel ulangan almashtirish sxemasiga (6.5,a-rasm) mos keladi. C_{ket} va r_{ket} esa - ketma-ket almashtirish sxemasiga mos keladi (6.5,b-rasm). E'tibor bersak, g_C qanchalar kichik bo'lsa, r_{ket} shunchalar kichik bo'lishi ko'zga tashlanadi.

Induktivlik g'altagi parametrlarini ham ixtiyoriy ketma-ket ulangan (L va r_L) yoki parallel ulangan deb faraz qilib olishimiz mumkin; keyingi holatda

$$R_{par} = (\omega^2 L^2 + r_L^2) / r_L \quad (6.20)$$

$$\text{va} \quad L_{par} = (\omega^2 L^2 + r_L^2) / \omega^2 L \quad (6.21)$$

[(6.15) va (6.16) tengliklarga qarang]. Shunga e'tibor berish zarurki, r_L qaranchalar kichik bo'lsa, R_{par} shunchalar katta bo'ladi. G'altak parametrining aynan shunday ekvivalent almashtirish sxemasi uni sig'imlar bilan parallel ulaganda qo'llashga qulay hisoblanadi (6.6,a,b-rasmlar).



6.6-rasm. Ekvivalent almashtirish sxemasi.

Induktivlik g'altagi va kondensatorlar asilliklari. Sxemalari 6.1,a va 6.5,b-rasmlarda keltirilgan zanjirlarni taqqoslab, asillikning kamayishi sababi - g'altak ($I^2 \cdot r_L$) va kondensatordagi ($I^2 r_{ket} = U_C^2 g_C$) energiya isrofi natijasi ekanligini ko'rish mumkin.

Darhaqiqat, asllik ifodasi (6.5) ni tahlil qilib, uni quyidagi shaklga keltirsak:

$$I/Q = I/\omega L = r_L/(\omega L) + r_{ket}/(\omega L),$$

har bir elementning unga ta'sirini osonlikcha baholash mumkin. Ammo rezonansda $I/(\omega L) = \omega C_{ket}$ bo'lgani uchun, keyingi tenglikni quyidagicha yozish mumkin:

$$1/Q = 1/Q_L + 1/Q_C, \quad (6.22)$$

Bunda, $Q_L = \omega L/r_L$ va $1/Q_C = r_{ket}\omega C_{ket}$. (6.23)

Aniqlangan Q_L va Q_C larning son qiymatlari g'altak va kondensatorning asilliklari deyiladi. Shunisi ayonki, asilliklarning almashtirish sxemalari boshqa parametrlar orqali ham ifodalanishi mumkin.

$$Q_L = R_{par}/\omega L_{par}; \quad 1/Q_C = g_S/\omega C_{ket}, \quad (6.24)$$

ularni aniqlash (6.23) tenglikka (6.18)–(6.21)larni qo'yish orqali erishildi.

6.3. Toklar rezonansi

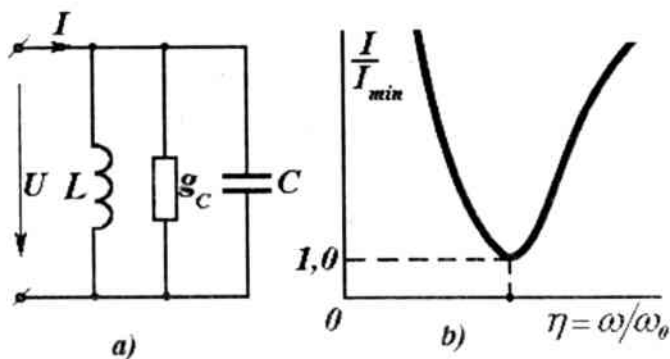
L , r , C larni parallel ulash bilan hosil qilingan rezonans hodisasi shunday nomlangan. Ushbu uch elimentlar ulanishining soddalashtirilgan shakli 6.7,a-rasmda keltirilgan. Bu holda

$$\dot{I} = (g - jb)\dot{U} = [g - j(b_L - b_C)]\dot{U} \quad (6.25)$$

yoki $I = U \sqrt{g^2 + b^2} = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}, \quad (6.26)$

bunda $b = b_L - b_C = 1/\omega L - \omega C. \quad (6.27)$

Rezonans holatida $b_L = b_C$ va $b = 0$ bo'lgani uchun tokning fazasi kuchlanishning fazasi bilan mos keladi va 6.7,a-rasmdagi soddalashtirilgan zanjirda tokning qiymati $I = gU$ minimal bo'ladi. $U = \text{const}$ bo'lgandagi rezonans funksiyasi $1/I_{\min} = f(\eta)$ 6.7,b-rasmda keltirilgan.



6.7-rasm. Toklar rezonansida elementlar ulanishi.

Agar bu zanjirda $b_L = b_C \gg g$, yoki $Ub_L = Ub_C \gg Ug$, $I_L = I_C \gg I_g = I$ bo'ladi. Demak, reaktiv elementlardagi toklar zanjir kirishidagi tokga nisbatan ancha katta bo'lishi mumkin. Shuning uchun bunday rezonansga toklar rezonansi deyiladi.

Tahlil qilinayotgan parallel ulangan L, r, C zanjirning kompleks qarshiligini aynan shu elementlarni ketma-ket ulab, ularning kompleks o'tkazuvchanligi bilan solishtirilsa, ular orasida to'la o'xshashlik borligini ko'rish qiyin emas. Bunday o'xshashlik *duallik prinsipi* deyiladi (6.1-jadvalga qarang).

Reaktiv va aktiv qarshiliklari bo'lgan shoxobchalarni parallel ulash. Bunday zanjirlardagi rezonansni tahlil qilish birmuncha murakkabroqdir. 6.6,a-rasmdagi kondensatorga parallel ulangan ($L-r_L$) induktivlik va aktiv qarshilik 6.7,a-rasmdagi zanjirga nisbatan o'zining chactotaviy xususiyatlari bilan haqiqatga yaqinroqdir. Birinchi sxemadagi (6.6,a-rasm) zanjirning rezonans shartlari quyidagicha ifoda bilan aniqlanadi.

$$\omega_r^2 = 1/LC - r_L^2/L^2 \quad (6.28)$$

Ushbu shart 6.1-jadvaldagi 6.7,a-rasm sxemasi uchun keltirilgan shartdan farqlidir.

Umumiy tokning minimal qiymati rezonans chastotasi ω_r ga mos kelmasdan, undan biroz kattaroq chastotaga mos ekanini ko'rish mumkin.

$$\omega_{\min}^2 = \omega_p^2 + 1/\sqrt{LC}[\sqrt{1 + 2(r_L g + r_L^2/\rho^2)} - 1]. \quad (6.29)$$

Ketma-ket ulangandagi (6.1,b-rasm)	Parallel ulangandagi (6.6, a-rasm)
$\underline{Z} = r + j(\omega L - 1/\omega C)$ $\underline{Y} = g - jb = \frac{1}{r + j(\omega L - 1/\omega C)}$ $g_{\max} = 1/z_{\min} = 1/r$ $Q = \omega_0 L / r$	$\underline{Y} = g + j(\omega C - 1/\omega L)$ $\underline{Z} = r + jx = \frac{1}{g + j(\omega C - 1/\omega L)}$ $r_{\max} = 1/y_{\min} = 1/g$ $Q = \omega_0 C / g$
$\frac{\underline{Y}}{g_{\max}} = \frac{1 - jQ\alpha}{1 + jQ^2\alpha^2} = \frac{\underline{Z}}{r_{\max}}$ Ikalla holatda ham $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}; \eta = \omega/\omega_0; \alpha = \eta - 1/\eta.$	

Murakkab konturlardagi rezonans. Agar ikki qutublikning reaktiv elementlari soni ikkitadan ortiq bo'lsa (6.8-rasm), uning kirish qarshiligi chastotaning bir necha qiymatlarida sof aktiv (rezonans) bo'lishi mumkin; shunga o'xshash, tok ham chastotaning mazkur bir necha qiymatlarida o'zining ekstremal qiymatlariga erishishi mumkin. Bayon qilingan hodisa reaktiv elementlardan birining o'zgarishida ham ko'rinishi mumkin.

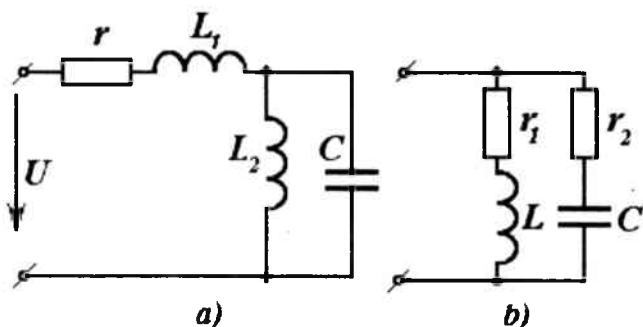
Masalan, 6.8,a-rasmdagi zanjir uchun birinchi toklar rezonansini $\omega L_2 = 1/\omega C$, ya'ni kirish o'tkazuvchanligi Y nolga teng bo'lganda ham kuzatish mumkin; bu parallel shoxobchalar uchun qabul qilingan ideallashtirish shartiga mos keladi, ya'ni shoxobchalarda quvvat isrofi bo'lmaydi. 6.8 a -rasmga nisbatan rezonans sharti quyidagicha aniqlanadi. Zanjirning kompleks qarshiligi

$$\underline{Z} = r + j\omega L_1 + \frac{j\omega L_2 \cdot \frac{1}{j\omega C}}{j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C}} = r + j(\omega L_1 - \frac{\frac{L_2}{C}}{\omega L_2 - \frac{1}{\omega C}}) = r + jx \quad (6.30)$$

$$x = \omega L_1 - \frac{L_2}{C(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C})} = 0; \quad \omega^2 L_1 C L_2 - L_1 - L_2 = 0; \quad \omega_s = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{C L_1 L_2}};$$

Kirish o'tkazuvchanligi modulining ekstremallik shartlari, ushbu o'tkazuvchanlik reaktiv tashkil etuvchisining nolga teng bo'lishi bilan mos kelmasligi mumkin. Qarshilik aktiv tashkil etuvchilarining katta qiymatlarida shunga o'xshash rezonans umuman yo'qolishi ham mumkin.

6.8,b-rasmdagi zanjirda qiziqarli jarayonni kuzatish mumkin; agar parallel konturda $r_1 = r_2 = \sqrt{L/C}$ bo'lsa, u holda chastotaning ixtiyoriy qiymatlarida ham kirish o'tkazuvchanligi sof aktiv bo'lib, qiymati $\gamma = \sqrt{C/L}$ ga teng bo'ladi, ya'ni chastotaning ixtiyoriy qiymatlarida rezonans saqlanadi.



6.8-rasm. Parallel shoxobchalar.

6.4. Chastotaviy tavsiflar

Ikki qutbliklar. Chiziqli ikki qutblik haqidagi to'liq axborotni, hususan, keltirilgan ixtiyoriy kuchlanishga nisbatan uning reaksiyasini (aks ta'sirini) chastotaviy tavsifdan, ya'ni kirish qarshiligi yoki o'tkazuvchanligi haqiqiy va mavhum qismlarining chastotaga bog'liqligidan qurib olish mumkin.

$$\left. \begin{aligned} Y(j\omega) &= g(\omega) - jb(\omega) = y \angle -\varphi, \\ Z(j\omega) &= r(\omega) + jx(\omega) = z \angle \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (6.31)$$

Agar keltirilgan kuchlanish tarkibida bir necha garmonik tashkil etuvchilar bo'lsa ham, chastotaviy tavsif yordamida uning kirish

tokini aniqlash mumkin; chastotaviy tavsif yordamida o'tkinchi jarayondagi tokni ham aniqlash mumkin.

Shuni e'tiborga olish zarurki, chiziqli passiv ikki qutblilik bo'lganda, kompleks o'tkazuvchanlik (qarshilik)ning haqiqiy va mavhum qismlari chastotaviy tavsiflari yoki uning moduli va argumentlari chastotaviy tavsiflari orasida ma'lum bog'lanish mavjuddir.

Umumiy holda, chastotaning kompleks funksiyasini quyidagicha belgilash qabul qilingan.

$$F(j\omega) = F_1(\omega) - jF_2(\omega),$$

bunda, $F_1(\omega)$ va $F_2(\omega)$ yoki soddalashtirib yozganda F_1 va F_2 -chastotaning haqiqiy funksiyalari.

F_1 bilan F_2 orasidagi ma'lum bog'lanishni umumiy holda quyidagi integrallar bilan ifodalash mumkin:

$$\left. \begin{aligned} F_1(\omega_1) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\omega F_2(\omega)}{\omega^2 - \omega_1^2} d\omega + F_1(\infty), \\ F_2(\omega_1) &= -\frac{2}{\pi} \omega_1 \int_0^{\infty} \frac{F_1(\omega)}{\omega^2 - \omega_1^2} d\omega. \end{aligned} \right\} \quad (6.32)$$

Ushbu tengliklarni keltirib chiqarish adabiyotda mavjud bo'lib, fizikada 1927-yildan Kramers va Kronig formulalari nomi bilan ma'lum; tahminan 20 yildan so'ng chiziqli elektr zanjirlar nazariyasiga kiritildi. (6.32) ifodalar chastotaning $\omega = 0$ dan $\omega = \infty$ gacha bo'lgan oralig'ida o'zgarishida bir tashkil etuvchi cheksiz qiymatga ega bo'lmasa, ikkinchi tashkil etuvchisining chastotaviy bog'lanishini ushbu oraliqda aniqlash mumkin ekanligini ko'rsatadi.

Ikki qutblikning chastotaviy tavsiflarini eksperiment natijalari yordamida ham qurish mumkin. Bu usul bilan qurilgan chastotaviy tavsiflar zanjirlarning almashtirish sxemalaridagi berilgan parametrlar asosida hisoblangan chastotaviy tavsiflarga nisbatan ikki qutublikning hususiyatlarini to'laroq ifodalaydi, chunki ko'p hollarda, ayniqsa, katta chastotalarda L , r , C qiymatlarining o'zi ham chastotaga bog'liq. Undan tashqari, zanjir elementlari bog'lanish sxemasini chizish jarayonida biz uni, aksariyat, soddalashtiramiz; mavjud kichik induktivlik, sig'im, qarshiliklarni e'tiborga olmaymiz.

Agar ikki qutblikning chastotaviy tavsiflari ma'lum bo'lsa, ushbu ikki qutblik ishtirok etgan zanjirning barcha hisoblashlari uchun ikki qutblik ichidagi har xil elementlar ulanishlarini va ularning parametrlarini bilish shart emas.

Bundan tashqari, ikki qutublikning ichki qismida elektr zanjirlari nazariyasi va uning elementlari doirasiga kirmaydigan jarayonlar mavjud bo'lsa, masalan, mexanik tebranishli ultra tovush generatorining (MTG) kirish qismiga kelayotgan elektromagnit energiyasi ultra qisqa to'lqindagi mexanik energiyaga aylantirayotgan bo'lsa, mazkur ikki qutblikning chastotaviy tavsiflari elektr zanjirlari atamalarida, aniq ifodalanishi mumkin.

$$Y(j\omega) = g(\omega) - jb(\omega)$$

Bunday mexanik to'lqinlarning quvvati juda katta bo'lishi mumkin. MTG ning manbai bunda elektr zanjiri sifatida qaralib, aniq chastotaviy tavsifga $Y(j\omega)$ ega bo'lgan ikki qutblik deb ko'riladi; ushbu tavsif rezonans xarakteriga ham ega bo'lishi mumkin. Shunga o'xshash, radio to'lqinlarini tarqatuvchi antennani ham, ta'minlovchi kabelga nisbatan ikki qutblik deb qarash mumkin.

Bir necha ikki qutbliklar parallel ulanganda, ularning o'tkazuvchanliklari yig'indisi olinadi. Shuning uchun, bunday ulanishlar natijasida hosil bo'lgan natijaviy o'tkazuvchanlik qiymati har bir ikki qutbliklarning o'tkazuvchanliklari yig'indisiga teng $Y(j\omega) = \sum_{n=1}^N Y_n(j\omega)$. Ketma-ket ulanganda esa ular qarshiliklari yig'indisi

olinadi. Bunday vaziyatda, ayrim ikki qutbliklar uchun tavsiflari o'tkazuvchanlik orqali ifodalangan bo'lsa, ularni teskarisiga aylantirib, qarshiliklar bilan ifodalash zarur.

Reaktiv ikki qutbliklarning chastotaviy tavsiflari. Induktivlik g'altagi L va kondensatori C bo'lgan elektr zanjirlarini loyihalash jarayonida (masalan, LC -filtrlar, faza o'zgartiruvchi konturlar) ular chastotaviy tavsiflarining alohida xususiyatlarini ajratib olib o'rganish uchun aksariyat, qiymatlari kichik bo'lgan aktiv qarshiliklarni e'tiborga olmasa ham bo'ladi, ya'ni ikki qutblikni sof reaktiv deb qarash mumkin. Bunday reaktiv ikki qutbliklarning chastotaviy tavsiflari ularni berilgan tavsiflar asosida sintez qilish imkoniyatini taqdim etuvchi ma'lum qonuniyatlarga bo'ysunadi.

Oddiy reaktiv ikki qutblik deb kompleks qarshiliklari $Z_L = jx' = j\omega L$ va $Z_C = jx' = 1/j\omega C = -j/\omega C$ bo'lgan induktivlik L va sig'im S li zanjirga aytiladi.

Ularning chastotaviy tavsiflari 6.9,a-rasmda keltirilgan. L_1 va S_1 lar ketma-ket ulangandagi kompleks qarshiliklari quyidagi ifodadan aniqlanadi.

$$\begin{aligned} Z &= jx = j(\omega L_1 - 1/\omega C_1) = \\ &= j\omega L_1(1 - 1/\omega^2 L_1 C_1) = \frac{L_1}{j\omega}(\omega_1^2 - \omega^2) \end{aligned} \quad (6.33)$$

bunda, $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$ - ketma-ket rezonans konturining yoki kuchlanish rezonansining ikki qutblik reaktiv qarshiligi nolga teng bo'lgandagi «nol» chastotasi (6.9,b-rasm).

L_1 va C_1 lar parallel ulaganganda ularning kompleks qarshiliklari quyidagicha bo'ladi.

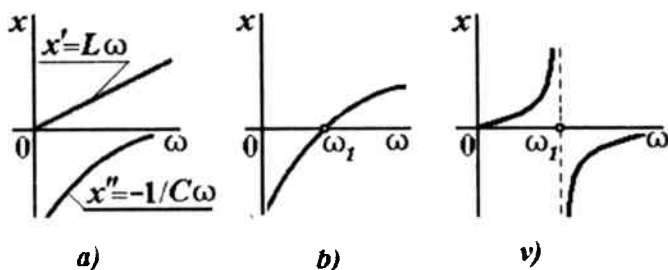
$$Z = jx = \frac{j\omega L_1 \cdot 1/j\omega C_1}{j(\omega L_1 - 1/\omega C_1)} = \frac{j\omega}{C_1(\omega_1^2 - \omega^2)} \quad (6.34)$$

bunda, $\omega_1 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$ - parallel rezonans konturi yoki tok rezonansi reaktiv ikki qutblikning qarshiligi cheksizlikka teng bo'lgandagi - «qutb» chastotasi (6.9, v-rasm).

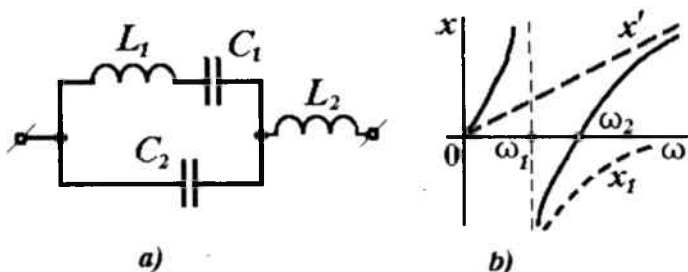
Har qanday reaktiv ikki qutblik uchun bo'lganidagi kabi, barcha qurilgan tavsiflar uchun $dx/d\omega > 0$ sharti bajariladi. Masalan, 6.10, a-rasmda keltirilgan ikki qutblikning chastotaviy tavsifini ular alohida shoxobchalari tavsiflarining yig'indisi deb qaraymiz; buning uchun 6.9,v-rasmdagi parallel konturning x_1 va 6.9,a-rasmdagi x' tavsiflarini qo'shaniz, chunki kontur va induktivlik ketma-ket ulangan. Hosil bo'lgan chastotaviy tavsif $dx/d\omega > 0$ shartini qanoatlantiradi, parallel kontur rezonans chastotasi ω_1 da «qutb»ga ega va ketma-ket rezonans chastotasi ω_1 da «nol»ga ega.

Ketma-ket (6.33) va parallel (6.34) konturlardagi kabi, ikki qutblikning kompleks qarshiligi Z ni ω_1 va ω_2 rezonans chastotalari orqali ω ning kasr rasional funksiyasi sifatida ko'rsatish mumkin.

$$Z = jx = \frac{j\omega L_1 \cdot 1/j\omega C_1}{j(\omega L_1 - 1/\omega C_1)} + j\omega L \quad (6.35)$$



6.9-rasm. Chastotaviy tavsiflar.



6.10-rasm. Rezonansda reaktiv qarshiliklar chastotaviy tavsiflar.

Qarshilik Z ifodasi ω_1 chastotasida «qutb» bo'lishini ta'minlash uchun maxrajida $(\omega_1^2 - \omega^2)$ ikki hadlik bo'lishi lozim, chastotasi ω_2 bo'lganda «nol» bo'lishini ta'minlash uchun Z suratida $(\omega_2^2 - \omega^2)$ ikki hadlik mavjud bo'lishi zarur. Undan tashqari, juda katta chastotalarda C_1 sig'imning qarshiligi L_1 va L induktivliklar qarshiliklaridan anchagina kichik. Shuning uchun, 6.10,a-rasmda ikki qutblikning qarshiligi induktivlik L qiymati bilan aniqlanadi (chunki C_1 sig'imning juda kichik qarshiligi L induktivlikni «qisqa tutashtiradi») va $j\omega L$ qiymatga intiladi. Yuqorida keltirilgan Z qarshilik $\omega \gg \omega_1$ va $\omega \gg \omega_2$ bo'lganda 1 ga intiladi, ya'ni ushbu bog'lanishda $j\omega L$ bo'lmaydi va Z ning qiymatiga

$$\underline{Z} = j\omega L(\omega_2^2 - \omega^2)/(\omega_1^2 - \omega^2)$$

yaqinlashadi.

Reaktiv qarshilik haqida teorema. Har qanday reaktiv ikki qutblik uchun $dx/d\omega > 0$ tengsizligi bajariladi.

Darbaqiat, har qanday ikki qutblik m shoxobchadan iborat bo'lib, har bir k -nchi shoxobchalar ketma-ket ulangan L_k induktivligi va C_k sig'imidan iboratdir (bir necha induktivlik va sig'im ketma-ket ulangan bo'lsa, ularni ketma-ket ulangan ekvivalent L_k va C_k bilan almashtirish mumkin). Ixtiyoriy k -nchi shoxobcha uchun $dx_k/d\omega_k > 0$ sharti bajariladi (6.9-rasm). Ikki qutblikning umumiy qarshiligi $\tilde{o}$ barcha k shoxobchalar qarshiliklarining funksiyasidir, shuning uchun bir necha o'zgaruvchilari bo'lgan funksiyalarni differensiallash qoidasiga muvofiq.

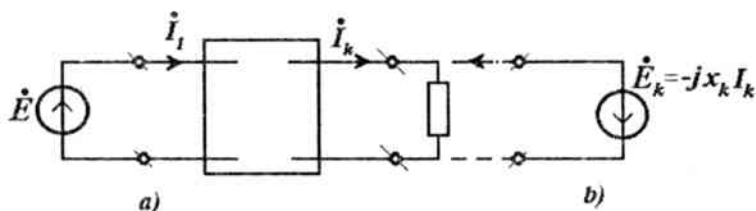
$$\frac{dx}{d\omega} = \sum_{k=1}^m \frac{\partial x}{\partial x_k} \frac{dx_k}{d\omega} \quad (6.36)$$

har qanday kontur uchun hosila $\partial x / \partial x_k > 0$ to'g'ri ekanligini isbotlash kifoyadir.

Buning uchun ikki qutblikning kirish qismiga $\dot{E} = \dot{E}_1$ e.yu.k. manbaini ulaymiz, k -nchi shoxobchani (6.11, a-rasm) ajratamiz, hamda jx_k qarshilikni kompensiyalash prinsipiga asosan (§3.7) e.yu.k. $\dot{E}_k = -jx_k \dot{I}_k$ bilan almashtiramiz; bunda ifodaning manfiy ishorasi $\dot{E}_k$ musbat yo'nalishiga $\dot{I}_k$ ning musbat yo'nalishi mosligi uchun qo'yilgan. Superpozitsiya usulidan foydalanib $\dot{I}_1$ va $\dot{I}_k$ toklarni quyidagicha ifodalaymiz:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \underline{Y}_{11} \dot{E}_1 + \underline{Y}_{1k} \dot{E}_k; \\ \dot{I}_k &= \underline{Y}_{k1} \dot{E}_1 + \underline{Y}_{kk} \dot{E}_k. \end{aligned} \right\} \quad (6.37)$$

bunda, $\underline{Y}_{nl}$ o'tkazuvchanlik x_k qarshilikka bog'liq emas, ya'ni x_k o'zgarishida $\underline{Y}_{nl}$ o'zgarishsiz qoladi. $\dot{E}_k$ ning o'rniga uning $-jx_k \dot{I}_k$ qiymatini qo'ysak, so'ngra ikkala tenglama tarkibidan tok $\dot{I}_k$ ni ajratib olsak, $\dot{I}_1(\dot{E}_1)$ bog'lanishni aniqlaymiz.



6.11-rasm. Kompensiyalash prinsipi.

$$\dot{I}_1 = \left(Y_{11} - \frac{jY_{1k} \cdot Y_{k1} x_k}{1 + jY_{kk} x_k} \right) \dot{E}_1, \quad (6.38)$$

bundan

$$jx = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_1} = \frac{1 + jY_{kk} x_k}{Y_{11} + j(Y_{11} Y_{kk} - Y_{1k}^2) x_k} \quad (6.39)$$

va hosilani aniqlaymiz

$$\frac{\partial x}{\partial \omega} = \frac{Y_{1k}^2}{[Y_{11} + j(Y_{11} Y_{kk} - Y_{1k}^2) x_k]}.$$

Agar reaktiv ikki qutblik kirish va uzatish o'tkazuvchanliklarini sof mavhum sonlar deb faraz qilsak, ya'ni $Y_{n1} = -jb_{n1}$, u holda

$$\frac{\partial x}{\partial x_k} = \frac{b_{1k}^2}{[b_{11} + (b_{11} b_{kk} - b_{1k}^2) x_k]} > 0 \quad (6.40)$$

ekanligi isbotlangan bo'ladi.

Ushbu $dx/d\omega > 0$ shartdan shunday xulosa kelib chiqadi: *har qanday reaktiv ikki qutblikda «nol»lar va «qutb»lar almashinib turadi*; $\omega = 0$ bo'lganda induktivlik orqali «tok uchun yo'l ochiq» ya'ni, o'zgarmas tok uchun induktivlikning qarshiligi nolga teng $x = 0$; yoki bunday «ochiq yo'l» bo'lmasa, unda $x = -\infty$; agar $\omega \rightarrow \infty$ sig'im orqali «ochiq yo'l» bo'lsa $x \rightarrow 0$, aks holda $\omega \rightarrow 0$ esa $x \rightarrow \infty$.

Parallel-ketma-ket shoxobchalardan tashkil topgan har qanday ikki qutblik sxemasining shakliga ko'ra parallel va ketma-ket rezonans chastotalari sonini ham aniqlash mumkin.

Faraz qilaylik, ketma-ket yoki parallel ulangan bir turdagi elementlar (L yoki C) ekvivalent elementlar bilan almashtirilgan.

U holda ikki elementi (L va C) bo'lgan ikki qutblik bir rezonans chastotasiga ega bo'ladi (6.9, b va v -rasm); sxemaga bir element qo'shib uni murakkab shaklga keltirsak, u holda rezonans chastotasi bittaga ortadi (6.10-rasm). Masalan, 6.10, a -rasmda keltirilgan ikki qutblikda uchta rezonans chastotasi mavjud. Induktivlik orqali «ochiq yo'l» bo'lmaganligi uchun $\omega = 0$ bo'lganda chastotaviy tavsif $x = -\infty$ dan boshlanadi va ω_1 - rezonans chastotalarning birinchisi - ketma-ket rezonans chastotasidir (6.10, b -rasm).

Sxema shaklidan hamda tavsifdan darhol kompleks qarshilik $Z=jx$ ekanligi aniqlaymiz; uning ifodasi suratida ikkita ikki hadlik $(\omega_1^2 - \omega^2)$ va maxrajida bitta ikki hadlik mavjud.

$$Z = \dots (\omega_1^2 - \omega^2) / (\omega_2^2 - \omega^2)$$

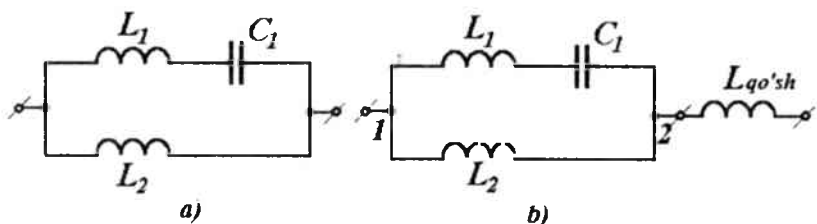
Sxemadan shu ayon bo'ladiki, $\omega \rightarrow \infty$ bo'lganda $z \rightarrow j\omega L_2$, yuqorida keltirilgan to'liqsiz tenglama esa ω^2 ga intiladi. Shuning uchun

$$Z = \frac{j\omega L_2}{-\omega^2} \frac{(\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2)}{(\omega_2^2 - \omega^2)} \quad (6.41)$$

6.10, b -rasmda keltirilgan turdagi tavsiflarni qisqacha ($\infty - \infty$) belgilanadi, chunki $\omega = 0$ va $\omega \rightarrow \infty$ bo'lganda ikki qutblikning qarshiliklari cheksiz kattadir. Shunga o'xshash tahlil qilib, yana uch turdagi tavsiflar mavjudligini ko'rish mumkin: $(0 - \infty)$, $(\infty - 0)$ va $(0 - 0)$.

Hulosa qilib aytish mumkinki, ikki qutblikning rezonans chastotalari soni elementlar sonidan bittaga kam bo'ladi. Masalan, 6.12, a -rasmdagi ikki qutblik chastotaviy tavsifi sifat jihatidan (rezonans chastotalarining turi va soni bo'yicha) 6.10, b -rasmdagi bilan o'xshash. Agar 6.12, a -rasmdagi induktivlikka $L_{qo'sh}$ qo'shimcha induktivlikni kiritib 6.12, b -rasmdagi sxemani hosil qilsak, u holda zanjir tavsifi sifat jihatidan o'zgarmaydi. Buni 6.9, v -rasmdagi tavsifga 6.9, a -rasmdagi x' tavsifini qo'shib tekshirishimiz oson. Tavsif o'zgarmasligining sababi shundaki, $L_{qo'sh}$ ulangan 2 tugunda (6.12, b -rasm) bir xil turdagi elementlari bo'lgan (induktivlik) shoxobchalar ulangan. Umumiy holda, biror tugunga ulanuvchi shoxobchalarda bo'lgan bir hil turdagi elementga

qo'shimcha shoxobcha bilan shu turdagi element kiritilganda, rezonans chastotalar soni ko'paymaydi. Agar qo'shimcha qilib ulanayotgan $L_{qo'sh}$ induktivlik o'rniga qo'shimcha sig'im $C_{qo'sh}$ ulansa, u holda 6.12,b-rasmdagi ikki qutblik uchun rezonans chastotalar soni ikkitadan uchtagacha ortadi; biroq 6.12,a-rasmdagi ikki qutublikka L_2 ning o'rniga $C_{qo'sh}$ ulanganda, rezonans chastotalar soni ortmaydi.



6.12-rasm. Ikki qutblikda rezonans.

6.5. Zanjir elementlarining chastotaviy tavsiflari

Yuqorida bajarilgan barcha hisoblashlarimizda zanjirning shoxobchalaridagi qarshilik, induktivlik va sig'implarning har birini alohida ajratib ko'rsatish mumkin deb faraz qilingan edi.

Biroq, real sharoitda zanjir elementlarida faqat qarshilik, faqat induktivlik va faqat sig'implar mavjudligiga taxminan erishish mumkin.

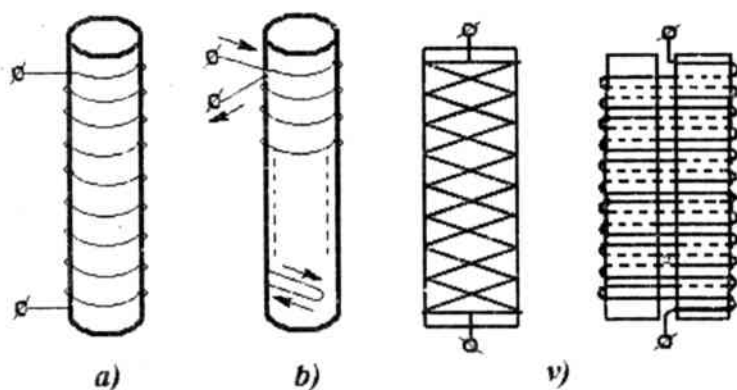
Qarshilik. Oddiy o'tkazgichli simi bo'lgan rezistorlarda (6.13,a-rasm) yoki reostatlarda, nisbatan kichik chastotalarda ham sezilarli induktivlik hosil bo'ladi; bunga sabab - sim o'ramlaridagi magnit maydonidir. Magnit maydonini kamaytirish uchun bifilyar o'ramlardan foydalaniladi (6.13,b-rasm); bu holda konturdagi magnit oqim juda kichik bo'ladi, chunki qo'shni o'tkazgichdagi tok teskari yo'nalgan va bu oqimni kompensatsiyalaydi. Biroq, bunday sim o'rashda ular orasidagi sig'im sezilarli darajada ortadi; ayniqsa, simli rezistorning kirish va chiqish qisqichlari yaqin joylashganda ular orasidagi kuchlanish eng katta qiymatga ega, shu sababli yuqori chastotalarda bifilyar qarshiliklarni qo'llanilmaydi. 6.13,v-rasmda

induktivlik va sig'implari nisbatan kichik bo'lgan yuqori chastotali simli rezistorlar keltirilgan. O'tkazgichning umumiy uzuhligini kamaytirish uchun yuqori solishtirma qarshilikka ega bo'lgan maxsus metall qotishmalari ishlatiladi. Bunda imkoniyat boricha qarshiliklari temperaturaga bog'liq bo'lmagan qotishmalar qabul qilinadi.

Yuqori chastotalar texnikasida (radiotexnika, elektronika) maxsus tarkibga ega bo'lgan (uglerod massalari, yarim o'tkazuvchili keramika va h.k.) simsiz rezistorlar qo'llaniladi; katta qarshilik, kichik o'lchamlari hamda nisbatan katta magnit oqimlarining yo'qligi sababli ularda induktivlik deyarli bo'lmaydi, deb hisoblash mumkin.

Ammo, elektromagnit maydon hosil qilayotgan induktivlik va sig'imdan tashqari, o'tkazgichlardagi qarshilik ham chastotaga bog'liq. Masalan, o'zgarmas tok oqayotgandagi qarshilikdan (u ko'pincha «*Omik*» qarshilik deyiladi), o'zgaruvchan tok oqqandagi o'lchangan aktiv qarshilik anchagina farq qiladi. Bunga «*yuza effekti*» katta ta'sir qiladi; o'zgarmas tok zichligi o'tkazgichning kesim yuzasida nisbatan tekis taqsimlanadi; o'zgaruvchan tok esa o'tkazgich kesim yuzasining chekka qismlarida taqsimlanadi. Uning ichki qatlamlari o'tkazgich yuzasidagi o'tkazish qatlamlari bilan «ekranlanadi», tez o'zgarayotgan magnit oqim o'tkazgichning ichki qismlariga «singish»ga ulgurmaydi. Natijada, o'tkazgich yuzasidagi magnit maydon kuchlanganligi o'tkazgich ichidagi magnit maydon kuchlanganligidan kattaroq bo'ladi, demak, tokning zichligi ham o'tkazgich yuzasida katta bo'ladi.

Chastota qanchalar katta bo'lsa, maydon singishining chuqurligi shunchalar kichik bo'ladi. Masalan, mis o'tkazgichlarda chastota $f=50\text{Hz}$ bo'lganda o'tkazgich yuzasiga nisbatan 10mm chuqurlikdagi elektr maydoni va tok zichligi, o'tkazgich yuzasidagiga nisbatan 3 marta kamroq bo'ladi; $f=0,5\text{MHz}$ bo'lganda $0,1\text{mm}$ chuqurlikda 3 marta kam; $f=50\text{MHz}$ bo'lganda $0,01\text{mm}$ chuqurlikda 3 marta kam bo'ladi. Keltirilgan singish chuqurligi (shartli singish chuqurligi) chastotadan kvadrat ildiz chiqarilganiga proporsional. Shuning uchun, yuqori chastotali qurilmalarda o'tkazgichning yuza qatlami asosiy ahamiyatga ega.



6.13-rasm. Yuqori chastotali simli rezistorlar.

Real qarshilikni ikki-uch elementdan tashkil topgan ekvivalent sxema bilan har doim ham almashtirib bo'la olmaydi, biroq uning kirish qarshiligining (yoki o'tkazuvchanligining) chastotaviy tavsifi ko'rilayotgan elementni uzil-kesil ifodalovchi tavsif hisoblanadi. Agar chastota o'zgarganda aktiv qarshilik ham o'zgarsa, ekvivalent sxema albatta chastotaga bog'liq bo'lgan reaktiv qarshilika ega bo'lishi zarur.

Sig'im. Oddiy kondensatorlar o'zining tuzilishiga ko'ra nisbatan katta yuzali (S) va orasidagi masofasi (d) juda kichik ikki elektroddan iborat bo'lgan maxsus tayyorlangan qurilmadir (ya'ni $d^2 \ll S$). Havo kondensatori (elektrodlari orasiga dielektrik havo to'ldirilgan) faqat katta chastotalarda ideal kondensatorlardan o'zida induktivlik mavjudligi bilan farqlanadi.

Havo kondensatorlarining sig'ini juda kichik (bir necha o'n pikofarada). Katta sig'imli kondensatorlar (bir necha mikrofara), aksariyat, yupqa izolyatsiya bilan ajratilgan metall folgadan yasaladi. Shu bilan birga, metall elektrod va elektrolit orasidagi juda yupqa elektrolitik pardadan iborat izolyatsiya oralig'i bo'lgan elektrolitik kondensatorlar ham keng qo'llaniladi. Ularning sig'imlari juda ham katta bo'ladi (o'nlab va yuzlab mikrofara). O'zgaruvchan tok zanjirlarida ishlaganda izolyatsiya qatlami

shikastlanmasligi uchun ularga qo'shimcha ravishda o'zgarmas kuchlanish ulanadi.

Yuqori chastotalar texnikasida keramik kondensatorlar qo'llaniladi (bir necha pikofarada). Ularning elektrodleri orasiga yuqori chastotalarga mo'ljallangan dielektrik joylashtirilgan. Radiotexnik kondensatorlar juda kichik o'lchamlarda tayyorlanadi, ularning hajmlari bir necha kub millimetrdan oshmaydi; bosma sxemalarda tok o'tkazgichi sifatida xizmat qiluvchi metal tasmalar bir necha santimetr gacha uzunlikda oralariga yupqa izolasiya pardasi bilan bir-birlariga ustma-ust joylashtirilganda sig'im hosil bo'ladi. Yuqori kuchlanish texnikasida ishlatiluvchi kondensatorlarning geometrik o'lchamlari birnecha metrgacha boradi.

Ba'zi hollarda kondensatorlar kirish o'tkazuvchanligi tarkibidagi aktiv tashkil etuvchisining mavjudligi sezilarli oqibatlariga olib kelmaydi, masalan, kondensator energetika tizimlaridagi faza siljishini kompensatsiya qilish uchun qo'llanilayotgan bo'lsa, deyarli ta'siri sezilmaydi. Aksincha, rezonans konturlarida ishlatiluvchi kondensatorlar juda kichik quvvat isroflariga ega bo'lishi zarur, shuning uchun aktiv o'tkazuvchanlik reaktiv tashkil etuvchisining yuzdan bir ulushicha mavjud bo'lsa ham, kontur asilligiga ta'sir etib rezonans sifatini pasaytiradi.

Real kondensatorlarda kuchlanish va tok orasidagi faza burchagi 6.14,*a*-rasmda ko'rsatilganidek, $\frac{\pi}{2}$ dan δ burchakka farq qiladi. Ushbu sxemalarda elektrodleri ideal bo'lmagan dielektriklar bilan ajratilgan kondensator ham keltirilgan; dielektrikda energiyaning qaytmas isrofli jarayoni sodir bo'ladi; bunda kondensator aktiv quvvat iste'mol qiladi.

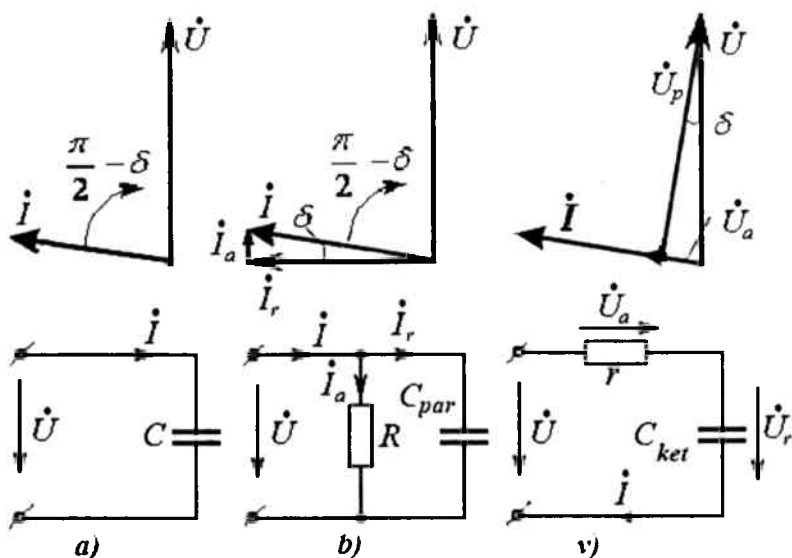
Kuchlanish $\dot{U}$ ga nisbatan $\pi/2$ dan δ ga kamroq bo'lgan burchakka surilgan $\dot{I}$ tokni ikki tashkil etuvchiga ajratish mumkin (6.14,*b*-rasm): aktiv tok $\dot{I}_a$ (u kuchlanish bilan fazasi mos keladi) va reaktiv tok $\dot{I}_p$ (u kuchlanishga nisban ortogonaldir). Ekvivalent elektr sxemasida tokning bu ikki tashkil etuvchisini ikki parallel shoxobchalardagi toklar deb faraz qilish mumkin; bu shoxobchalardan biri – ideal kondensator C_{par} , ikkinchisi sof aktiv

qarshilik $R = 1/g$. Tashkil etuvchilarga ajratishni o'zgacha bajarish ham mumkin (6.14,v-rasm): to'la kuchlanish $\dot{U}$ ikki tashkil etuvchilar - aktiv kuchlanish $\dot{U}_a$ (u tok bilan bir hil fazada), hamda reaktiv kuchlanish $\dot{U}_p$ (u tok i ga ortogonal). Ekvivalent elektr sxemasida bu tashkil etuvchilarni ikki ketma-ket ulangan elementlardagi kuchlanishlar deb qabul qilish mumkin; biri sof aktiv qarshilik R dagi, ikkinchisi - ideal kondensator S_{ket} dagi kuchlanishlardir.

Ikkala holatdagi tok $\dot{i}$ va kuchlanish $\dot{U}$ lar bir hil bo'lib, ular orasidagi faza burchagi $(\frac{\pi}{2} - \delta)$ ga teng, asillik esa g_c bo'ladi. Ajralib chiqayotgan quvvat esa

$$P = UI_a = U_a I = U \cdot I \cdot \sin \delta \quad (6.42)$$

ga teng bo'ladi.



6.14-rasm. Real kondensatorlarda kuchlanish va tok orasidagi faza burchagi.

Parallel almashtirish sxemasida (6.14, b-rasm)

$$\operatorname{tg} \delta = 1 / g_c = I_o / I_p = g / \omega C_{par} = 1 / \omega C_{par} R \quad (6.43)$$

Ketma-ket va parallel ekvivalent sxemalar parametrlari o'zaro bog'lanishini asillik va $\operatorname{tg} \delta = 1 / g_c$ orqali ifodalash qulaylik tug'diradi.

$$C_{ket} = C_{par} (1 + \operatorname{tg}^2 \delta); \quad (6.44)$$

Aksariyat, kondensatorlarda $\operatorname{tg} \delta < 0,1$ ya'ni $g_c > 10$; bunda 1% dan kichik hatolikda quyidagini qabul qilish mumkin.

$$C_{ket} = C_{par} \text{ va } r = R \operatorname{tg}^2 \delta. \quad (6.45)$$

Real kondensatorlardagi asllik qiymati ko'pincha minglar va o'n minglarni tashkil etadi.

Berilgan parametrlarda va chastotalarda parallel va ketma-ket almashtirish sxemalari ekvivalentdir. Biroq, bu ikki sxemalarning *chastotaviy tavsiflari tubdan farq qiladi*. Parallel sxemada R va C_{par} o'zgarmas bo'lganda chastotaning ortishi bilan $\operatorname{tg} \delta$ kamayadi (asllik ortadi); ketma-ket sxemada r va C_{ket} o'zgarmas bo'lganda chastotaning ortishi $\operatorname{tg} \delta$ ning ortishiga olib keladi (asillik kamayadi).

Parallel sxemaga mos keluvchi real kondensatorni tasavvur qilish oson, bu o'zgarmas sig'imli $C = C_{par}$ kondensator bo'lib, undagi tokning aktiv tashkil etuvchisi faqat izolyatsiyaning mukammal bo'lmaganligidan vujudga keladi. Shunga o'xshash, real kondensatorni ham ketma-ket ulangan sxemaga mos keladi deb faraz qilish mumkin, bu o'zgarmas sig'imli $C = C_{ket}$, ideal izolyatsiyali va qarshiligi r bo'lgan o'tkazgichlar bilan ketma-ket ulangan deb qabul qilinadi. Real dielektrikli kondensatordagi quvvat isroflari asosan o'zgaruvchan elektr maydomida joylashgan dielektrikning qutblanish jarayonidagi isrofidir; ular dielektrik quvvat isroflari deb ataladi; o'zining fizik mohiyatiga ko'ra Joul-Lens isroflari ($i^2 r$) dan farqlanadi. Elektr zanjirlari nazariyasi doirasida ushbu dielektrik isroflar hosil bo'lish jarayonini quyidagicha tushuntirish mumkin. Kondensator elektrodlaridagi zaryad berilgan kuchlanishga proporsional. Agar elektrodlar orasidagi fazo polarizatsiyalangan dielektrik bilan ($\epsilon > 1$) to'ldirilgan bo'lsa, ushbu zaryad miqdori dielektrik bo'lmagan holatga nisbatan ϵ marta katta bo'ladi. Biroq, dielektrikning polarizatsiyasi kuchlanish berilishi bilan to'satdan bir onda paydo bo'lmaydi. Polarizatsiya vaqt bo'yicha kuchlanishdan kechikadi. Shuning uchun elektrodlarda garmonik

kuchlanish U ulanganda, elektrodlardagi zaryad Q ham garmonik qonuniyat bilan o'zgaradi (biroq fazasi bo'yicha kuchlanishdan kechikadi). Ushbu kechikish δ burchak bilan xarakterlanadi.

$$\dot{Q} = UCe^{-j\delta}, \quad (6.46)$$

shuning uchun biz ko'rayotgan holatda tok

$$\dot{I} = j\omega Q = Uj\omega Ce^{-j\delta} \quad (6.47)$$

kuchlanishdan aynan $(\frac{\pi}{2} - \delta)$ burchakka ilgari ketadi.

Keyingi bog'lanishlarga asoslanib, kompleks sig'im tushunchasini kiritish mumkin (uni tepasidagi chiqiq bilan belgilaymiz).

$$\bar{C} = Ce^{-j\delta} = C' - jC''. \quad (6.48)$$

Ideal kondensatorlar o'tkazuvchanliklari va qarshiliklari uchun keltirib chiqarilgan bog'lanishlarni real isrofli kondensatorlarga tatbiq etib quyidagilarni aniqlaymiz:

$$\underline{Y} = g - jb = j\omega \bar{C} = \omega C' + j\omega C''. \quad (7.49)$$

Keyingi tenglikda o'tkazuvchanlikning aktiv tashkil etuvchisi ko'zga yaqqol tashlanadi. Ko'p hollarda kompleks sig'imning chastotaga bog'liqligini quyidagicha qabul qilish mumkin:

$$\bar{C} = C_0 \frac{1}{1 + j\omega\tau} = C_0 \frac{1 - j\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} = C' - jC''. \quad (6.50)$$

Keltirilgan bog'lanishdagi o'zgarmas qiymat τ dielektrik relaksasiyasi vaqti deyiladi va bir necha millisekund, ba'zan bir necha mikrosekund qiymatni ham tashkil etishi mumkin; C_0 - chastota $\omega = 0$ bo'lgandagi kondensatorning sig'imi.

Biz zaryadning qiymati kuchlanishga proporsional deb farz qilish mumkin bo'lgandagi chiziqli dielektrikli kondensatorni ko'rish bilan cheklandik. Dielektrikning nochiziql effektlari bilan bog'liqliklarini nochiziqli zanjirlar nazariyasida ko'ramiz.

Induktivlik. Elektr zanjiriga induktivlik kiritish zarur bo'lganda uni g'altak sifatida kiritiladi. G'altakning induktivligini oshirish uchun uning ichiga ferromagnit o'zak o'rnatiladi.

Yuqori chastotalarda g'altakning o'ramlari orasidagi sig'imning ta'siri kuchayadi. Shuning uchun, radio chastotalarda ishlovchi g'altaklarda o'ramlar shunday bajarishga harakat qilinadiki, bunda ikki chekkadagi boshlang'ich va oxirgi o'ramlar bir-biridan imkon

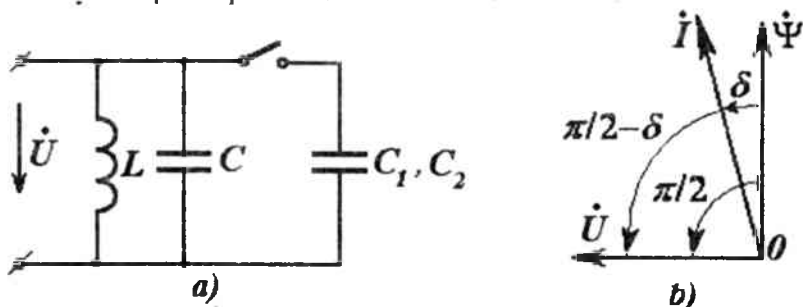
qadar uzoqroqda joylashtiriladi. Katta oʻramlar soniga ega boʻlgan gʻaltaklar yuqori chastotalar (megogerslar)da mutlaqo ishlatilmaydi.

Oʻramlararo sigʻimlar taʼsirini, birinchi tahminda, shu induktivlik L ning biror kondensator S bilan parallel ulangani deb qabul qilinadi (6.15, a-rasm). L bilan C ning qiymatlari quyidagi ikki tajriba yordamida aniqlanishi mumkin. Gʻaltak bilan parallel qilib oʻzgaruvchan (boshqariluvchi) kondensatorni darajalab (gradu-rovka qilinib) ulanadi, hamda ikki teng boʻlmagan ω_1 va ω_2 chastotalarda tok rezonansi sodir boʻlishiga mos keladigan C_1 va C_2 sigʻimlar aniqlanadi. Bunda $1/\omega_1^2 = L(C_1 + C)$; $1/\omega_2^2 = L(C_2 + C)$ boʻladi; undan L va C ni aniqlanadi.

Induktivlik qiymati milligenrining oʻndan bir ulushicha boʻlgan gʻaltaklarda sigʻim S ning qiymati juda kichik (taxminan birnecha pikofarada) boʻladi; uning qiymati chastotaning faqatgina yuzlab kilogersdan ortiqroq miqdorlarida sezilarli boʻladi.

Gʻaltakning parallel ulangan sigʻimli ekvivalent sxemasi chastotaning cheklangan diapazonlarida qoʻllanilishi mumkin. Umumiy holda, gʻaltakning sifatleri haqida soʻzlash uchun, uning chastotaviy tavsifi haqida hamma maʼlumotlarni bilish zarur.

Ferromagnit oʻzak induktiv gʻaltaklarning xususiyatlarini tubdan oʻzgartirishi mumkin. Avvalo, ferromagnit oʻzakning mavjudligi induktivlikning qiymatini juda ham koʻp (minglab, baʼzan esa yuz minglab) marta oshirishi mumkinligini taʼkidlash zarur. Bundan tashqari, ushbu gʻaltaklar induktivliklari nochiqli xususiyatni qabul qiladilar.



6.15-rasm. Oʻramlararo sigʻimlar taʼsiri.

Ushbu qismda (chiziqli zanjirlarni ko'rish jarayonida) ferromagnit o'zaklarni chiziqli rejimda, ya'ni tok bilan magnit oqimi orasida chiziqli bog'lanish mavjud, deb qabul qilamiz (ushbu taxmin tok va magnit oqimining kichik qiymatlari uchun hatoligi katta emas). Real sharoitlardan uzoqlashmaslik uchun, tok I ning garmonik qonuniyatda o'zgarishida, magnit oqimi va uning chulg'am bilan ilashuvi Ψ ham garmonik qonuniyatga amal qilib o'zgaradi, ammo tokka nisbatan biroz orqada qoladi, deb hisoblaymiz (6.15,b-rasm).

$$\dot{\Psi} = I \cdot L \cdot e^{-j\delta}. \quad (6.51)$$

Natijada g'altakdagi kuchlanish

$$\dot{U} = j\omega \dot{\Psi} = j\omega L e^{-j\delta} I \quad (6.52)$$

tokdan $[(\pi/2) - \delta]$ burchakka ilgarilab ketadi.

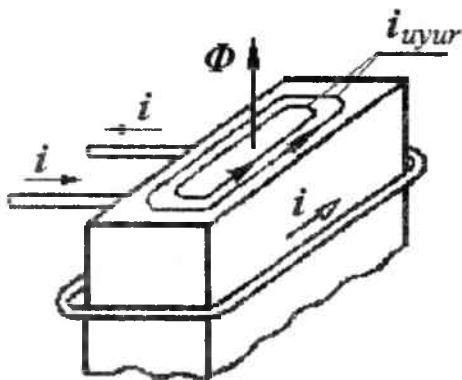
Elektr zanjirlar nazariyasiga asosan δ burchakning induktivlikda qatnashishi kondensatordagi δ burchagi mavjudligiga o'xshash natija beradi.

Magnit ilashuvi Ψ magnitlovchi tok I dan kechikishining fizik asoslari, dielektrikdagi jarayonlar bilan ham umumiyliigi bor: ferromagnit o'zakning qutblanish (uning magnitlanish) jarayoni tok paydo bo'lishi bilan bir onda sodir bo'lmaydi.

Metall ferromagnit o'zaklarda tok o'zgarishi bilan magnit oqimi o'zgarishi-ning kechikishiga boshqa sabablar ham bor: *Lens qonuniga binoan, magnit oqimining har qanday o'zgarishi, ushbu magnit oqimi o'zgarishiga aks ta'sir etuvchi tokni hosil qiladigan e.yu.k.ni induktivlaydi.*

Faraz qilaylik, g'altak chulg'ami metall o'zakka o'ralgan bo'lsin, uning bir o'rami 6.16-rasmda ko'rsatilgan. G'altakdagi i tok rasmning ko'rsatilgan yo'nalishida o'zakda F magnit oqimi hosil qiladi va uning yo'nalishi strelka bilan ko'rsatilgan. Agar chulg'amdagi tok kamaysa, metall o'zakda magnit oqimining kamayishiga to'sqinlik qiluvchi, shu oqimni ilgarigi yo'nalishda saqlab qolishga intiluvchi tok hosil bo'ladi. Metall o'zakda hosil bo'luvchi bu tok - uyurma toki i_{uyur} deyiladi; bu tok, albatta, elektr zanjirlaridagi faqat o'z shoxobchalaridan oqadigan i toklardan farq qiladi (bu tok va e.yu.k.lar amalda mavjud bo'lib, ammo ularga

elektr zanjirlar nazariyasining birorta usulini tadbiq etib bo'lmassligiga ajoyib bir misol bo'ladi). Uyurma toklarning ta'sirini batafsil tahlil qilish, o'zgaruvchan toklarga mo'ljallangan ferromagnit o'zaklar yaxlit temir sifatida yasalmasdan, balki alohida yupqa, o'zaro izolyatsiyalangan tunukachalardan yasalishi tushunishga yaqqol misol bo'la oladi. Yupqa tunukachalarda uyurma toklarning oqib o'tishi qiyinlashadi, chunki toklar konturlari katta bo'lgani bilan, tok uchun kesim yuza keskin kamayadi. Chastota qanchalar katta bo'lsa tunukachalar shunchalar yupqa qilib bajariladi ($f=50\text{Hz}$ da $0,5-0,35\text{mm}$ dan $f > 100\text{kHz}$ da birnecha mikrongacha). Radiochastotalarda yupqa ferromagnit kukunni izolyatsiya massasi bilan presslash yo'li bilan olingan o'zaklar ham qo'laniladi.



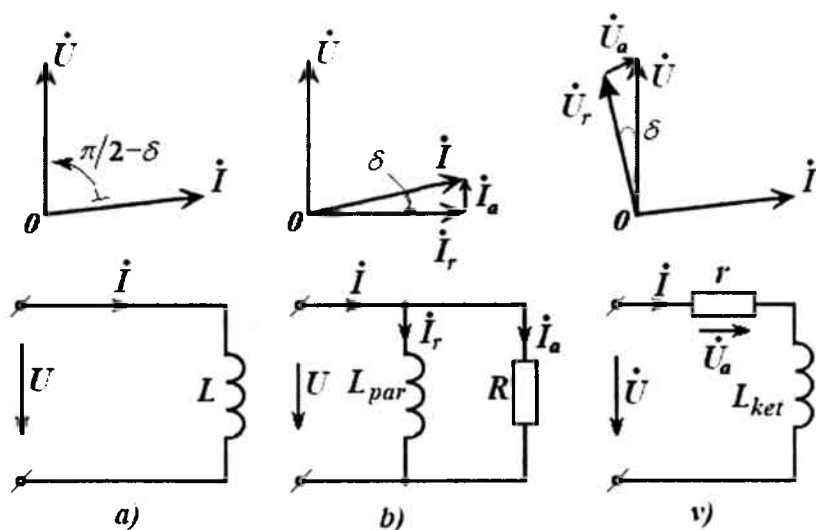
6.16-rasm. G'altak chulg'ami metall o'zakka o'ralgan.

Uyurma toklar ta'sirini kamaytirishning yana bir yo'li - ferromagnetiklarning solishtirma elektr qarshiligini oshirishdir. Transformatorlarda va o'zgaruvchan tokli mashinalarda qo'llanuvchi elektrotexnik po'lat tunukachalari po'latning boshqa turlariga nisbatan kattaroq solishtirma qarshilikka ega. Solishtirma qarshiliklari yarim o'tkazgichlar va izolyatorlar solishtirma qarshiliklariga yaqin bo'lgan nometall ferromagnetiklar - ferritlar ham qo'llaniladi. Bunday materiallarda uyurma toklar deyarli bo'lmaydi; biroq feritlarda ham magnetlanishning kechikishini

ko'rish mumkin. Uning magnit singdiruvchanligi qanchalar katta bo'lsa, bu kechikish shunchalar ko'proq bo'ladi.

Yuqorida keltirilgan fikrlar bilan chegaralanib, ferromagnit o'zakli induktiv g'altakning vektor diagrammasidan (6.17,*a*-rasm) kelib chiqadigan ba'zi xulosalarga to'xtalamiz.

Ferromagnit o'zagi bo'lgan induktivlik g'altagi hamda uning kuchlanishi va toki vektor diagrammasi 6.17,*a*-rasmga keltirilgan. 6.17,*b*-rasmga esa toki aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarga ajratilgan vektor diagramma ko'rsatilgan; shu yerda ikki parallel shoxobchalari bo'lgan ekvivalent sxema ham keltirilgan: tokning aktiv tashkil etuvchisi oqishi faraz qilinayotgan $R=1/G$ aktiv qarshilik; tokning reaktiv tashkil etuvchisi oqishi taxminlanayotgan L_{par} sof reaktiv shoxobchasi. 6.17,*v*-rasmga kuchlanishi aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarga ajratilgan vektor diagrammasi hamda ketma-ket ulangan r va L_{ket} elementli ekvivalent sxemasi keltirilgan.



6.17-rasm. Ferromagnit o'zakli induktiv g'altakning vektor diagrammasi.

6.17-rasmga qurilgan barcha almashtirish sxemalari va diagrammalar 6.14-rasmga keltirilgan almashtirish sxemalari va

diagrammalariga o'xshashdir. Har bir almashtirish sxemasida U, I, δ, Q_L va sarflanayotgan quvvat bir xildir [(6.42) ga qarang].

Parallel va ketma-ket almashtirish sxemalarining parametrlari uchun keltirilgan bog'lanishlar ham [(6.20) va (6.21) ga qarang] o'zgarishsiz bo'ladi.

Parallel almashtirish sxemasida (6.17, a-rasm)

$$\operatorname{tg} \delta = 1 / Q_L = I_a / I_p = \omega L_{par} / R; \quad (6.53)$$

$$\omega L_{par} = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} x U / I; \quad (6.54)$$

$$R = \frac{U}{I} \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}{\operatorname{tg} \delta} \quad (6.55)$$

Parallel va ketma-ket ekvivalent sxemalardagi (6.17-rasm) parametrlarni taqqoslab quyidagilarni aniqlaymiz.

$$L_{ket} = L_{ket} (1 + \operatorname{tg}^2 \delta), \quad (6.56)$$

$$r = R \operatorname{tg}^2 \delta / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta). \quad (6.57)$$

Agar $\operatorname{tg} \delta < 0,1$, ya'ni $Q_L > 10$ bo'lsa, u holda 1% dan kichik bo'lgan hatolik uchun quyidagicha yozish mumkin:

$$L_{par} = L_{ket}; \quad r = R \cdot \operatorname{tg}^2 \delta. \quad (6.58)$$

Real induktivlik g'altaklarida asllik o'nlab va yuzlab birliklarga teng bo'ladi. Agar g'altak o'tkazgichiari ekspluatatsiyasi jarayonida qizishidan muhofaza qilib sovutilsa yoki simlarni o'ta o'tkazuvchanlik darajasiga yetkazilsa (bu hozirgi zamon ilm va texnikasi uchun bajarish imkoni bor masaladir), u holda asillikning qiymatini yana ham oshirish mumkin.

O'zakda magnit qutblanishi bo'lgan holat uchun, ilgari kondensator uchun ko'rilgandek (6.50), induktivlikni chastotaga bog'liq bo'lgan kompleks qiymat deb qaralsa, ba'zan tajribaga yaqin natijalarga erishish mumkin.

$$L = L e^{-j\delta} = L_0 / (1 + j\omega\tau) \quad (6.59)$$

Chastotaga bog'liq bo'lgan L , r , C parametrli zanjirda rezonans. Bunday zanjirlarning parallel va ketma-ket ulangan konturlarida rezonans sodir bo'lishi mumkin. Biroq, kontur asosiy parametrlarining chastotaga bog'liqligi, yuqorida ko'rilgan

parametrlari o'zgaras zanjirlardagi rezonansni ifodalovchi asosiy bog'lanishiarni tubdan o'zgarib yuboradi. Ularga o'xshash, zanjirning barcha yangi xususiyatlari chastotaviy tavsiflar bevosita kiritilgan tenglamalarni tahlil qilish natijasida osongina keltirib chiqariladi.

Avvalo, shuni ma'lum qilish kerakki, tok va kuchlanishning chastotaga bog'liqligi uchun yuqorida keltirib chiqarilgan ba'zi ifodalarni ushbu holat uchun mutlaqo qo'llab bo'lmaydi; masalan, rezonans chastotasi va asillikni rezonans tavsifining kengligi bo'yicha aniqlashni qo'llab bo'lmaydi. Aksincha, chastotani o'zgarishsiz qoldirib va sig'imning berilgan qiymatini o'zgartirish bilan avval keltirib chiqarilgan ifodalardan foydalanib, o'lchangan $U_S / U_{S,max}$ qiymatlar yordamida asillikni ham, konturning induktivligini $L(\omega)$ ham aniqlash mumkin. Chastotaning har xil qiymatlari uchun shunday o'lchovlarni amalga oshirib Q va L yoki r va L qiymatlarning chastotaga bog'liqligini aniqlash mumkin. Shunga o'xshash o'lchovlarni $S(\omega)$ li kondensator uchun ham bajarish mumkin.

Yakuniy xulosalar. 1. Real elementlarning chastotaviy tavsiflarini tahlil qilishda, biz ular tarkibida o'zgaras L , r , C bo'lgan ikki qutbliklar mavjud deb tasavvur qildik. Ko'pgina holatlarda ushbu uslub chastotaning ma'lum diapazonida real ikki qutblikning tavsiflari bilan mos keladi. Biroq, barcha holatlarda ham bunday o'xshatishlarni faqat $Y(j\omega)$ funksiyasini cheklangan ko'p hadlik bilan shartli almashtirish deb qarash mumkin. Ba'zan $Y(j\omega)$ tavsiflarni transsendent funksiyalar deb qabul qilinadi. Bunday funksiyani darajali qatorga yoyib, bir necha birinchi hadlari bilan qanoatlanib, cheklangan sonli L , r , C ga ega bo'lgan elektr zanjirini aniqlash mumkin; bunda, albatta, zanjir chastotaviy tavsiflari cheklangan diapazonda ushbu qator hadlariga mos keladi, deb qaraladi.

2. Umumiy holatda, berilgan chastotaviy tavsiflarga ega bo'lgan ikki qutblik (yoki to'rt qutblik)ni hosil qilish uchun L , r , C elementli sxemani tuzish va uning parametrlarini aniqlash, elektr zanjirlarini sintez qilishning asosiy muammolarini tashkil etadi.

3. Kuchlanish U ning qiymati, na faqat tok I ning qiymatiga bog'liq bo'ladi, balki har xil hosilalarga, ba'zan esa, o'zining

funksiyasi integraliga, ya'ni $\int u dt$ ga ham bog'liq bo'lishi mumkin deyilgan edi. Hususan $j\omega$ hosilani, $1/j\omega$ esa integralni ifodalashini esga olsak, (6.59) dan quyidagini aniqlash mumkin bo'ladi:

$$\dot{U} = \dot{I} j\omega L = \dot{I} L_0 j\omega / (1 + j\omega\tau)$$

yoki

$$\dot{U}(\tau + 1/j\omega) = \dot{I} L_0$$

Oxirgi tenglikka oniy qiymatlar uchun yozilgan quyidagi tenglama mos keladi:

$$u = \frac{L_0}{\tau} i - \frac{1}{\tau} \int u dt \quad (6.60)$$

6.6. Zanjirning uzatish funksiyasi

Yuqorida keltirilgan L , r , C ketma-ket kontur, L , r , C parallel kontur va reaktiv ikki qutbliklar uchun qurilgan (6.2,a, 6.3, 6.7,a, 6.9,a va 6.10,b-rasmlar) chastotaviy tavsiflar elektr zanjiri u yoki bu xususiyatlarining chastotaga bog'liq ekanligini ko'rsatadi. Shunga o'xshash tavsiflar, na faqat zanjir tahlili uchun, balki elektr zanjirini sintez qilish masalalarini yechishda ham qo'llaniladi.

Umumiy holda zanjirning chastotaviy xususiyatlari haqida zanjirning uzatish funksiyasi deb (uzatish koeffitsiyenti yoki amplituda-faza tavsifi) nomlangan tavsifi yordamida fikr yuritiladi. *Uzatish funksiyasi* $H(j\omega) = H(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$ deyilganda, *zanjir uchun chiquvchi qiymat deb qabul qilingan kattaliklardan (masalan, zanjir toki, biror aism kuchlanishlari) dan birining, berilgan kirish qiymatiga nisbati tushuniladi.*

Uzatish funksiyasi modulining chastotaga bog'liqligi, ya'ni $H(\omega)$ ni *amplituda-chastota tavsifi*; argumentining chastotaga bog'liqligi $\varphi(\omega)$ ni *faza-chastota tavsifi* deyiladi. Masalan, 6.2,a-rasmdagi har bir rezonans egri chizig'ini ketma-ket konturning berilgan Q parametri va berilgan kirish qiymati, ya'ni rezonans toki I_{max} ning ma'lum qiymati uchun amplituda-chastota tavsifi $N(\omega)$ deb qarash mumkin.

Ushbu kontur (6.1,a-rasm) uchun tokning kompleks shaklda yozilishi quyidagicha bo'ladi:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{r + j(\omega L - 1/\omega C)} = \frac{\dot{U}}{r} \frac{1}{1 + jQ(\eta - 1/\eta)} \quad (6.61)$$

va rezonans ($\eta = 1$) bo'lgandagi qiymati

$$\dot{I}_{\max} = \dot{U}/r,$$

ya'ni, uzatish funksiyasi

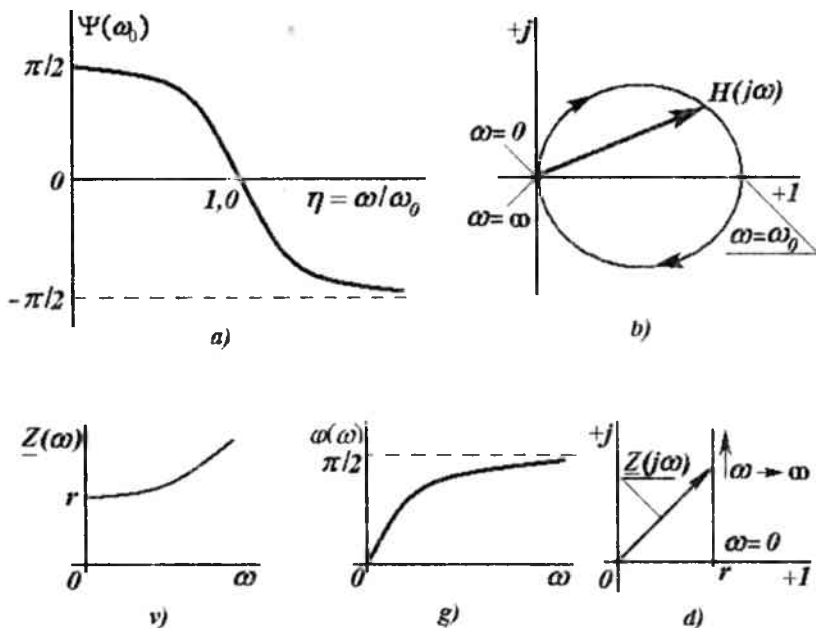
$$H(j\omega) = H(\omega)e^{j\psi(\omega)} = \frac{\dot{I}}{\dot{I}_{\max}} = \frac{1}{1 + jQ(\eta - 1/\eta)} = \frac{1 - jQ(\eta - 1/\eta)}{1 + Q^2(\eta - 1/\eta)^2}. \quad (6.62)$$

Faza-chastota tavsifi 6.18,a-rasmda keltirilganidek, $H(j\omega)$ ning mavhum tashkil etuvchisini haqiqiy tashkil etuvchisiga nisbati kabi olib

$$\operatorname{tg} \Psi(\omega) = -Q(\eta - 1/\eta), \quad (6.63)$$

qurish mumkin.

Chastotaviy tavsiflarni aksariyat, $H(j\omega)$ vektori uchining kompleks maydonidagi geometrik o'rni - godograf deb qabul qilinadi, bunda, $j\omega$ qiymatni bog'liq bo'lmagan o'zgaruvchi deb hisoblanadi. Ketma-ket konturning godografi (uning amplituda-faza tavsifi) 6.18,b-rasmda keltirilgan.



6.18-rasm. Faza-chastota tavsif.

Zanjirning kirish qarshiligi yoki kirish o'tkazuvchanligi, uzatish funksiyalarining hususiy hollaridan biri sifatida ko'rilishi mumkin. Masalan, 6.17, v-rasmdagi almashtirish sxemasi uchun g'altakning kirish qarshiligi

$$\underline{Z}(j\omega) = \dot{U} / \dot{I} = r + j\omega L_{ket}$$

ga teng.

Amplituda-chastota tavsifi $z(\omega) = \sqrt{r^2 + (\omega L_{ket})^2}$, faza-chastota tavsifi $\varphi(\omega) = \arctg(\omega L_{ket} / r)$ va godografi 6.18, v-d-rasmlarda keltirilgan.

Agar uzatish funksiyasi o'lchovsiz (masalan, $H(j\omega) = \dot{I} / \dot{I}_{max}$) bo'lsa, u holda logarifmik amplituda-chastota tavsifini (LAT) quyidagicha aniqlash mumkin:

$$\ln H(j\omega) = \ln [H(\omega) e^{j\Psi(\omega)}] = \ln H(\omega) + j\Psi(\omega) \quad (6.64)$$

Neper va desibel. Ikki qiymatlar nisbati $x = u/u_0$ ni ular logarifmi $\ln x$ yordamida o'lchash qulaydir; bu uzatish funksiyasi moduli $H(\omega)$ ga va boshqa o'lchovsiz qiymatlarga taalluqlidir. Natural logarifm N ga teng (masalan, $\ln x H = N$) bo'lsa, ko'rilayotgan qiymat (yoki nisbat) N neperga teng deb hisoblanadi. Agar H ning qiymati $y_e = 2,72$ ga teng bo'lsa, uning qiymati 1 neper (Hp) ga teng deb qabul qilinadi. Ba'zan $\ln x H$ o'rniga boshqa logarifm o'lchovini, $20 \lg H$ ni kiritiladi. Bu qiymatning birligi desibel (dB). Agar $\lg H = 1/20$ bo'lsa N ning qiymati $1 dB$ ga teng bo'ladi. $1 dB = 0,115 Np$; $1 Nn = 8,7 dB$.

Chastotalar shkalasi. Uni, aksariyat, logarifmik masshtabda qurlladi. Chastota ikki marta ortishiga to'g'ri keluvchi chastota intervali – oktava deyiladi, o'n marta ortishga esa dekada deyiladi. Chastotaning ω_1 dan ω_2 gacha o'zgarish intervali uchun oktavalar soni

$$\eta_0 = \log_2(\omega_2 / \omega_1) = 3,32 \lg(\omega_2 / \omega_1) \quad (6.65)$$

va dekadalar soni

$$\eta_A = \lg(\omega_2 / \omega_1) \quad (6.66)$$

ya'ni 1 dekada = 3,32 oktava.

7. ELEKTR ZANJIRLARIDA O'ZARO INDUKTIVLIK

7.1. O'zaro induktiv bog'langan elementli zanjirlar

Yuqorida tarkibida faqat L , r va C elementlari bo'lgan zanjirlarning nazariy va amaliy masalalarini ko'rilgan edi, bu esa ta'riflashni va o'zlashtirishni ancha soddalashtirgan edi. Ushbu bobda boshqa elementlar bilan birga shoxobchalari va konturlari orasida o'zaro induktiv bog'lanishda bo'lgan zanjirlar masalalari ko'riladi. O'zgaruvchan tok zanjirlari konturlari orasida induktiv bog'lanishlarning mavjudligi alohida hususiyatli qurilmalar paydo bo'lishiga sabab bo'ldi. Bunday qurilmalar qatoriga, birinchi navbatda, transformatorlar kiradi. § 7.3 elektr zanjiri elementlaridan biri bo'lgan transformatorlar nazariyasiga bag'ishlangan.

Yuqorida keltirilgan elektr zanjirlari nazariyasiga taalluqli bo'lgan ko'rsatmalarni o'zaro induktiv bog'langan zanjirlarga tadbiq etish masalasi biroz qo'shimchalar kiritishni talab qiladi.

Biror elektr zanjirining ikki konturi [1 raqamli birinchi kontur (7.1, a-rasm) va 2 raqamli ikkinchi kontur] etarli darajada yaqin joylashganda, bir konturning magnit maydoni ikkinchi konturga ta'sir etadi.

Natijada, faqat birinchi konturdan oqayotgan tokka ($i_1 \neq 0$; $i_2 = 0$) proporsional bo'lgan magnit oqimiga ikkinchi kontur ham ilashadi.

$$\psi_{21} = M_{21} \cdot i_1 \quad (7.1)$$

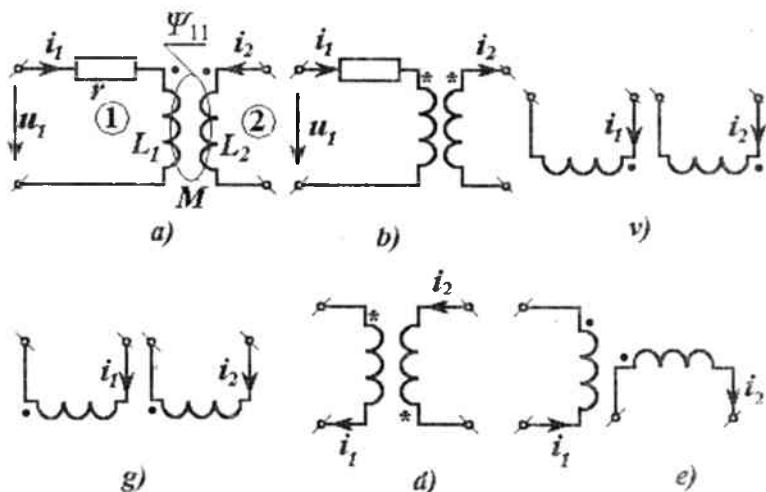
Bunda, birinchi kontur bilan ilashgan magnit oqim Ψ_{11} qiymati shu kontur toki va chulg'am induktivligi L_1 ning ko'paytmasiga teng.

$$\psi_{11} = L_1 \cdot i_1. \quad (7.2)$$

Shunga o'xshash, faqat ikkinchi konturda i_2 tok mavjud bo'lsa, birinchi kontur bilan ilashgan oqim.

$$\psi_{12} = M_{12} \cdot i_2 \quad (7.3)$$

ga teng bo'ladi.



7.1-rasm. O‘zaro induktiv bog‘langan zanjirlar.

Ikkinchi konturning oqim ilashuvi

$$\psi_{22} = L_2 \cdot i_2. \quad (7.4)$$

Ushbu mavzu ikki konturning «yetarli darajada yaqin joylashganligi» haqida eslatish bilan boshlagan edi; buni qanday tushunmoq kerak?

Ikki konturning bir biridan uzoqlashishi natijasida ularning magnit bog‘langanligi kamayib, zanjirning tahlilida $M_{21} \cdot i_1$ va $M_{12} \cdot i_2$ tashkil etuvchilarni e‘tiborga olmasa ham bo‘ladi; agar bu tashkil etuvchilarni e‘tiborga olmaslik mumkin bo‘lmasa, demak, konturlar yetarlik darajada yaqin joylashgan bo‘ladi.

Agar faqat birinchi konturda tok o‘zgarayotgan bo‘lsa, ikkinchi konturda induktivlanayotgan e.yu.k. quyidagiga teng bo‘ladi:

$$e_2 = -d\psi_{21} / dt = -M_{21} di_1 / dt. \quad (7.5)$$

Shunga o‘xshash, agar tok faqat ikkinchi konturda o‘zgarsa, birinчисida quyidagi e.yu.k. induktivlanadi.

$$e_1 = -d\psi_{12} / dt = -M_{12} di_2 / dt. \quad (7.6)$$

Mana shu hodisa o‘zaro induksiya hodisasi deb ataladi, bunda proporsionallik koeffitsiyenti

$$M_{12} = M_{21} = M \quad (7.7)$$

o'zaro induksiya yoki *o'zaro induktivlik ko'effitsiyenti* deyiladi. Ifoda (7.7)dagi *o'zaro ta'sir*, fizika kursidan ma'lum bo'lib, induktiv bog'langan konturlarning energiyalari bog'lanishidan kelib chiqadi. *O'zaro induktivlik* M xususiy induktivlik L ga o'xshab genri (G) da o'lchanadi.

Agar tok birinchi konturda ham, ikkinchi konturlarda ham (chulg'amlarda, shoxobchalarda, g'altaklarda) oqayotgan bo'lsa, to'la magnit ilashuvi hususiy induktivlik va *o'zaro induktivlik* hosil qilgan magnit ilashuvlarining algebraik yig'indisiga teng bo'ladi.

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= \psi_{11} + \psi_{12} = L_1 \cdot i_1 + M_{12} i_2; \\ \psi_2 &= \psi_{22} + \psi_{21} = L_2 \cdot i_2 + M_{21} i_1 \end{aligned} \right\} \quad (7.8)$$

bunda, ψ_1 va ψ_2 - birinchi va ikkinchi konturlarning to'la magnit ilashuvlari.

Ushbu bog'lanishlar yozilishida quyidagi farazlar qabul qilingan: har bir kontur musbat tokidan hosil bo'lgan magnit ilashuvlari ikkinchi konturdagi musbat tok ortganda ortadi. Ushbu fikrlar toklar musbat yo'nalishlarini tanlashda ma'lum talablar qo'yilishiga sabab bo'ladi.

Yuqorida bir necha marta ta'kidlanganidek, radiotexnik va elektrotexnik tizinni elektr zanjiri deb tan olish uchun, uning tugunlari orasidagi kuchlanishlar ular orasidagi potensiallar farqiga teng bo'lishi zarur. Shuning uchun *o'zaro induksiyali* zanjirlarda e.yu.k. ning hosil bo'lishi ushbu shartni mutlaqo buzmaydi deb hisobiashimiz zarur; e.yu.k. zanjirning biror elementida masalan, induktivlik g'altagida lokallashadi, xolos.

Tarkibida shunday tugunlari bo'lgan zanjirlar mavjudki, keltirilgan fikrlar ular uchun mutloqo noo'rindir. Bunday tugunlar bizning e'tiborimizni qaratmaydi.

Induktiv bog'langan elementlar qutublarini belgilash.
O'zinduksiya magnit ilashuvi $L_1 \cdot i_1$ (yoki $L_2 \cdot i_2$) ga *o'zaro induktivlik* $M \cdot i_2$ (yoki $M \cdot i_1$) magnit ilashuvining algebraik qo'shillshi ishorasini aniqlash uchun, induktiv bog'langan elementlar klemmalarining boshi yoki ketini bilish zarur. Bunda L_1, L_2 va M ko'effitsiyentlari musbat ishorali deb hisoblanadi.

Odatda, o'zaro induktiv bog'langan elementlardan birining bir klemmasi ixtiyoriy ravishda «boshi» deb qabul qilinadi va sxemada uning oldiga yulduzcha yoki harfli belgi, ko'pincha qalin nuqta qo'yiladi (7.1-rasmlar). Ikkinchi elementning boshiga belgi shunday joylashtiriladiki, unda i_1 va i_2 toklar ushbu belgilangan klemmalarga nisbatan bir hil yo'naltirilganda, o'zaro induksiya natijasida har bir induktiv bog'langan elementning magnit ilashuvi ortsin (7.1.a,v,g-rasmlar).

Ushbu belgilashlarni hisobga olib, magnit ilashuv quyidagicha aniqlanadi:

$$\psi_1 = L_1 \cdot i_1 + M \cdot i_2; \quad \psi_2 = L_2 \cdot i_2 + M \cdot i_1. \quad (7.9)$$

Agar ikki shoxobchalardagi toklar har xil yo'nalishda belgilangan bo'lsa (7.1.b,d,ye-rasmlar), har bir elementning magnit ilashuvi quyidagicha aniqlanadi:

$$\psi_1 = L_1 \cdot i_1 - M \cdot i_2; \quad \psi_2 = L_2 \cdot i_2 - M \cdot i_1. \quad (7.10)$$

Magnit maydonlarning yo'nalishlari haqidagi ma'lumot bo'lmagan holda, belgilashni induktivlangan kuchlanishlarni o'lchash yo'li bilan aniqlash mumkin: belgilarga nisbatan toklar yo'nalishlari bir xil bo'lganda, o'zinduksiya kuchlanishi

$$u_{L1} = L di_1 / dt \text{ yoki } \dot{U}_{11} = L_1 j\omega \dot{I}_1, \quad (7.11)$$

o'zaro induksiya kuchlanishi $M di_2 / dt$ yoki $M di_1 / dt$ bilan qo'shilish zarur

$$\left. \begin{aligned} u_{(L,M)1} &= L_1 di_1 / dt + M di_2 / dt \\ u_{(L,M)2} &= L_2 di_2 / dt + M di_1 / dt \end{aligned} \right\} \quad (7.12)$$

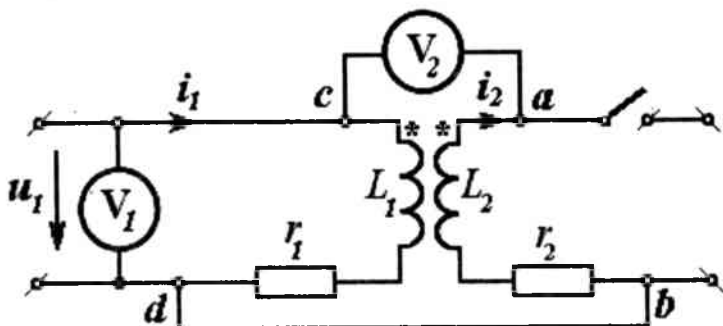
va shunga o'xshash

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{(L,M)1} &= L_1 j\omega \dot{I}_1 + M j\omega \dot{I}_2 \\ \dot{U}_{(L,M)2} &= L_2 j\omega \dot{I}_2 + M j\omega \dot{I}_1 \end{aligned} \right\} \quad (7.13)$$

Yuqorida keltirilgan fikrlar (7.9) bog'lanishdan kelib chiqadi, chunki toklarning muvofiq ravishda yo'naltirilishida magnit ilashuvlar $L_1 di_1 / dt$ va $M di_2 / dt$ o'zgarishi natijasida bir xil yo'nalgan e.yu.k.lar hosil bo'ladi.

Aksincha, i_1 va i_2 toklarning berilgan klemmalarga nisbatan yo'nalishlari har xil bo'lsa, u holda kuchlanishlar quyidagicha aniqlanadi:

$$\left. \begin{aligned} u_{(L,M)1} &= L_1 di_1 / dt - M di_2 / dt \\ u_{(L,M)2} &= L_2 di_2 / dt + M di_1 / dt \end{aligned} \right\} \quad (7.14)$$



7.2-rasm. Ikki induktiv bog'langan shoxobcha.

7.1,a va b-rasmlardagi induktiv bog'langan konturlarning birinchi shoxobchasida aktiv qarshilik ham keltirilgan. Shuning uchun 7.1,a-rasm kuchlanishlari quyidagicha aniqlanadi

$$u_1 = i_1 r + L_1 di_1 / dt + M di_2 / dt \quad (7.15)$$

7.1,b-rasmda esa

$$u_1 = i_1 r + L_1 di_1 / dt - M di_2 / dt. \quad (7.16)$$

Misol. 7.2-rasmda ikki induktiv bog'langan shoxobcha keltirilgan. Ularning biridan $\dot{I}_1$ toki oqadi, ikkinchisidagi tok nolga teng ($\dot{I}_2=0$).

Birinchi elementning klemmalari orasidagi kuchlanish V_1 voltmetr bilan o'lchanadi va uning ko'rsatkichi 120V ga teng. Ikkinchi elementning klemmalaridan biri (b) o'tkazgich yordamida birinchi elementning d klemmasi bilan ulangan. Ikkala elementning qolgan klemmalari (a va s) orasiga voltmetr V_2 ulangan va 175V qiymatni ko'rsatmoqda. Birinchi elementning s klemmasiga «boshi» belgisi (yulduzcha) qo'yilgan.

Ikkinchi elementning qaysi klemmasiga «boshi» belgisi (yulduzcha)ni qo'yish zarur.

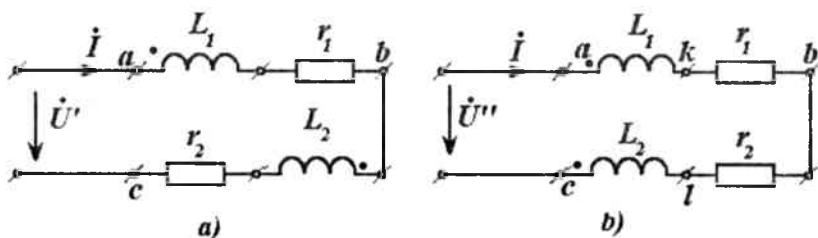
Eslatma: Barcha r , L , M parametrlar musbat ishorali deb hisoblanadi.

Yechish. Belgi (yulduzcha) «b» qisqichga qo'yish kerak, chunki, *sdba* konturga «ko'z yuritib» chiqqanimizda shuni ko'ramizki, $\dot{\varphi}_c$ potensial $\dot{\varphi}_a$ potensialidan quyidagi qiymatga yuqoriroqdir.

$$(jL_1 + r_1) \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_1 = [j\omega(L_1 + M) + r_1] \dot{I}_1 = \dot{U}_{ca}$$

Birinchi elementdagi kuchlanishlar pasayuvi $j\omega L \dot{I}_1$ ning ishorasi ikkinchi elementdagi $j\omega M \dot{I}_1$ kuchlanishlar pasayuvi ishorasi bilan bir xil, chunki ikkala holatda ham «ko'z yurituv» belgidan boshlangan, shuning uchun magnit ilashuvi $L \cdot \dot{I}_1$ va $M \cdot \dot{I}_1$ hamda ularning hosilalari bir hil ishoraga ega bo'ladilar. Boshqacha fikr yuritish ham mumkin, masalan.: $U_2 > U_1$ bo'lgani uchun $L_1 + M > L_1$ bo'ladi.

Ikki induktiv bog'langan zanjirlarni ketma-ket ulash. Bu holda induktiv elementlarni «mos» (7.3,a-rasm) yoki «qarama-qarshi» (7.3,b-rasm) ulanganliklarining farqini ko'rish zarur.



7.3-rasm. Ikki induktiv bog'langan zanjirlarni ketma-ket ulashi.

Mos ulanish ko'rilayotgan tok ikkala induktiv elementda belgilangan klemmalarga nisbatan bir xil yo'nalgan (7.3,a-rasmdagi), ya'ni ikkala elementning belgilangan klemmalarga tok kiradi; «qarama-qarshi» ulanganda ikkala element belgilangan klemmalarga nisbatan tok har xil yo'naltirilgan.

Shuning uchun, konturga «ko'z yugurtirilgan»da shu ma'lum bo'ladiki, mos ulanganda tenglama quyidagicha yoziladi:

$$\dot{U}' = [j\omega(M + L_1) + r_1]\dot{I} + [j\omega(M + L_2) + r_2]\dot{I}. \quad (7.17)$$

Bu tenglikda hadlar ataylab shunday ajratilganki, unda tokning birinchi kvadrat qavsdagi qiymatga ko'paytmasi birinchi elementdagi kuchlanish $\dot{U}_{ab}$ ga teng; keyingi had - ikkinchi elementdagi kuchlanish $\dot{U}_{bc}$ ga teng bo'lsin.

Qarama-qarshi ulangan konturlar uchun tenglama boshqacha yoziladi.

$$\dot{U}'' = [j\omega(-M + L_1) + r_1]\dot{I} + [j\omega(-M + L_2) + r_2]\dot{I}. \quad (7.18)$$

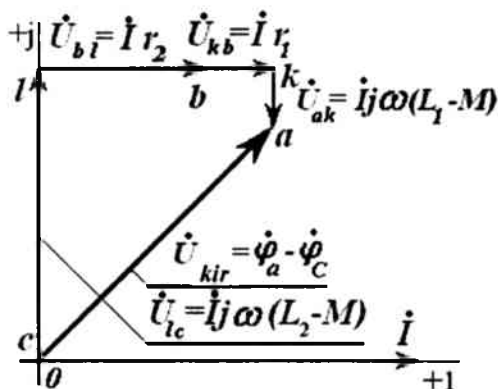
Oxirgi tenglamada ham yuqorida qayd qilingan hadlarga ajratish uslubi qo'llanilgan. Zanjirning parametrlari ($\omega L_k, \omega M, r_k$) va kirish kuchlanishi berilgan vaziyat uchun tokni aniqlash zarur bo'lganda, tabiiyki, tokning barcha ko'paytuvchilari birga guruhlangan bo'lishi zarur.

$$\dot{U}' = \dot{I} \cdot [j\omega(L_1 + L_2 + 2M) + r_1 + r_2] \quad (7.19)$$

$$\text{va} \quad \dot{U}'' = \dot{I} \cdot [j\omega(L_1 + L_2 - 2M) + r_1 + r_2] \quad (7.20)$$

Kvadrat qavslar ichida zanjirning kompleks qarshiliklari joylashgan.

Ular kompleks qarshiliklarining ishoralari har xil ekanligini belgilash uchun asos bo'lishi mumkin.



7.4-rasm. Topografik diagramma.

Misol. 7.3, *b*-rasm sxemasi uchun a , k , b ; l , s tugunlarning potentsiallariga mos keladigan nuqtalarni kompleks maydonda ko'rsatib, topografik diagrammasini quring.

Berilgan: $\omega L_1 = 20\Omega$; $\omega L_2 = 60\Omega$; $\omega M = 30\Omega$; $r_1 = 10\Omega$; $r_2 = 20\Omega$.

Yechish: Misolning shartlarida na kuchlanish va na tokning qiymatlari ko'rsatilgan emas. Biroq, bu topografik diagramma qurish uchun to'siq bo'la olmaydi. Agar $\dot{U}^*$ va $\dot{I}$ qiymatlari berilgan bo'lsa, diagrammaning faqat masshtablari o'zgaradi xolos.

Yuqorida eslatilganlardan shu ma'lum bo'ladiki, diagrammani oxiridan boshiab qurish maqsadga muvofiq. Tok va S nuqta potentsiali qiymatlarini ixtiyoriy tanlab (masalan, $\dot{I} = 1A$ va $\dot{\varphi}_c = 0$), ℓ nuqtaning potentsialini aniqlaymiz.

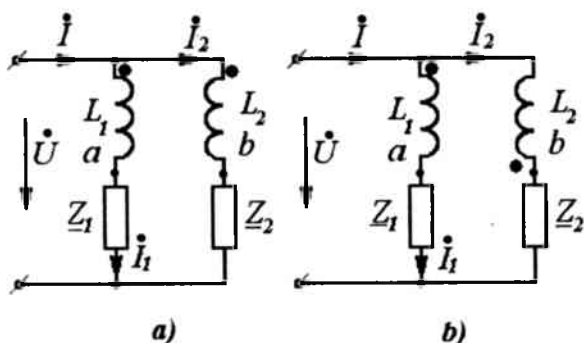
$$\dot{\varphi}_\ell = \dot{I} j\omega(L_2 - M) = j30 \text{ V};$$

so'ngra b nuqtaning potentsialini aniqlaymiz.

$$\dot{\varphi}_b = \dot{\varphi}_\ell + \dot{I} r_2 = j30 + 20 \text{ V}.$$

Shu usulni qo'llab, 7.4-rasmda keltirilgan diagrammani quramiz (bunda misol ko'rgazmali bo'lishi uchun macshtabga rioya qilinmagan).

Ikki parallel induktiv bog'langan shoxobchalar. Bu holatda ham shoxobchalarni mos (7.5, *a*-rasm) va qarama-qarshi (7.5, *b*-rasm) ulash farqlarini e'tiborga olish zarur; mos ulanganda ikki shoxobchadagi toklar bir xil belgilangan klemmalarga kiradilar; qarama-qarshi ulanganda esa, blr shoxobchaga tok belgilangan klemma orqali kirsa, ikkinchi shoxobchada esa belgilangan klemmadan tok chiqadi. Soddalashtirilgan holda uchchala toklarning qiymatlarini aniqlash uchun uchta tenglamalar tizimining yechimi aniqlanadi.



7.5-rasm. Ikki parallel induktiv bog'langan shoxobchalar.

$$\left. \begin{aligned} I &= I_1 + I_2; \\ \dot{U} &= \dot{I}_1 \underline{Z}_{11} + \dot{I} j\omega M; \\ \dot{U} &= \dot{I}_1 j\omega M + \dot{I}_2 \underline{Z}_{22}, \end{aligned} \right\} \quad (7.21)$$

bunda, $\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + j\omega L_1$ va $\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_2 + j\omega L_2$.

Tenglamalar tizimining keyingi ikkitasi induktiv bog'lanishi bo'lmagan shoxobchalar parallel ulanganidan shu bilan farq qiladiki, ularning har birida ikkitadan toklar qatnashmoqda. Bu tenglamalarni yechib, quyidagilarni aniqlaymiz:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U} (\underline{Z}_{22} - j\omega M) / \xi^2; \\ \dot{I}_2 &= \dot{U} (\underline{Z}_{11} - j\omega M) / \xi^2; \\ \dot{I} &= \dot{U} (\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{22} - 2j\omega M) / \xi^2 \end{aligned} \right\} \quad (7.22)$$

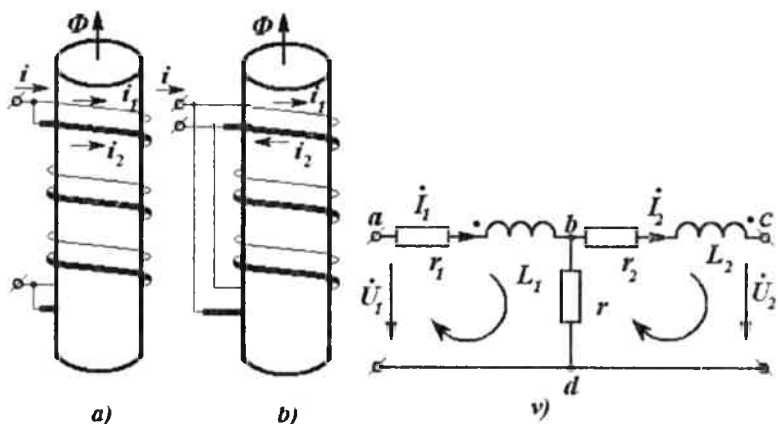
bunda, $\xi^2 = \underline{Z}_{11} \underline{Z}_{22} - (j\omega M)^2$. (7.23)

Ikki mos parallel ulangan shoxobchalarning kirish qarshiligi

$$\underline{Z}_{kr} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{\underline{Z}_{11} \underline{Z}_{22} + (\omega M)^2}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{22} - 2j\omega M} \quad (7.24)$$

Konturlar orasida induktiv bog‘lanish mavjud bo‘lmasa, ilgari ma’lum bo‘lgan tenglik kelib chiqadi.

Qarama-qarshi ulanganda (7.5,b-rasm) faqat M oldidagi ishora o‘zgartiriladi, natijada kirish qarshiligining reaktiv tashkil etuvchisi kamayadi. 7.5-rasmda mos (a) va qarama-qarshi (b) parallel ulangan shoxobchalar keltirilgan; bunda tugunlarning belgilari aniq holatda keltirilmagan. Bundan shuni tushunsa bo‘ladiki, qarama-qarshi yo‘nalgan (ulangan) toklar umumiy F magnit maydonini kamaytiradi.



7.6-rasm. Ikki elementli oddiy parallel-ketma-ket zanjirlar.

Ikki elementli oddiy parallel-ketma-ket zanjirlar. Bunday zanjirlar 7.6,v-rasmda keltirilgan. Kirxgofning qonunlariga muvofiq tenglamalar qurib, kuchlanishlar $\dot{U}_1$ va $\dot{U}_2$ berilgan deb hisoblab, ikki kontur toklari uchun ikki tenglamalar tizimini tuzamiz.

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \underline{Z}_{11} \dot{I}_{11} + \underline{Z}_{12} \dot{I}_{22}; \\ -\dot{U}_2 &= \underline{Z}_{21} \dot{I}_{11} + \underline{Z}_{22} \dot{I}_{22}, \end{aligned} \right\} \quad (7.25)$$

bunda,

$$\underline{Z}_{11} = r_1 + r + j\omega L_1; \quad \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = -r - j\omega M; \quad \underline{Z}_{22} = r_2 + r + j\omega L_2.$$

Umumiy shoxobcha qarshiligining ishorasi $(-r)$ manfiy tanlanishining sababi, unda oqib o‘tayotgan kontur toklari musbat

yo'nalishlarining qarama-qarshi ekanligidir; o'zaro induktivlik qarshiligining ishorasi manfiy ($-M$) olinganligining sababi esa, I_1 va I_2 toklarning belgisi (nuqta bilan belgilangan) klemmalarga nisbatan har xil yo'nalganliklaridir.

Misol. 7.5, v-rasmdagi zanjirda r va r_1 L_1 shoxobchalar o'rinlarini almashtiring; bunda b tugundagi har bir almashinayotgan shoxobchalarning ulanishlari ilgarigidek qoldirilsin; kiruvchi tok I_1 ilgarigidek a nuqtaga kiradi deb hisoblansin; tanlangan (o'zaro induktiv bog'langan) konturlar ilgarigidek qoldirilsin (a, b, d va d, b, s). (7.25) tenglamadagi Z_{11} , Z_{22} , Z_{12} qarshiliklarning yangi qiymatlari aniqlansin.

Yechish. Z_{11} qarshilik o'zgarmaydi. Konturlarning o'zaro qarshiligi Z_{12} endi yangi qiymat qabul qiladi.

$$Z_{12} = -r_1 - j\omega L_1 + j\omega M.$$

Bundan tashqari ikkala induktiv bog'langan elementlardan har xil yo'nalishda oqayotgan I_2 tokli ikkinchi konturning o'zaro qarshiligi ham yangi qiymat qabul qiladi:

$$Z_{22} = r_1 + r_2 + j\omega(L_1 + L_2 - 2M).$$

Ikki induktiv bog'langan konturlar magnit maydoni energiyasi.

Boshlanish ($t=0$) onida $i_1=i_2=0$ shart bajarilgandagi manbadan olinayotgan energiyani hisoblab, ikki induktiv bog'langan konturlarning i_1 va i_2 toklari hosil qilgan magnit maydon energiyasini aniqlashimiz mumkin.

Vaqtning $t=0$ onida manba toki faqat birinchi kontur orqali o'tadi, ikkinchi kontur uzilgan va tok o'tmaydi ($i_2=0$) deb faraz qilamiz. Bu holatda, tokning noldan i_1 gacha bo'lgan t_1 vaqt oralig'ida o'zgarishida birinchi manbadan quyidagi miqdorda energiya uzatiladi:

$$A_1 = \int_0^{t_1} i_1^2 r_1 dt + \int_0^{t_1} i_1 L_1 \frac{di_1}{dt} dt. \quad (7.26)$$

A_1 dan r_1 qarshilikda isrof bo'layotgan energiyani ajratib olsak (birinchi had), birinchi manba magnit maydoni hosil qilishi uchun sarflayotgan energiyani aniqlashimiz mumkin.

$$w_1 = L_1 \cdot i_1^2 / 2.$$

Shunga o'xshasi, t_1 onda yangi manba ikkinchi shoxobchaga ulansin va t_2 vaqtgacha bo'lgan oraliqda undagi tok noldan i_2 gacha o'rtsin. Bunda agar i_1 tok o'zgarmasdan qolsa, u holda ikkinchi manba magnit maydoni hosil qilish uchun quyidagi energiyani uzatishi zarur:

$$w_2 = \int_{i_1}^{i_2} L_2 \frac{di_2}{dt} dt = L_2 i_2^2 / 2.$$

Biroq, birinchi shoxobchada i_2 ortish jarayonida e.y.u.k. induktivlanadi; birinchi shoxobchadagi tok o'zgarmay qolishi ($i_1 = \text{const}$) uchun, na faqat birinchi shoxobchadagi kuchlanishlar pasayuvi ($i_1 r_1$)ni, balki undagi induktivlanayotgan e.y.u.k.ni ham muvozanatlovchi birinchi manba U_1 kuchlanishini saqlab turish zarur.

$$u_1 = i_1 r_1 + M_{12} di_2 / dt,$$

shuning uchun i_2 toki ortishi oralig'ida birinchi manbaning magnit maydoni hosil qilinishi uchun uzatayotgan energiyasi quyidagi tenglik bilan ifodalanadi:

$$w_{12} = \int_{i_1}^{i_2} i_1 u_1 dt - \int_{i_1}^{i_2} i_1^2 r_1 dt = i_1 \cdot \int_{i_1}^{i_2} M_{12} \frac{di_2}{dt} dt = M_{12} i_1 i_2. \quad (7.27)$$

Natijada ikki induktiv bog'langan shoxobchalarda i_1 va i_2 toklari bo'lgandagi magnit maydonining to'la energiyasi

$$w = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M_{12} i_1 \cdot i_2 \quad (7.28)$$

ga teng bo'ladi.

Yuqorida keltirilgan usulni qo'llab, faqat avval ikkinchi shoxobchani manbaga ulab, so'ngra birinchisini manbaga ulab, quyidagi bog'lanishni hosil qiishimiz mumkin.

$$w = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M_{21} i_1 \cdot i_2. \quad (7.29)$$

(7.28) va (7.29) tengliklarning yagona farqi shundan iborat bo'ladiki, birinchisi tarkibida M_{12} koeffitsiyenti (ikkinchi elementda birlik toki bo'lgandagi birinchi elementning magnit ilashuvi koeffitsiyentiga teng) bo'lsa, ikkinchisi tarkibida M_{21} (birinchi elementda birlik toki bo'lgandagi ikkinchi elementning magnit

ilashuvi koeffitsiyentiga teng) mavjud. Ikkala vaziyatda ham zanjirning natijaviy holati bir xil bo'ladi: i_1 va i_2 tokli tizimda magnit maydoni mavjud bo'ladi; uning qiymati faqat berilgan o'tkazgichiarning tuzilishi bilan aniqlanadi.

Ushbu mulohazalar natijasida

$$M_{12} = M_{21} = M \quad (7.30)$$

ekanligiga iqror bo'lish mumkin.

Magnit bog'langanlik koeffitsiyenti. Keltirilgan xulosadan ma'lum bo'ladiki, ikki induktiv bog'langan shoxobchalar (elementlar) energiyasi quyidagicha aniqlanar ekan:

$$w = \frac{1}{2}(L_1 \cdot i_1^2 + L_2 \cdot i_2^2 + 2M_{21}i_1 \cdot i_2). \quad (7.31)$$

Ushbu qiymat toklar orasidagi bog'lanish $i_2 = x \cdot i_1$ ning qanday bo'lishidan qat'i nazar musbat ishorali bo'lishi zarur ekanligi hammaga ayondir. Cheklangan holatlarda energiya w nolga aylanishi mumkin.

Tizimning energiyasi minimal bo'lgandagi holat uchun x qiymatni aniqlaymiz (u musbat yoki manfiy bo'lishi mumkin). (7.31) dagi i_2 o'rniga $x \cdot i_1$ ni qo'yib, quyidagini aniqlaymiz:

$$2w = F(x) = i_1^2 (L_1 + L_2 + 2M \cdot x).$$

$F(x)$ ni x bo'yicha differensiallab va hosilani nolga tenglab, quyidagini aniqlaymiz:

$$2L_2 x + 2M = 0 \quad \text{yoki} \quad x = M / L_2.$$

Bunga mos keluvchi energiyaning minimal qiymati

$$w_{\min} = \frac{1}{2} i_1^2 \left(L_1 + \frac{M^2}{L_2} - 2 \frac{M^2}{L_2} \right) = \frac{1}{2} i_1^2 \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right).$$

Ixtiyoriy L_1 va L_2 uchun energiyaning minimal qiymati noldan kichik bo'la olmasligi ayondir, shuning uchun $M \leq \sqrt{L_1 L_2}$, ya'ni o'zaro induktivlikning moduli induktivlik L_1 va L_2 lar ko'paytmasidan chiqarilgan kvadrat ildizdan har doim kichik bo'ladi. Yoki chegaraviy holatda unga teng bo'lishi mumkin.

Shuning uchun

$$k = M / \sqrt{L_1 L_2} \quad (7.32)$$

nisbat ikki elementning magnit bog'lanish koeffitsiyenti deyiladi; uning qiymati har doim birdan kichik bo'ladi, chegaraviy holatda birga teng bo'lishi mumkin.

Agar ikki g'altak (chulg'am) katta magnit singdiruvchanlikka ega bo'lgan o'zakka o'ralgan bo'lsa, magnit bog'lanish koeffitsiyenti birga yaqin bo'ladi. Bunday sharoitlarda ushbu koeffitsiyent 0,9 dan ham ortadi.

Bir necha induktiv bog'langan elementli zanjir. Ikki induktiv bog'langan elementlar haqida aytilgan barcha fikrlarni uch va undan ko'proq elementli bog'lanishlarga tadbiiq etish oson. Masalan, agar barcha $i_1, i_2, i_3, \dots$ toklar o'zlarining induktiv elementlari belgilangan klemmalariga nisbatan bir xil yo'naltirilgan bo'lsa, bu elementlar har birining magnit ilashuvini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_1 &= M_{11}i_1 + M_{12}i_2 + M_{13}i_3 + \dots; \\ \Psi_2 &= M_{21}i_1 + M_{22}i_2 + M_{23}i_3 + \dots; \\ \Psi_3 &= M_{31}i_1 + M_{32}i_2 + M_{33}i_3 + \dots \end{aligned} \right\} \quad (7.33)$$

Agar toklardan birortasi boshqa yo'nalishda bo'lsa, unda ushbu hadning oldidagi ishora o'rniga teskarisi ($M_{mn}i_n$ o'rniga $-M_{nm}i_n$) qo'yiladi.

Keltirilgan tenglamalar tizimida bir xil indeksli barcha koeffitsiyentlar - mazkur elementlarning induktivligi, ya'ni $M_{11}=L_1$; $M_{22}=L_2$ va h.k. ikki har xil indeksli koeffitsiyentlar - mazkur juft elementlar orasidagi o'zaro induktivliklardir. Bunda, ularning barchasiga ilgari keltirib chiqarilgan tengliklar tadbiiq etilishi mumkin, masalan, $M_{12}=M_{21}$; $M_{31}=M_{13}$ va h.k., ya'ni

$$M_{mn} = M_{nm}.$$

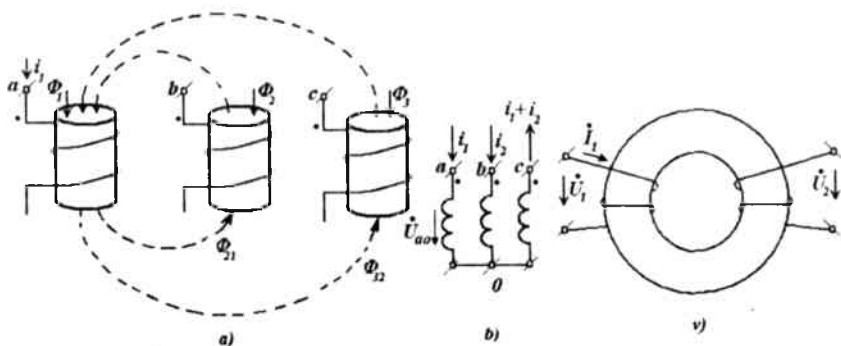
Musbat va manfiy o'zaro induktivliklar. Umumiy holda M_{12}, M_{23} va h.k. o'zaro induktivliklar musbat yoki manfiy ishorali bo'lishi mumkin; algebra qoidalariga binoan, bu ishoralar faqat mazkur son qiymatlari-ning o'rniga qo'yishda amalga oshishi mumkin, masalan, $M_{12} = -0,14 \text{ mHz}$.

Agar elementlar soni faqat ikkita bo'lsa (L_1 va L_2) va ular orasidagi bog'lanish faqat bitta o'zaro induktivlik M bilan ifodalansa, u holda element klemmalarini belgilaganda shunday qilinadiki, koeffitsiyent M musbat ishorali bo'lsin. Umuman olganda, faqat ikki konturdan iborat boshqariluvchi o'zaro induktivlik bo'lganda ham koeffitsiyent M musbat yoki manfiy

ishora qabul qilishi mumkin. Masalan, bir chulg'am ikkinchisiga nisbatan 180° burchakka burila oladigan ikki xalqasimon chulg'amlarda o'zaro induktivlik qiymati berilgan M_0 dan $-M_0$ gacha o'zgarishi mumkin. Bunday holda ham klemmalarini belgilash zarurati yo'qolmaydi.

Bir necha induktiv bog'lanishlar bo'lganda, masalan, uch elementi L_1, L_2, L_3 bo'lgan va M_{12}, M_{23}, M_{31} o'zinduksiya koeffitsiyentlari bilan tavsiflangan bog'lanishda, har bir element klemmalarining uchlarini belgilashda M_{kl} koeffitsiyentlarning son qiymatlari yoki musbat, yoki manfiy bo'lishi mumkin. Buning sababi shundaki, ko'pgina hollarda har bir elementning klemmalarini belgilashda M_{kl} ning barcha qiymatlarini musbat bo'lishini ta'minlash mumkin bo'lmaydi.

7.6.a-rasmda bir-biriga yaqin joylashgan g'altaklar sxemasi keltirilgan. Har bir g'altak uchun musbat yo'nallish deb qabul qilingan Φ_1, Φ_2 va Φ_3 magnit oqimlari keltirilgan. Har bir g'altak - reaktor tokning musbat yo'nalishida Φ_1, Φ_2 va Φ_3 magnit oqimlari aynan shunday yo'nalgan bo'ladi. Shu rasmda birinchi reaktorning toki hosil qilgan magnit oqim ikkinchi (Φ_{21}) va uchinchi (Φ_{31}) reaktorlardan oqib o'tayotgami ko'rsatilgan; Ushbu oqim birinchi reaktorning tokidan hosil bo'lganligi uchun Φ_{21} va Φ_{31} oqimlar qarama - qarshi yo'nalgan; shunga o'xshash Φ_{31} va Φ_3 ham qarama-qarshi yo'nalgandir.



7.7-rasm. Musbat va manfiy o'zaro induktivliklar.

Har bir chulg'amning boshi deb (7.7,a-rasm) uning yuqoridagi klemmasini qabul qilsak, hamda shu klemmalarga i_1 , i_2 va i_3 toklar kirayapti, deb faraz qilsak, hamma reaktorlar uchun magnit ilashuvi bog'lanishini quyidagicha yozishimiz mumkin:

$$\begin{aligned}\psi_1 &= i_1 L_1 + i_2 M_{12} + i_3 M_{13}; \\ \psi_2 &= i_1 M_{21} + i_2 L_2 + i_3 M_{23}; \\ \psi_3 &= i_1 M_{31} + i_2 M_{32} + i_3 L_3;\end{aligned}\quad (7.34)$$

bunda, $M_{12} = M_{21}$; $M_{13} = M_{31}$; $M_{23} = M_{32}$.

Ushbu holatda *barcha o'zaro induktivliklar manfiy ishoralidir*. Shunga e'tiborni qaratish zarurki, barcha M_{kl} koeffitsiyentlarni musbat ishorali bo'lishini ta'minlaydigan qilib uchchala g'altakning hamma klemmalari «boshini» bir hil belgi (nuqta) bilan belgilash usuli mavjud emas.

Masalan, g'altaklarning hamma pastdagi klemmalarini qisqa tutashtirib (7.7,b-rasm), (7.34)dan birinchi reaktor kuchlanishini aniqlash mumkin.

$$\dot{U}_{a0} = I_1 j\omega(L_1 - M_{13}) + I_2 j\omega(M_{12} - M_{13}), \quad (7.35)$$

bunda KTQga ko'ra $\dot{i}_3 = -(\dot{i}_1 + \dot{i}_2)$ bo'ladi. (7.35) tenglikdagi M_{kl} koeffitsiyentlar qo'shiluvchi yoki ayiruvchi bo'lib kirishidan qat'iy nazar, manfiy ishoraga ega.

Misol. 7.7,b-rasmdagi zanjirning quyidagi qiymatlari uchun $\dot{U}_{a0}$ kuchlanishini hisoblang.

$$\begin{aligned}L_1 &= 4,0 \text{ mHn.}; M_{13} = -0,1 \text{ mHn.}; M_{12} = -0,2 \text{ mHn.}; \dot{I}_1 = 1000 \text{ A}; \\ \dot{I}_2 &= 1000 \angle -120^\circ \text{ A}; \omega = 314 \text{ s}^{-1}.\end{aligned}$$

Yechish. Berilgan qiymatlarda kuchlanish quyidagicha bo'ladi:

$$\dot{U}_{a0} = j314[4 + 0,1 + (-0,2 + 0,1) \angle -120^\circ] = -27,7 + j1300 \text{ V}.$$

Koeffisient M ning kompleks qiymati. Faraz qilaylik, 7.7,v-rasmda ko'rsatilgan ferrit xalqaga ikki chulg'am o'ralgan bo'lsin. Agar tok faqat birinchi chulg'amdan oqayotgan bo'lsa, hamda Φ magnit oqimi hosil qilmayotgan bo'lsa, u holda har bir chulg'amning kuchlanishlari quyidagi tengliklar bilan ifodalanadi:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j\omega \cdot w_1 \cdot \dot{\Phi}; \quad \dot{U}_2 = j\omega \cdot w_2 \cdot \dot{\Phi},$$

bunda, w_1 va w_2 chulgʻamlarning oʻramlari soni; r_1 -birlamchi chulgʻam aktiv qarshiligi; $w_1 \cdot \dot{\Phi} = \dot{\psi}_1$; $w_2 \cdot \dot{\Phi} = \dot{\psi}_2$ - magnit ilashuvlar.

Fizika kursidan maʼlumki, magnit oqimi F birlamchi chulgʻamning I_1 tokiga proporsional.

$$\Phi = \mu_0 \cdot \mu \cdot n \cdot I_1 S / \ell,$$

bunda, ℓ -oʻzakdagi magnit kuch chiziqlarining oʻrtacha uzunligi; S - uning kesim yuzasi; μ - oʻzakning magnit singdiruvchanligi. Ammo qutublanish jarayonining biroz kechikishi (6.14,b-rasm) tufayli magnit singdiruvchanlikning kompleks xarakteri sababli F oqimi fazasa bilan I tokdan δ burchakka kechikadi, shu sababli μ singdiruvchanlik oʻrniga kompleks singdiruvchanlik $\tilde{\mu} = \mu \angle -\delta = \mu' - j\mu''$ qabul qilamiz.

Shuning uchun $\dot{U}_2$ ni oʻzaro induktivlik orqali ifodalash tabiiydir:

$$\dot{U}_2 = j\omega M \dot{I}_1.$$

Yuqoridagilarni [yaʼni F magnit oqimi I tokdan δ burchakka kechiksa ham uning tokka proporsionalligi saqlanishini] eʼtiborga olish, M ning qiymatini kompleks shaklda keltirishga majbur etadi; bunda μ va M ning yuqorisiga «tilda» belgisi ($\sim$) qoʻyiladi.

$$\tilde{M} = M \angle -\delta = M' + jM''. \quad (7.36)$$

7.2. Induktiv bogʻlangan zanjirlarni xususiyatlari

Oʻzaro induktiv bogʻlangan zanjirlar tenglamalari. Oʻzgaruvchan elektr zanjiridagi induktiv bogʻlanganlik qoʻshimcha e.yu.k.larning paydo boʻlishiga olib keladi. KKQ asosida tenglamalar tuzilganda ular eʼtiborga olinishi zarur.

Bundagi asosiy murakkablik – ushbu $j\omega M \dot{I}$ qiymatning ishorasini toʻgʻri tanlashdan hamda barcha induktiv bogʻlangan konturlardagi induktivlanayotgan e.yu.k.larni eʼtiborga olishdan iborat.

Induktiv bog'lanishlar bo'lganda tugun potentsiallari usuliga qaraganda, *kontur toklar usulini qo'llash* qulayroqdir; birinchi usulni qo'llashda esa qo'shimcha tushuntirishlar keltirishga majbur bo'linadi.

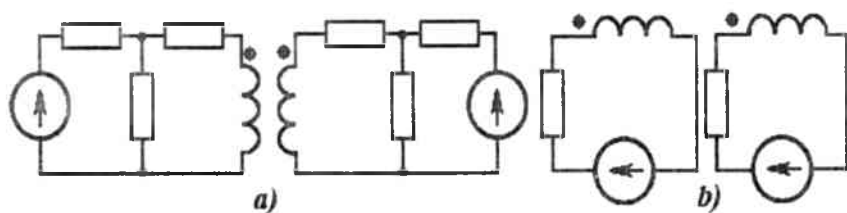
Ushbu induktiv bog'langan zanjirning kontur tenglamalarini tuzib, istalgan paytda uning o'rniga induktiv bog'lanishi bo'lmagan p -konturli zanjir tenglamasiga o'tish mumkin; bunda uning parametrlarini tanlashda ushbu zanjirning barcha $\underline{Z}_{mn}$ umumiy qarshiliklari berilgan tenglamalar tizimining $\underline{Z}_{mn}$ koeffitsiyentlariga mos bo'lishi zarurligini e'tiborga olish kerak. Induktiv bog'lanishli zanjirlarni induktiv bog'lanishi bo'lmagan zanjir bilan almashtirish §7.3da batafsil keltiriladi.

Kirxgof mustaqil tenglamalari soni. O'zaro elektrik bog'lanmagan zanjir tizimlari orasida *induktiv bog'lanish mavjud* bo'lishi mumkin. Faraz qilaylik, ikki elektrik bog'lanmagan zanjir berilgan bo'lsin; ya'ni ikki zanjir orasida o'tkazuvchanlik yoki sig'im orqali bog'lanish mavjud emas deb hisoblaylik (7.8 -rasm).

Ilgari aniqlangan mustaqil tenglamalar soni qoidasidan foydalanib, har biri uchun Kirxgof qonunlari asosida tenglamalarni tuzish mumkin. Biroq, agar ular orasida induktiv bog'lanish mavjud bo'lsa, tenglamalar tizimi birgalikda barcha tenglamalar ishtirokida yechilishi lozim. Chunki bir zanjirning kontur tenglamalari tarkibida ikkinchi zanjirning toklari qatnashgan hadlari $j\omega M \dot{I}$ mavjud.

KTQ asosida har bir zanjir uchun tuziladigan tenglamalar soni quyidagicha aniqlanadi:

$$K'_1 = T_1 - 1; \quad K'_2 = T_2 - 1. \quad (7.37)$$



7.8-rasm. O'zaro elektrik bog'lanmagan zanjirlar.

Kirxgofning ikkinchi qonuni uchun esa quyidagicha bo'ladi:

$$K_1^* = B_1 + 1 - T_1; \quad K_2^* = B_2 + 1 - T_2. \quad (7.38)$$

Bu tenglamalarda shtrixlar KTQ va KKQga taaluqli ekanligini bildiradi; 1 va 2 indekslar esa qanday zanjirga muvofiqligini ko'rsatadi. Shunday qilib, ikkala zanjir uchun tenglamalar sonini quyidagicha aniqlash mumkin:

$$K' = T - V; \quad K'' = SH + V - T, \quad (7.39)$$

bunda, T -tugunlar umumiy soni; SH -shoxobchalar soni; V - elektr bog'lanmagan zanjirlar soni, ya'ni agar bog'langan bo'lsa ham, unda induktiv bog'langan.

(7.39) ifodalar ixtiyoriy sondagi zanjirlar uchun qo'llanilishi mumkin. Bunda shuni esda tutmoq lozimki, shartga ko'ra bir konturli zanjirda faqat bitta tugun mavjud bo'ladi.

Masalan, ikkita bir konturli zanjirda (7.8,b-rasm) $K' = 2 - 2 = 0$ va $K'' = 2 + 2 - 2 = 2$, ya'ni to'liq tenglamalar tizimi KKQ asosida tuzilgan ikkita tenglamadan iborat bo'ladi.

Agar elektr bog'lanmagan zanjirlar soni V ga teng bo'lsa, ularning har biridagi tugunlardan birining potensialini ixtiyoriy qiymatga teng deb qabul qilish mumkin.

O'zaro induktiv bog'langan zanjirda quvvat uzatish va vattmetrlarda o'lchash. Potensial maydon ichida, ya'ni kuchlanishni potensiallar farqi deb qarash mumkin bo'lgan zanjirda, o'tkazgichlar orqali uzatilayotgan quvvat har doim kuchlanish va toklarning ko'paytmasi deb qaralishi mumkin. Shuning uchun, biror ikki qutblikka kelayotgan quvvat quyidagicha aniqlanadi:

$$p = u \cdot i \quad \text{yoki} \quad S = U \cdot I.$$

Ammo, ushbu quvvat ikki qutblikning ichida iste'mol qilinayotgan quvvatdan farqlanishi mumkin: iste'mol qilinayotgan quvvatning bir qismi ushbu ikki qutblik tarkibiga kirmagan elektr zanjiri bilan magnit bog'lamish orqali oqib kelishi mumkin. Bu quvvat $u \cdot i$ ko'paytma sifatida keltirilishi mumkin emas, chunki u ikki qutblikka boshqa elektr zanjiri orqali keltirilmoqda; bu quvvatni $u \cdot i$ ko'paytmaning o'rtacha qiymatini ko'rsatadigan vattmetr yordamida o'lchab bo'lmaydi.

Tushunish oson bo'lishi uchun konkret zanjirni ko'raylik (7.9,a-rasm). Zanjirda ikki induktiv bog'langan shoxobchalar

mavjud bo'lib, ularning har biriga alohida vattmetr ulangan; vattmetrlarning ko'rsatishlarini shoxobchalarda istemol qilinayotgan quvvatlar bilan taqqoslab ko'raylik; zanjir o'zgaruvchan kuchlanish manbaidan ta'minlanmoqda. Zanjirning parametrlari quyidagicha:

$$\dot{U} = 150 + j150 \text{ V}; \quad r_1 = 5 \text{ } \Omega; \quad r_2 = 10 \text{ } \Omega; \quad \omega L_1 = 15 \text{ } \Omega;$$

$$\omega L_2 - 1/(\omega C) = 0 \text{ } \Omega; \quad \omega M = 10 \text{ } \Omega.$$

Ushbu qiymatlar uchun (7.22) ifodalar orqali toklarning quyidagi qiymatlarini aniqlaymiz: $i_1 = 10 - j10 \text{ A}$; $i_2 = 5 + j5 \text{ A}$; $\dot{I} = 15 - j5 \text{ A}$. Ushbu toklarning vektorlari diagrammasi 7.9,b-rasmda keltirilgan.

Zanjirga *manbadan kelayotgan aktiv quvvatning hammasi* W vattmetr yordamida o'lchanadi; uning qiymati $P = \operatorname{Re}(\dot{U} \dot{I}) = 500W$.

Joul-Lens qonunini qo'llab, birinchi va ikkinchi shoxobchalardagi quvvatlarni hisoblaymiz: $P_1 = I_1^2 r_1 = 1000W$; $P_2 = I_2^2 r_2 = 500W$. Ular yig'indisi manba quvvatiga teng bo'lishini tekshirishimiz mumkin:

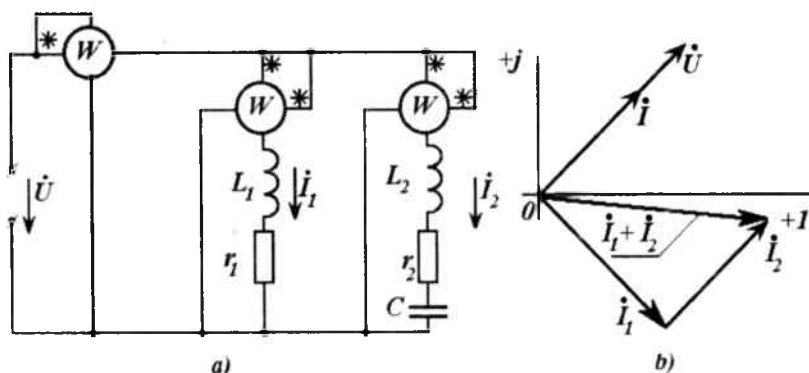
$$P = P_1 + P_2 = 100 + 500 = 1500 \text{ } W.$$

Shoxobchalardagi istemol qilinayotgan quvvatlarni hisoblagandan so'ng, ulardagi vattmetrlar ko'rsatayotgan qiymatlarni yozib olamiz va tahlil qilamiz: W_1 vattmetr ko'rsatishi $P_{w1} = \operatorname{Re}(\dot{U} \dot{I}_1) = 0$, chunki kuchlanish vektori va birinchi shoxobcha toki vektori o'zaro ortogonaldir; ikkinchi shoxobcha vattmetrining ko'rsatishi esa

$$P_{w2} = \operatorname{Re}(\dot{U} \dot{I}_2) = 1500W.$$

Agar shoxobchalar orasida induktiv bog'lanish bo'lmaganda edi, vattmetrlarning ko'rsatishlari tegishli shoxobchalarning r_1 va r_2 qarshiliklaridagi ajralib chiqayotgan quvvatlarga teng bo'lar edi.

Biz ko'rayotgan holatda esa, R_{w2} quvvat ikkinchi shoxobchaga manbadan uzatilib, qisman ($R_2 = 500W$.) unda iste'mol qilinayapti, qisman ($R_1 = 1000W$.) birinchi shoxobchaga magnit bog'lanish orqali uzatilmoqda ($P_{w2} - P_2 = P_1$) deb qarash mumkin.



7.9-rasm. Ikki induktiv bog'langan shoxobchalar.

7.3. Chiziqli transformator

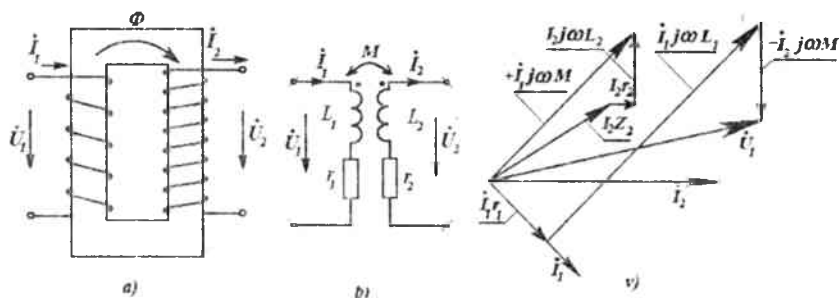
Soddalashtirilgan holatda transformator, agar chulg'amlari ferromagnit o'zakka o'ralgan («kiygizilgan») bo'lsa (7.10,a-rasm), kuchli induktiv bog'langan ikki chulg'amdan iborat bo'ladi. Yuqori chastotalarda ferromagnit o'zagi bo'lmagan havo transformatori ham ishlatiladi. Transformatorning amaliyotda qo'llanilishi, birinchi galda, kuchlanishni transformatsiyalashga (kuchlanish va tokni kuchaytirish yoki pasaytirishga) qaratilgan. Chulg'amlar orasida kuchli magnit bog'lanish bo'lganda, taxminan bir xil qiymatdagi F magnit oqimi barcha o'ramlarni kesib o'tadi, shuning uchun o'ramlarda induktivlangan e.yu.k.lar o'ramlar soni w ga proporsional.

$$U_1 \approx U_2 w_1 / w_2 \quad (7.40)$$

Bundan tashqari transformatorlar bir zanjirni ikkinchisidan elektrik izolyatsiyalagan holda, ular orasida energiya va signallarni ayirboshlash imkonini beradi.

Ferromagnit o'zakning mavjudligi magnit oqimining qiymati bilan o'zakka «kiygizilgan» barcha chulg'amlar to'la magnitlovchi toklari orasida nochiziqli bog'lanishga olib keladi. Bundan kelib chiqadigan xulosalarni ushbu darslikning 16 bobida ko'riladi. Bu yerda biz faqat transformatorning barcha magnit ilashuvlarining toklarga to'g'ri proporsional bo'lgan hamda o'z qiymatlari toklarga

bog'liq bo'lmagan induktivliklari va o'zaro induktivliklari orqali ifodalash mumkin bo'lgan chiziqli rejimni ko'rib chiqamiz.



7.10-rasm. Chiziqli transformator.

Shunga e'tiborni qaratish zarurki, signallarni uzatish, aloqa va o'lchash tizimlaridagi transformatorlarning o'zaklari, ko'p holatlarda, chiziqli rejimda ishlashga mo'ljallangan bo'ladi. Energetika tizimlaridagi transformatorlar ishchi rejimlarining asosiy xususiyatlari va tavsiflari ham chiziqli deb tahminlab hisohlanganda namoyon bo'ladi. Transformatorlarning nochiziqli xususiyatlari faqat ularning yuksiz ishlash va ba'zi anomal rejimlaridagini o'z ta'sirini ko'rsatadi.

Asosiy tenglamalar, ular tahlili. Transformatorlarning chiziqli rejimi uchun kuchli (ferromagnit o'zakli) yoki kuchsiz magnit bog'lanishlari bo'lgandagi uning to'la tenglamalari tizimi birlamchi (birinchi) va ikkilamchi (ikkinchi) chulg'amlari (konturlari)ning tenglamalari bilan ifodalanadi.

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{Z}_{11} \dot{I}_1 - \underline{Z}_{12} \dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 = \underline{Z}_{21} \dot{I}_1 - \underline{Z}_{22} \dot{I}_2, \end{cases} \quad (7.41)$$

bunda, $\underline{Z}_{11} = r_1 + j\omega L_1$; $\underline{Z}_{22} = r_2 + j\omega L_2$;

$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = j\omega M$ bo'lib, r_1 va r_2 - birlamchi va ikkilamchi chulg'amlar aktiv qarshillari; L_1 ; L_2 va M - ularning xususiy va o'zaro induktivliklari. $\dot{U}_2$ - yukning kuchlanishiga teng bo'lgan ikkilamchi chulg'am kuchlanishi. Toklar musbat yo'nalishlari

nosimmetrik (7.10,*a,b*-rasmlar) deb qabul qilganligi sababli (7.41) tenglamalar nosimmetrikdir. Toklarning yo'nalishini bunday tanlanishi tabiiydir, chunki ko'rilayotgan tizim (xususan, transformator)ni birlamchi zanjirdan ikkilamchiga energiya uzatish zvenosi deb qaralmoqda.

Tokning I_2 qiymatini tarmoq toki $I'_{2(T)}$ bilan almashtirib tenglamalar simmetrik bo'lishi ta'minlanadi

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= Z_{11} \dot{I}_1 + Z_{12} \dot{I}'_{2(T)}; \\ \dot{U}_2 &= Z_{21} \dot{I}_1 + Z_{22} \dot{I}'_{2(T)}. \end{aligned} \right\}$$

Transformatorning birlamchi zanjiriga kiruvchi quvvat

$$\bar{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \dot{U}_1 \dot{I}_1, \quad (7.42)$$

ikkilamchi chuig'amdan chiquvchi quvvat esa quyidagicha aniqlanadi:

$$\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \dot{U}_2 \dot{I}_2. \quad (7.43)$$

7.10,*v*-rasmda transformatorning induktiv-aktiv xarakterli yuklanishi $\dot{U}_2 = I_2 Z_{\Sigma}$ bo'lgandagi vektor diagrammasi keltirilgan. Buning uchun avval (7.41) tizimning ikkinchi tenglamasi hadlarini chap tomonga (albatta ishoralarini e'tiborga olib) o'tkazilib, $\dot{U}_2$ kuchlanish o'rniga $I_2 Z_{\Sigma}$ qabul qilinib, o'ng tomonda esa ikkilamchi chulg'amdagi induktivlangan kuchlanish qoldirilib, quyidagi shaklga keltiramiz:

$$I_2 Z_{\Sigma} + I_2 r_2 + I_2 j\omega L_2 = I_1 j\omega M,$$

so'ngra shu tenglama yordamida vektor diagrammasini quramiz.

Vektor diagrammani qurishda I_2 tokning yo'nalishi ixtiyoriy tanlanadi; tok I_1 induktiv xarakterda bo'lgani uchun, albatta u $I_1 j\omega M$ kuchlanish vektoridan $\pi/2$ burchakka kechikadi. $I_1 j\omega M$ ning qiymati esa oxirgi tenglamada keltirilgan qiymatlar yig'indisi sifatida aniqlanadi. Birlamchi kontur uchun vektor diagrammasi esa (7.41)ning birinchi tenglamasini quyidagicha o'zgartirib, so'ngra quriladi:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_2 + \dot{I}_1 j\omega L_1 - \dot{I}_2 j\omega M.$$

Tenglamalar (7.41)dan $\dot{I}_1$ tokni qisqartirib, transformatorning tashqi tavsifi $\dot{U}_2(\dot{I}_2)$ aniqlanadi.

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{j\omega M}{Z_{11}} - \dot{I}_2 \frac{Z_{11}Z_{22} - (j\omega M)^2}{Z_{11}} \quad (7.44)$$

Ushbu tenglamaning birinchi hadi - ekvivalent generatoring e.yu.k.i va $\dot{I}_2$ oldidagi ko'paytma - uning ekvivalent ichki qarshiligi

$$\left. \begin{aligned} E_r = \dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{j\omega M}{Z_{11}} \\ Z_r = \frac{Z_{11}Z_{22} - (j\omega M)^2}{Z_{11}} \end{aligned} \right\} \quad (7.45)$$

Mazkur tenglamalar tizimiga mos keluvchi ekvivalent sxema - E_g e.y.k. manbasiga ketma-ket ulangan qarshiliklardan iborat. Aktiv ikki qutubliklar nazariyasiga ko'ra, ekvivalent e.yu.k.ning qiymati transformator yuksiz ishlagandagi ($I_2 = 0$) ikkilamchi kuchlanishga teng va (7.45)ga ko'ra

$$j\omega M / Z_{11} = j\omega M / (r + j\omega L_1)$$

birlamchi kuchlanish ga ko'paytirilganiga teng.

Aksariyat, transformatorlarda qarshiliklar quyidagi $r \ll \omega L$ tengsizlikda qabul qilinadi. Masalan, telekommunikatsiya korxonasining elektr ta'minoti tizimida ishlatiladigan transformatorlarda ($S_H = 60000 \text{ kVA}$, $U_n = 220 \text{ kV}$) $r_1 \approx 0,02 \Omega$ va $\omega L_1 = 173 \Omega$. Shuning uchun, taxminiy hisoblashda $j\omega M / Z_{11} \approx M / L_1$ deb qabul qilish mumkin.

Kuchli magnit bog'lanishli transformatorlarda o'zakning har qanday kesim yuzasida ham magnit oqimi F (7.10,a va 7.7,v-rasmlar) qiymati bir hil bo'ladi, shuning uchun ham birlamchi, ham ikkilamchi chulg'amlarning har bir o'ramlarini bir xil magnit oqimi kesib o'tadi, deb faraz qilamiz. Bundan tashqari, *chiziqli deb tahmin qilinganda*, magnit oqimi chulg'amlar toki va o'ramlar soni ko'paytmalari [magnitlovchi kuch(m.k.)]ga proporsional. Bunday sharoitda induktivlikni o'ramlar soni kvadratiga proporsional deb hisoblash mumkin.

$$L_1 = w_1^2 L_0; \quad L_2 = w_2^2 L_0, \quad (7.46)$$

o'zaro induktivlik esa o'ramlar sonlari ko'paytmasi ($w_1 \cdot w_2$)ga proporsionaldir

$$M \approx w_1 w_2 L_0 = \sqrt{L_1 L_2}. \quad (7.47)$$

Umumiy holda

$$M = k \sqrt{L_1 L_2}, \quad (7.48)$$

bunda, k - magnit bog'lanish ko'effitsiyenti.

Yuqori sifatli ferromagnit material va yuqori texnologiyani qo'llab yig'ilgan transformatorlarda magnit bog'lanish ko'effitsiyenti birga yaqin ($k \approx 0,99$). Bunday holatlarda

$$M / L_1 \approx w_1 w_2 \quad (7.49)$$

va ekvivalent generator e.yu.k.ning qiymati transformator birlamchi chulg'am kuchlanishidan w_2 / w_1 marta katta bo'ladi:

$$\dot{E}_k = \dot{U}_2 \cdot w_1 / w_2. \quad (7.50)$$

Ekvivalent generatorning ichki qarshiligini tasvirlashga o'tamiz. (7.45) tenglikdagi Z_1 tarkibida aktiv qarshilik reaktiv qarshilikka nisbatan juda kichik deb hisoblab, hamda M ni (7.48) tenglik orqali ifodalab, quyidagi bog'lanishni aniqlaymiz:

$$Z_1 = \frac{j\omega L_1 \cdot j\omega L_2 - (j\omega M)^2}{j\omega L_1} = j\omega L_2 (1 - k^2). \quad (7.51)$$

Yuqori kuchlanishli transformatorlarda ωL_2 reaktiv qarshilikning qiymati juda katta bo'ladi.

Masalan, telekommunikatsiya korxonalarining elektr energiyasi ta'minotida ishlatiluvchi kuchlanishi $220kV$ bo'lgan transformatorning qarshiligi $\omega L_2 = 40 k\Omega$. Tabiiyki, agar ωL_2 ning qiymati kichik bo'lganda edi, transformator bunday katta kuchlanishga ulanganda uning chulg'amlaridan juda katta tok oqib o'tar edi.

Biroq, (7.51) bo'yicha $1 - k^2$ juda kichik qiymat bo'lgani uchun transformatorning ekvivalent ichki qarshiligi nisbatan katta bo'lmaydi (yuqorida parametrlari keltirilgan transformatorlarda $1 - k^2 \approx 0,0032$, demak $\omega L_2 = 40 k\Omega$ bo'lganda $Z_1 = 128 \Omega$). Ayirma $1 - k^2$ magnit oqim tarqoqligi ko'effitsiyentini anglatadi:

$$k_s^2 = 1 - k^2 = (L_1 L_2 - M^2) / L_1 L_2.$$

Transformatorning kirish qarshiligi. Transformatorning kirish qarshiligi deb kuchlanish $\dot{U}_1$ ning tok $\dot{I}_1$ ga nisbatiga aytiladi.

$$Z_{kr} = \dot{U}_1 / \dot{I}_1.$$

Uning qiymati ikkilamchi chulg'amga ulangan yukning Z_Y qarshilligiga bog'liq.

Asosiy tenglamalar (7.41) ga murojaat qilib va ularga $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_Y$ ni kiritib kirish qarshiligini keltirib chiqaramiz.

$$Z_{kr} = Z_{11} - Z_{12}^2 / (Z_Y + Z_{22}). \quad (7.52)$$

Tenglikning ikkinchi hadini *kiritilgan (kompleks) qarshilik* deyiladi. U birinchi konturga ikkinchi kontur qarshiligi ($Z_Y + Z_{22}$) ning ta'siri darajasini ko'rsatadi. Ikkilamchi chulg'am uzilgan (yukka ulanmagan) bo'lganda ($Z_Y \rightarrow \infty$), kirish qarshiligi faqat birlamchi kontur parametrlari bilan ifodalanadi.

Ilgari keltirilgan farazlarni e'tiborga olganda

$$Z_{11} \approx j\omega w_1^2 L_0; \quad Z_{22} \approx j\omega w_2^2 L_0; \quad Z_{12} \approx j\omega w_1 w_2 L_0 k$$

va $|Z_1| \ll |Z_{22}|$ sharti bajarilganda, kirish qarshilligining quyidagi taxminiy qiymatini aniqlaymiz:

$$Z_{kr} \approx \frac{j\omega w_1^2 w_2^2 (1 - k^2) + Z_1 w_1^2}{w_2^2} \approx Z_1 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2. \quad (7.53)$$

Shunday qilib, transformatorning ulanishi natijasida yukning qarshiligi Z_Y o'zgarar ekan. (7.52) tenglikdan foydalanib transformatorning yuksiz ishlaganda ham ($Z_Y \rightarrow \infty$), qisqa tutashuvida ham ($Z_Y \rightarrow 0$) kirish qarshiligini aniqlash mumkin.

O'zakning magnit holati. Magnit oqimining chulg'amlar kuchlanishlari va toklariga bog'liqligi. Ekvivalent kirish qarshiligi Z_1 chulg'am induktiv qarshiligi ωL_2 ga nisbatan keskin kamayishini o'zakdagi magnit jarayonlarini o'rganish natijasida tushuntirish oson. 7.10, v-rasmga murojaat etib, shuni ko'ramizki, $\dot{I}_1$ va $\dot{I}_2$ toklar o'zakdagi magnit oqimiga nisbatan har xil yo'nalganlar. Shuning uchun, agar birinchi tok ($i_1 > 0$ bo'lganda) magnit maydonini musbat yo'nalish ($F > 0$) bo'yicha hosil qilishga harakat qilinsa, ikkinchi tok ($i_2 > 0$ bo'lganda) shu oqimni susaytirishga harakat qiladi. Bu

fikrlar, albatta, toklarning musbat yo'nalishlarini ixtiyoriy tanlanganligidan emas, balki Lensning qonuni asosida kelib chiqadi.

O'zakning magnit holati (to'la tok qonuni asosida) o'zak ichida o'tkazilgan berk chiziq bilan ilashgan to'la tok bilan belgilanadi, ya'ni kompleks shaklda quyidagicha yozilishi mumkin bo'lgan qiymat orqali belgilanadi.

$$\vec{F} = \vec{I}_1 w_1 - \vec{I}_2 w_2, \quad (7.54)$$

To'la tok $\vec{F}$ ni *magnitlovchi kuch* (m.k) yoki *magnit yurituvchi kuch* (m.y.k.) deb ataladi.

Ikkimchi tomondan, o'zakning magnit holati chiziqli rejimda to'la tokka proporsional bo'lgan uning magnit oqimi $\vec{\Phi}$ orqali ifodalanadi.

$$\vec{\Phi} = a \vec{F} = a(\vec{I}_1 w_1 - \vec{I}_2 w_2), \quad (7.55)$$

bunda, a -proporsionallik koeffitsiyenti.

Magnit oqim va to'la tok orasidagi bog'lanishning mavjudligi shunday fikrga olib keladiki, u bo'yicha berilgan to'la tokning qiymatiga magnit oqimining ma'lum qiymati mos keladi; bu, o'z navbatida, ko'plab qo'llaniladigan - magnit «oqimini tok hosil qiladi» degan iboraga olib keladi. Biroq bunday ta'rifni aynan tushunish mumkin emas va har doim esda tutish zarurki, tok hamda magnit oqim (yoki magnit maydon) - bir hodisaning ikki o'zaro bog'langan integral jarayonidir yoki bir hodisaning ikki ko'rinishidir.

Transformatorlar ekspluatatsiyasida aksariyat, berilgan ishlash shartlarida magnit oqimi keltiriladi. O'ramlari soni w_1 bo'lgan chulg'am U_1 kuchlanishli va ω chastotali tarmoqqa ulangan; ikkilamchi chulg'am esa yukka ulanmagan, deb faraz qilaylik. Bunday holatda r_1 qarshilikdagi kuchlanish pasayuvini hisobga olmasdan bir o'ramdagi e.yu.k.ni aniqlaymiz.

$$e_0 = -d\Phi_0 / dt \quad \text{yoki} \quad \vec{E}_0 = -j\omega \vec{\Phi}_0 = -\vec{U}_1 / w_1,$$

bunda, Φ_0 -yuksiz ishlash rejimidagi magnit oqim.

Kuchlanish $\vec{U}_1$ batamom e.yu.k. $\vec{E}_1 = w \vec{E}_0 = -\vec{U}_1$ bilan muvozanatlanadi; bunda ushbu e.yu.k.ning qiymati o'ramlar soni

w_1 ni bir o'ramdagi e.yu.k. miqdoriga ko'paytirilganiga teng. Shunday qilib, berilgan kuchlanish $\dot{U}_1$, o'ramlar soni w_1 va chastota ω - faqat shulargina magnit oqimi

$$\dot{\Phi}_0 = \dot{U}_1 / (j \omega w_1) \quad (7.56)$$

ni hosil qiladilar.

Ushbu chulg'amdan oqayotgan tokning qiymati magnit oqim va to'la tokni bog'lovchi tenglamadan aniqlanadi. Ushbu tok *yuksiz ishlash toki* yoki *magnitlovchi tok* $\dot{I}_{01}$ deb ataladi.

$$\dot{F} = w_1 \dot{I}_{01}. \quad (7.57)$$

Endi ikkilamchi chulg'amga biror $\underline{Z}_T$ qarshiligini ulaymiz. Undan quyidagi tok oqadi:

$$\dot{I}_2 = \dot{U}_2 / \underline{Z}_T = \dot{U}_{02} / (\underline{Z}_T + \underline{Z}_1), \quad (7.58)$$

bunda, $\dot{U}_{02}$ -transformator yuksiz ishlagandagi ikkilamchi chulg'am kuchlanishi.

Dastlabki tahminiy hisoblarda r_1 va r_2 qarshiliklardagi kuchlanishlar pasayuvini e'tiborga olmasa ham bo'ladi; induktivlanayotgan e.yu.k.ning qiymati kuchlanishning teskari ishorali qiymatga teng $\dot{E}_1 = -\dot{U}_1$ va deyarli o'zgarmaydi deb qarash mumkin. Bunday holatda magnit oqimi ham o'zgarmasligi zarur $\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_0$, demak, to'la tok ham o'z qiymatini saqlab qoladi va (7.54) tenglik yordamida aniqlanadi deyish mumkin. Shuning uchun (7.57) va (7.54) lardan aniqlanadi.

$$\dot{F} = w_1 \dot{I}_{01} + \dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_2 w_2$$

$$\text{yoki} \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_{01} + \dot{I}_2 \cdot w_2 / w_1, \quad (7.59)$$

Ikkilamchi chulg'amdagi $\dot{I}_2$ tokning yuk ulanishi bilan paydo bo'lishi natijasida (7.59)ga ko'ra, birlamchi chulg'amdagi $\dot{I}_2$ tokning $\dot{I}_{01}$ ga nisbatan $(\dot{I}_2 \cdot w_2 / w_1)$ qiymatga proporsional ravishda ortishi ko'riladi. Ikkilamchi tok go'yo, birlamchi chulg'am orqali oqib o'tib w_2 / w_1 ko'paytma marta ortgandek tuyuladi.

Normal yuklangan ferromagnit o'zakli transformatorlarda yuksiz ishlash $\dot{I}_{01}$ toki yukli bo'lgan $\dot{I}_1$ tokning 5÷10%dan ko'p

bo'lmagan qiymatini tashkil etadi; o'lchov transformatorlarida esa yuksiz ishlash toki undan ham kichik ulushni tashkil etadi. Shuning uchun, ko'pgina hollarda, ayniqsa tahminiy hisoblashlarda, (7.59) tenglik o'ng tomonidagi birinchi hadni nazarga olinmaydi va buning natijasida

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \cdot w_2 / w_1, \quad (7.60)$$

deb hisoblanadi.

Bundan tashqari (7.50)da ko'rganimizdek, $\dot{U}_2 \approx \dot{U}_{02} = \dot{U}_1 \cdot w_2 / w_1$; shuning uchun transformatorga kiritilayotgan quvvatning deyarli hammasi yukka uzatiladi, deb hisoblanadi, ya'ni

$$\tilde{S} = \dot{U}_1 \dot{I}_1 = \tilde{S}_2 = \dot{U}_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_1 \frac{w_2}{w_1} \dot{I}_1 \frac{w_1}{w_2}, \quad (7.61)$$

Transformasiyalash koeffitsiyenti. Yuqorida keltirilgan ko'pchilik tenglamalarda o'ramlar sonlarining nisbati $w_2 / w_1 = k$ ni uchratish mumkin. Bu nisbat *transformatsiyalash koeffitsiyentiga* juda yaqin

$$k = \dot{E}_2 / \dot{E}_1 \approx U_{20} / U_1 \approx k_{21} = w_2 / w_1.$$

Ideal transformator. Transformator ishlashining asosiy jarayonlarini o'rganish uchun yuqoridagi ba'zi soddalashtirishlar natijasida hosil bo'lgan tahminiy bog'lanishlarni

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 k_{21}; \quad (7.62)$$

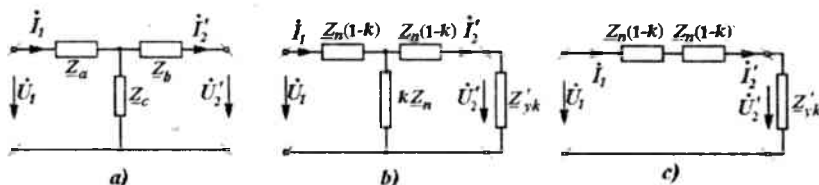
(bunda, $k_{21} = w_2 / w_1$) qabul qilamiz, ya'ni real transformatorning o'rniga ideal transformatorni hosil qilamiz.

Transformator ideal deb tahmin qilinishida $\underline{Z}_{11} = j\omega L_1 \rightarrow \infty$; $\underline{Z}_{22} = j\omega L_2 \rightarrow \infty$ va $k = M / \sqrt{L_1 L_2} \rightarrow 1$ deb hisoblanadi, ya'ni chulg'amlar qarshiliklari sof reaktiv xarakterda va qiymatlari juda katta (∞ ga intiladi), bog'lanish koeffitsiyenti k esa birga intiladi, deb faraz qilinadi.

Induktiv bog'lanishi qisqartirilgan ekvivalent zanjir. Tenglamalar (7.41) tizimini tahlil qilishga qaytamiz. Bu tenglamalarni konturlari va shoxobchalari orasida induktiv bog'lanishi bo'lmagan $\dot{I}_1$ va $\dot{I}_2$ tokli ikki konturli zanjirning tenglamalari deb qarash mumkin. Hosil bo'lgan bunday zanjirning parametrlari (7.41)

tenglamalar tizimidagi kontur qarshiliklari $\underline{Z}_{11}$ va $\underline{Z}_{22}$ va umumiy $\underline{Z}_{12}$ qarshilikka mos bo'lishi uchun, yangi sxema kamida uchta $\underline{Z}_a$, $\underline{Z}_b$ va $\underline{Z}_c$ mustaqil parametrlarga ega bo'lishi zarur. Buning uchun yangi sxemada (7.11,a-rasm) quyidagilar bajarilishi zarur.

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_a + \underline{Z}_c; \quad \underline{Z}_{22} = \underline{Z}_b + \underline{Z}_c; \quad \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_c.$$



7.11-rasm. Ekvivalent zanjirlarga aylantirish.

Agar $\underline{Z}_{11}$, $\underline{Z}_{22}$, $\underline{Z}_{12}$ berilgan bo'lsa, $\underline{Z}_a$, $\underline{Z}_b$ va $\underline{Z}_c$ larni aniqlash quyidagicha bajariladi:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_a &= \underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{12} = r_1 + j\omega(L_1 - M); \\ \underline{Z}_b &= \underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12} = r_2 + j\omega(L_2 - M); \\ \underline{Z}_c &= \underline{Z}_{12} = j\omega M. \end{aligned} \right\} \quad (7.63)$$

Agar 7.11,a-rasmdagi zanjir kuchaytiruvchi transformator ($U_2/U_1 = k_1 > 1$) uchun almashtirish sxemasi bo'lsa, unda $L_1 < M$ bo'ladi, demak, birinchi qarshilik $\underline{Z}_a$ ning tarkibiga manfiy reaktiv qarshilik $\omega(L - M)$ kiradi, ya'ni almashtirish sxemasidagi bu shoxobcha tarkibida kondensator bordek tuyuladi. Ammo hosil bo'lgan zanjir kirish kuchlanishini kuchaytirishdan tashqari hech qanday kondensatorga xos bo'lgan xususiyatlarga ega emas. Buni masalan, reaktiv qarshilik $\omega(L_1 - M)$ manfiy bo'lsa ham, chastota ω ortishi bilan, kondensatorda ko'rganimizdek $[jx_c = -j/(\omega C)]$ kamayishi o'rniga, $\omega(L_1 - M)$ ning ortishini ko'rish mumkin; uni (aslida manfiy induktivlik tabiatda bo'lmasa ham) manfiy induktivlikning reaktiv qarshiligiga mos keladi deb qaraymiz.

Shunga o'xshash yo'l bilan boshqa induktiv bog'langan shoxobcha va konturlarni induktiv bog'lanishsiz ekvivalent (fiktiv – hayoliy) zanjirlarga aylantirishimiz mumkin.

Transformatorlarning ayrim muhim almashtirish sxemalari.

Ikkilamchi chulg'amlarni birlamchi chulg'amlariga «keltirilgan-dagi» transformatorning almashtirish sxemalari (ekvivalent zanjirlari) ularni hisoblashda soddalashtirishning eng muhim usullaridan biridir. Bunda *keltirilgan tok* $\dot{I}'_2$ va *keltirilgan kuchlanish* $\dot{U}'_2$ quyidagicha aniqlanadi:

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 \cdot m; \quad \dot{U}'_2 = \dot{U}_2 / m. \quad (7.64)$$

Bu ifodalarda m - *keltirish koeffitsiyenti*. U shunday tanlanadiki, bunda keltirilgan ikkilamchi kuchlanish birlamchi kuchlanishga teng yoki unga yaqin bo'lsin; bunda ikkilamchi tokning qiymati ham birlamchi chulg'amdagi tok qiymatiga yaqinlashadi. Shunga e'tiborni qaratish zarurki, ikkilamchi chulg'amni birlamchi chulg'amga keltirish usulini qo'llamaganda chulg'amlar o'ramlari sonining farqi kattaligi sababli transformator vektor diagrammasini qurish imkoni mutlaqo bo'lmaydi.

Ikkilamchi tok va kuchlanish uchun keltirish koeffitsiyenti m ni tanlagandan so'ng, qarshiliklar uchun ma'lum keltirish koeffitsiyentini aniqlaymiz. Agar ikkilamchi zanjirning haqiqiy toki va kuchlanishi $\dot{U}_2 = \underline{Z}_1 \dot{I}_2$ bo'lsa, u holda keltirilgan tok va kuchlanishlar quyidagicha bo'ladi:

$$\dot{U}'_2 = \underline{Z}'_1 \dot{I}'_2 \quad (7.65)$$

$$\text{undan esa} \quad \underline{Z}'_1 = \underline{Z}_1 / m^2 \quad (7.66)$$

ekanini aniqlanadi.

Keltirilgan qiymatlar uchun esa quvvatlar invariant (ya'ni, bir sxemadan ikkinchisiga o'tganda quvvatlar o'zgarmas) bo'ladi.

$$\dot{U}'_2 \dot{I}'_2 = \dot{U}_2 \dot{I}_2; \quad I_2^2 \underline{Z}_1 = (I'_2)^2 \underline{Z}'_1. \quad (7.67)$$

Aksariyat, keltirish koeffitsiyentining qiymatini transformatsiyalash koeffitsiyenti qiymatiga tenglashtirib olinadi.

T-simon almashtirish sxemasi. Berilgan tenglamalar tizimini T-simon sxemadagi (7.11, a-rasm) keltirilgan kontur toklari tenglamalari bilan taqqoslab ekvivalent parametrlar qiymatlarini aniqlash mumkin; ular qabul qilingan keltirish koeffitsiyentiga bog'liq.

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{12} / m; \quad \underline{Z}_b = (\underline{Z}_{22} / m^2) - \underline{Z}_{12} / m. \quad (7.68)$$

Keltirish koeffitsiyentini $m = \sqrt{Z_{22}/Z_{11}}$ deb qabul qilib, juda sodda va simmetrik sxemaga (7.11,b-rasm) kelamiz; unda barcha parametrlar Z_{11} va umumlashtirilgan bog‘lanish koeffitsiyenti orqali ifodalangan bo‘ladi:

$$K = Z_{12} \sqrt{Z_{11} \cdot Z_{22}}. \quad (7.69)$$

Ko‘rsatilgan m ning qiymatiari va unga mos keluvchi sxema faqat $Z_a = Z_b$ deb qabul qilingan faraz natijasida kelib chiqadi. Agar Z_{mm} ni sof reaktiv xarakterdagi qarshilik deb qaralmasa, u holda bog‘lanish koeffitsiyenti bilan keltirish koeffitsiyenti kompleks sonlarga aylanadi.

Aksariyat, $K \cdot Z_{11}$ ning juda katta qiymatlarida (juda sifatli ferromagnit o‘zagi bo‘lgan transformator), 7.11,b-rasmdagi ko‘ndalang shoxobcha mavjudligi e‘tiborga olinmaydi; natijada, sxema keskin soddalashadi (7.11,v-rasm).

Boshqa turdagi almashtirish sxemalari (masalan, G-simon,) ham mavjud. Unda, ideal transformator sxemasiga qo‘shimcha qilib, yuksiz ishlashdagi tok va quvvat isrofini hisobga olish uchun birlamchi chulg‘am tomonidan ko‘ndalang shoxobcha kiritiladi, shu bilan birga, qisqa tutashuv quvvat isroflari va kuchlanishini hisobga oluvchi bo‘ylama shoxobcha ham kiritiladi.

Transformatorlarning muvofiqlashtiruvchi element sifatida ishlashi. Transformatorlar nafaqat zanjirning ikki qismimi bir biridan elektrik izolyatsiyalab, kuchlanish va toklar qiymatini o‘zgartirib, energiyaning uzatilishini ta‘minlovchi vosita sifatida qo‘llaniladi, balki ular muvofiqlashtiruvchi element sifatida ham katta ahamiyatlidir.

Qarshiligi r_f bo‘lgan iste‘molchini berilgan e.yu.k.ga va berilgan ichki qarshilik r_i ga ega bo‘lgan manbaga ulanganda uzatilayotgan maksimal quvvat $r_f = r_i$ shartiga mos keladi.

Manba bilan iste‘molchi orasiga transformator ulanganda iste‘molchining qarshiligi, (7.53) va (7.68)dan kelib chiqqanidek, manbaga ulangan quyidagi ekvivalent qarshilikka aylanadi:

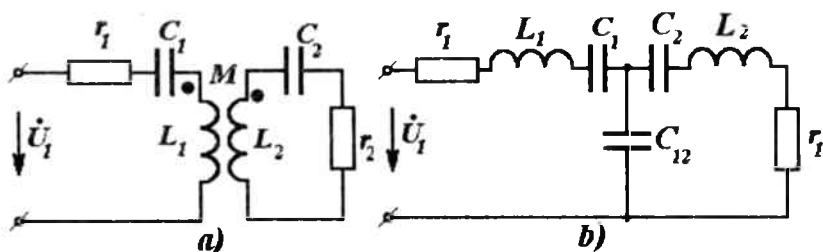
$$r'_i = r_i (w_1/w_2)^2. \quad (7.70)$$

Transformatorlar chulg‘amlarining o‘ramlari sonlari nisbati w_1/w_2 ni tahminan transformatsiyalash koeffitsiyenti k_f ga teng

qilib shunday tanlash mumkinki, bunda $r_i = r'_i$ sharti bajarilsin, hamda manba bilan iste'molchi muvofiqlashgan bo'lsin. Qarshiliklarning reaktiv tashkil etuvchilari zanjirga qo'shimcha reaktiv elementlarni (aksariyat sig'im S) qo'shib kompensatsiyalash mumkin.

7.4. Ikki magnit bog'langan konturlarda rezonans

Signallarni uzatish va qayta o'zgartirish uchun mo'ljallangan sxemalar tarkibida parallel va ketma-ket ulangan rezonans konturlari mavjudligidan tashqari, ba'zan ikki bog'langan konturlar ham bo'ladi. Aksariyat, konturlar induktiv (magnit yoki transformatorli) bog'langan (7.12,*a*-rasm), ba'zan esa sig'imli bog'langan bo'lishi ham mumkin (7.12,*b*-rasm).



7.12-rasm. Ikki magnit bog'langan kontur.

7.12,*a*-rasmdagi zanjirning birinchi konturi uchun bog'lanish darajasi $k_1 = M/L_1$ qiymat bilan belgilanadi, ikkinchisi uchun esa $k_2 = M/L_2$ bo'ladi. Konturlarning bog'lamish koeffitsiyenti k ularning o'rtacha geometrik qiymatiga teng, ya'ni

$$k = \sqrt{k_1 k_2} = M / \sqrt{L_1 L_2}. \quad (7.71)$$

Shunga o'xshash, 7.12,*b*-rasmdagi zanjir uchun

$$k = \frac{1 / C_{12}}{\sqrt{(1/C_1)(1/C_2)}}, \quad (7.72)$$

bunda, $C_1 = C_1 C_{12} / (C_1 + C_{12})$ birinchi kontur sig'imli; $C_2 = C_2 C_{12} / (C_2 + C_{12})$ ikkinchi kontur sig'imli.

Bog'langan konturlarni rezonansga rostlash har xil usullar bilan amalga oshirilishi mumkin.

Masalan, agar 7.12, a-rasmdagi zanjirda C_1 sig'imni o'zgartirsak, u holda

$$x_1 + x_{ich} = 0, \quad (7.73)$$

bo'lganda (bunda, $x_1 = \omega L_1 - 1/\omega C_1$; $x_{ich} = -x_2 \omega^2 M^2 / z_2^2$ - kiritilayotgan reaktiv qarshilik; $x_2 = \omega L_2 - 1/\omega C_2$; $z_2^2 = r_2^2 + x_2^2$), tok I_1 o'zining quyidagi maksimal qiymatiga erishadi:

$$I_1 = U / (r_1 + r_{ich}), \quad (7.74)$$

bunda, $r_{ich} = r_2 \omega^2 M^2 / z_2^2$.

I_1 tok fazasi kirishdagi kuchlanish fazasi bilan mos keladi; bunda, I_2 tok ham maksimal qiymatga ega bo'ladi.

$$I_2 = \dot{U} \omega M / z_2 (r_1 + r_{ich}). \quad (7.75)$$

Bunday rezonans xususiy rezonans deyiladi.

Ikkinchi konturdagi tokning maksimal qiymatiga ham C_2 sig'imni o'zgartirib (*ikkinchi xususiy rezonans*) erishish mumkin.

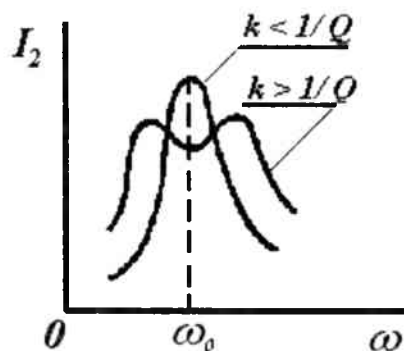
Agar sig'im C_1 dan tashqari yana bog'lanish koeffitsiyenti k ni o'zgartirib (7.73) shart bajarilsa, undan tashqari $r_1 - r_{ich}$ va $\omega M = z_2 \sqrt{r_1 / r_2}$ ga erishilsa, ikkilamchi kontur tokining qiymatini undan ham kattaroq bo'lishiga erishish mumkin $I_2 = U / 2\sqrt{r_1 r_2}$. Bunday rezonans *murakkab rezonans* deyiladi. Murakkab rezonansni hosil qilish uchun C_1 ning o'rniga C_2 ning qiymatini o'zgartirish mumkin.

Agar konturlarning har biri alohida rezonansga sozlansa ($x_1 = 0$; $x_2 = 0$), so'ngra optimal bog'lanish ($\omega M = \sqrt{r_1 r_2}$) tanlansa, unda *to'la rezonans* shartini hosil qilishimiz mumkin. Tok I_2 murakkab rezonansdagi kabi maksimal qiymatiga erishadi. Har bir konturni bir hil chastotali $\omega_1 = \omega_c = \omega_0$ rezonansga sozlab, k bog'lanish koeffitsiyentini tanlab, bir konturli rezonans uchun o'tkazish kengligini aniqlanganidek, ikki konturli tizimning o'tkazish kengligini ham o'zgartirish mumkin: o'tkazish kengligining chegarasida tokning qiymati maksimal tokdan $\sqrt{2}$ marta kam bo'ladi.

Agar bog'lanish koeffitsiyenti kritik qiymatidan kichik bo'lsa $k < 1/Q$, rezonans tavsifi ushbu holda ketma-ket konturning rezonans

tavsifiga o'xshash bo'ladi (7.13-rasm); bunda $Q=Q_1=Q_2$ - har bir konturning asilligi.

Bog'lanish koeffitsiyenti kritik qiymatdan katta bo'lsa ($k > 1/Q$), «ikki o'rkachli» rezonans tavsifi hosil bo'ladi. Uning o'tkazish kengligi bitta konturli rezonansga nisbatan kengroq lekin 3,1 martadan ko'p emas) bo'ladi.

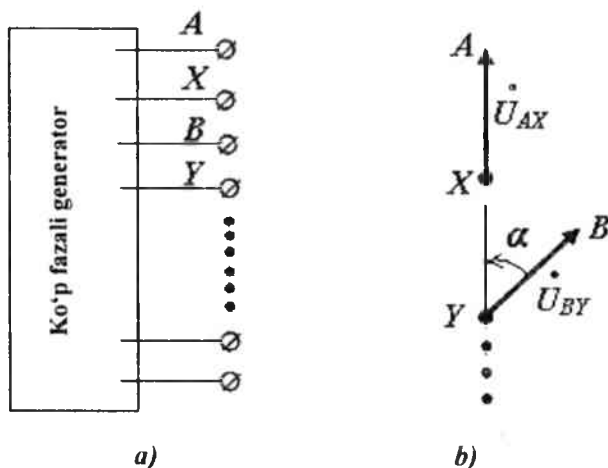


7.13-rasm. Ketma-ket konturning rezonans tavsifi.

8. UCH FAZALI ZANJIRLAR

8.1. Ko'p fazali zanjirlar

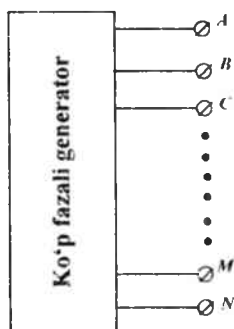
Elektrotexnikada ko'p fazali (aksariyat uch fazali) zanjirlar ko'p uchraydi. Bunda chiqish qismida bir juft qisqichlari (qutblari) bo'lgan bir fazali zanjirlardagi energiya manbai(generator)dan farqli ravishda, ko'p fazali generatorning chiqish qismida bir necha juft qisqichlari mavjud bo'ladi.



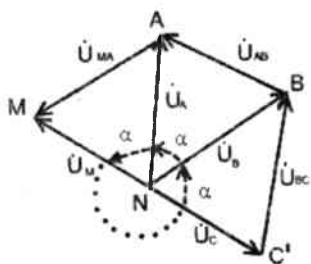
8.1-rasm. Ko'p fazali generator sxemasi.

Har bir juft qisqichlarda generatsiya qilinayotgan energiyaning chastotasi tengdir. 8.1,a-rasmda M ta juft qisqichlari bo'lgan ko'p fazali generator sxemasi keltirilgan; har bir $A-X$, $V-U$, ..., $M-Z$ juft qisqichlari orasida, yoki har bir AX , VU , ..., MZ fazalarida o'zlarining kuchlanishlari mavjud bo'lib, ixtiyoriy juftliklar bir-biri bilan elektrik bog'lanmagan bo'ladi; ularning orasiga voltmetr ulansa nolni ko'rsatadi, masalan, $U_{AB} = 0$; $U_{MX} = 0$; fazalar orasidagi elektrik bog'lanishni tashqaridagi qisqichlardagi ulanishlar

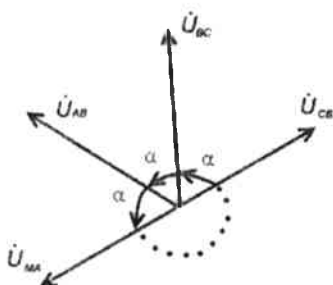
yordamida amalga oshirish mumkin. Hamma fazalardagidek U_{AX}, U_{BY} va h.k kuchlanishlar, aksariyat hollarda, bir xil amplituda va chastotalarga ega bo'lib, faqat fazalari siljigan bo'ladi (8.1,b-rasm). Simmetrik M -fazali tizimlarda kuchlanishlar orasidagi burchak $\alpha = 2\pi/M$ ga teng bo'ladi.



a)



b)



v)

8.2-rasm. Simmetrik ko'p fazali generator.

8.2, a-rasmda $(M+1)$ qisqichli, M fazali tizimning qisqichlari keltirilgan; ularda $A, B, \dots, M$ -faza qisqichlari. N bilan belgilangan oxirgi qisqich (neytral qisqich), umumiy nuqtani tasvirlaydi; unga barcha fazalarning $X, U, \dots$ «ketlari» qisqichlari (8.1,a-rasm) ulangan. Soddashtirib nomlanganda fazalarning boshlari faqat «faza» deyiladi, neytral qisqich esa neytral deyiladi.

Simmetrik ko'p fazali generatorlarda

$$U_A = U_B = U_C = \dots; U_A = U_B \cdot \alpha; U_B = U_C \cdot \alpha, \dots \quad (8.1)$$

bunda, $U_A = U_{1N}$; $U_B = U_{2N}$; ... - faza kuchlanishlari; $\alpha = e^{j\alpha}$ - faza ko'paytuvchisi; demak, har bir faza va neytral orasidagi kuchlanishlar modullari teng va bir-biriga nisbatan $\alpha = 2\pi/M$ burchakka siljigan (8.2,b-rasm) bo'ladi.

Ixtiyoriy bir juft yonma-yon fazalar, ya'ni A va V , va S , ..., $(M-1)$ va M , M va A fazalar orasidagi kuchlanishlar qiymat (modul)lari bir xil, fazalari bo'yicha siljigan bo'ladi (8.2,v-rasm);

$$\left. \begin{aligned} U_{AB} &= U_{BC} = \dots U_{MA}; \\ \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_{BC} \cdot \alpha; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{CD} \cdot \alpha, \dots \end{aligned} \right\} \quad (8.2)$$

bunda, $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$, $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \dots$.

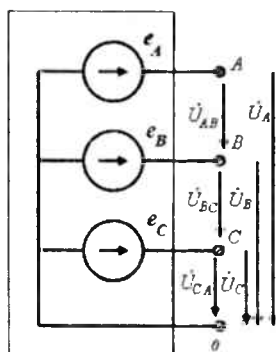
Shunga e'tiborni qaratish zarurki, 8.2,v-rasmdagi vektor diagramma 8.2,b-rasmdagidan farqli ravishda topografik emas.

Genratorning chiqish qisqichlarining shunday ulanishlari ham uchrashi mumkinki, unda generator chulg'ami tashqarisiga faqat M ta fazaning M ta boshi chiqarilib, faza ketlari generator ichkarisida bir N nuqtaga ulanadi va tashqariga chiqarilmaydi [masalan, 8.8 va 8.9-rasmlarda (MQ3) uch fazali tizim].

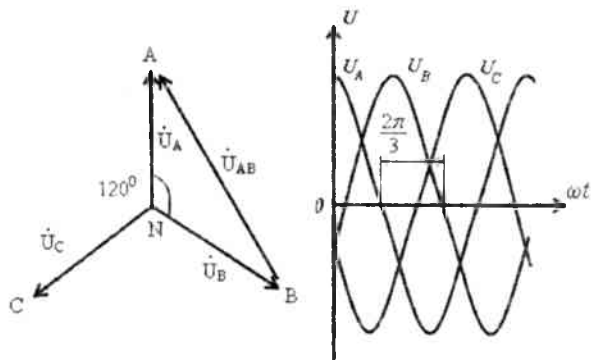
Ko'p fazali, xususan, uch fazali (8.3, a-rasm) bitta generatorni, hamma vaqt ham, faza kuchlanishlari $U_A, U_B, \dots$ bo'lgan har birining chulg'amlari tegishli faza qisqichlari va neytral orasiga joylashtirilgan M ta mustaqil bir fazali generatorlar (8.3,a-rasm) sifatida ko'rsatish mumkin. 8.3,b-rasmda simmetrik uch fazali generatorning (8.3,a-rasm) $U_A = U_B = U_C = U_\phi$ bo'lgandagi topografik vektor diagrammasi hamda $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ va $\dot{U}_C$ faza kuchlanishlari oniy qiymatlarining grafigi keltirilgan. Faza kuchlanishlarining har biri boshqasiga nisbatan $2\pi/3 = 120^\circ$ ga siljigan.

Fazalararo (fazalar orasidagi) yoki liniya kuchlanishlarining qiymatlari (8.3,b va v-rasm)

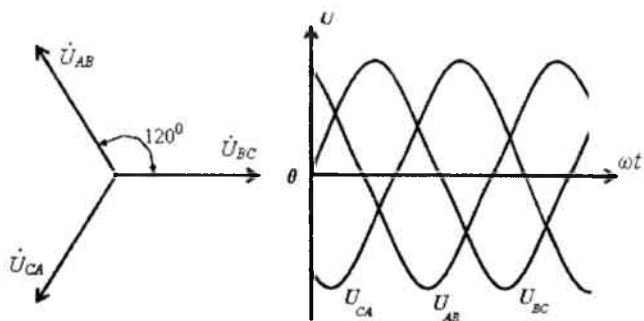
$U_{AB} = U_A - U_B$; $U_{BC} = U_B - U_C$; $U_{CA} = U_C - U_A$ ham bir xil bo'lib, faza kuchlanishlaridan $\sqrt{3}$ marta katta bo'ladi;



a)



b)

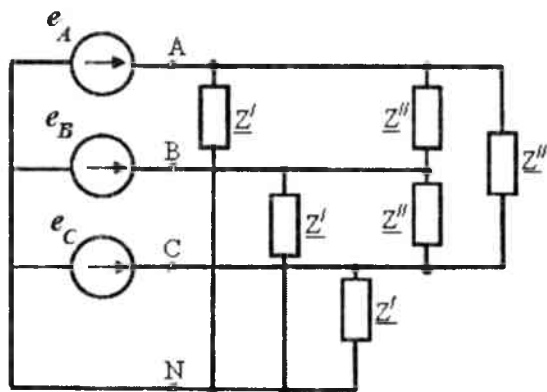


v)

8.3-rasm. Uch fazali generator.

$$U_{AB} = U_L = \sqrt{3}U_F.$$

Liniya kuchlanishlarining oniy qiymatlari fazalari bo'yicha biri biridan 120° ga siljigan bo'ladi. Bunga topografik vektor diagrammasi yoki analitik bog'lanishiarni tahlil qilib ishonch hosil qilish mumkin. 8.3, v-rasmda fazalaroro kuchlanishlarning vektorlari va tegishli oniy qiymatlari keltirilgan. Bu vektor diagramma esa topografik emas.



8.4-rasm. Yukning faza shohobchalari.

Iste'molchi (yuk) ixtiyoriy fazalar jufti boshlarining orasiga yoki ixtiyoriy faza boshi bilan neytral orasiga ulanishi mumkin.

Har bir faza bilan neytral orasiga ulangan yukning faza shohobchalari bir xil qarshiliklarga ega bo'lsa (8.4-rasmdagi Z') iste'molchi yoki yuklama simmetrik deyiladi; xuddi shunga o'xshash, agar har bir juft fazalar boshiga bir xil Z'' qarshiliklar ulangan bo'lsa (8.4-rasm) yuk simmetrik deyiladi. Ko'p fazali generatorlari bo'lgan zanjirlar *ko'p fazali zanjirlar* deyiladi.

Hozirgi zamon uch fazali zanjirlar nazariyasiga M.O.Dolivo-Dobrovolskiy asos solgan (1862-1919-y). U tomonidan kashf etilgan uch fazali asinxron motori barcha elektr motorlariga nisbatan eng sodda va ishonchli bo'lib, hozirgi kunda ishlatilayotgan barcha elektr motorlarining 80-85%ini tashkil etadi.

Bu esa uch fazali tizimlarning keng tarqalishiga asos bo'ldi. Uch fazali tizimlarning, bundan tashqari, boshqa afzaliklari ham mavjud; energiya uch fazali tarqatilishi bir fazali energiya uzatishga nisbatan samarasi yuqoridir. Uch fazali zanjir bo'lganda aylanuvchi magnit maydonini hosil qilish osonroq; o'zgaruvchan tokni o'zgarmas tokka aylantirish (to'g'rilash)da ko'p fazali tizimni qo'llash kuchlanish pulslanishini keskin kamaytiradi, shuning uchun to'g'rilagichlar texnikasida, aksariyat, na faqat uch fazali manbalar qo'llaniladi, balki, olti-, ba'zida esa, o'n ikki fazali tizimlar ishlatiladi.

Simmetrik ko'p fazali zanjir (simmetrik generator-yuk)ni hisoblash uchun uning bir fazasini hisoblash kifoya yoki, boshqacha qilib aytganda, uni bir fazali hisoblashga keltirish mumkin. Nosimmetrik zanjirlarni esa bir necha manbali zanjir deb qarash mumkin, (ya'ni har bir fazasi alohida olinadi); bunday zanjirlarni hisoblashni yengillashtirish uchun ularni bir necha simmetrik rejimlar bilan almashtirishga (simmetrik tashkil etuvchilar usuli) olib kelish mumkin.

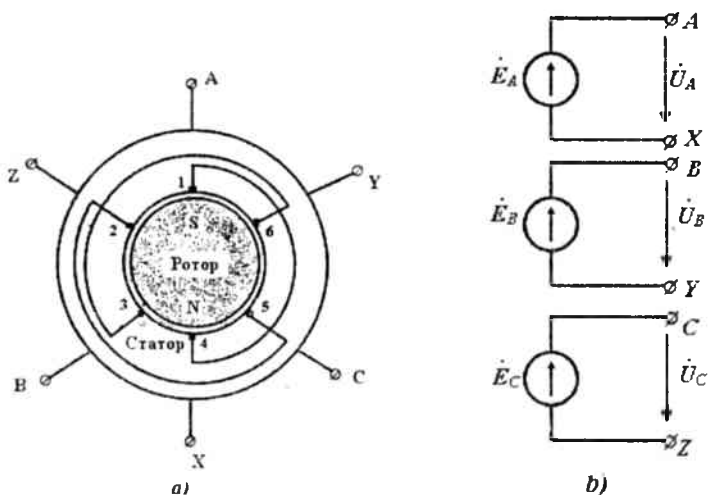
8.2. Uch fazali simmetrik generator

Uch fazali elektr mashinasi (generatori) bir fazalikdan faqat shu bilan farqlanadiki, uning statorida bir chulg'am emas, balki uch chulg'am mavjuddir (8.5.a-rasin). Chulg'amlar (8.5 a-rasm) statorida shunday joylashtiriladiki, ularda induktivlanayotgan e.yu.k.larning fazalari biri biriga nisbatan 120° ga siljigan bo'ladi. Magnit maydonini hosil qilish uchun silindrsimon ferromagnit statorning ichida silindrik rotor aylanadi. Uning magnit maydoni kuch chiziqlari stator o'zagi orqali oqib o'tib tutashadi (berk konturni hosil qiladi). Statorning ichki silindrik yuzasida pazlar (ariqchalar) mavjud bo'lib, ularga stator chulg'amlarining o'tkazgichlari yotqiziladi. Rotor aylanganda ularda e.yu.k. hosil bo'ladi.

Rotor magnit maydoni shakli sinusoidal bo'lganda ko'rilayotgan chulg'amning $A-X$ fazasidagi e.yu.k.ining oniy qiymati quyidagicha bo'ladi;

$$e_A = E_m \sin \omega t, \quad (8.3)$$

bunda, $\omega = 2\pi/n$ – rotorning burchak tezligi; n – rotorning 1 sekunddagi aylanishlari soni.



8.5-rasm. Uch fazali elektr mashinasi.

Shunga o'xshash V va U qutblari ta'siridagi $B-U$ fazasi joylashgan o'tkazgichlarda hosil bo'layotgan e.yu.k. ni aniqlash mumkin. Biroq, bu faza o'tkazgichlari $A-X$ fazaga nisbatan fazoda 120° ga surilganligi uchun uning e.yu.k.si ham $2\pi/3$ burchakka surilgan bo'ladi.

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3). \quad (8.4)$$

$S-Z$ fazadagi e.yu.k.ni ham shunga o'xshash aniqlash mumkin.

$$\begin{aligned} e_C &= E_m \sin(\omega t - 4\pi/3) \\ &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (8.5)$$

Generatorning uchchala chulg'amlari yoki uchchala fazalari e.yu.k larini kompleks shaklda quyidagicha yozish mumkin:

$$E_A = E, \quad E_B = E \cdot \alpha^{-1}; \quad E_C = E \cdot \alpha, \quad (8.6)$$

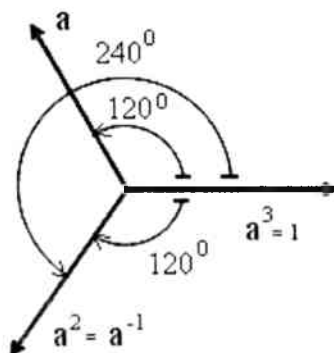
bunda uch fazali tizimning faza ko'paytuvchisi quyidagiga teng:

$$\alpha = e^{j2\pi/3} = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j\sqrt{3}/2. \quad (8.7)$$

Chulg'amlarning qarshiliklaridagi ichki kuchlanishlar pasayuvini hisobga olmaslik mumkin bo'lgan hollarda, generator qisqichlaridagi faza kuchlanishlarini faza e.yu.k.lariga teng deb olish mumkin;

$$\dot{U}_A \approx \dot{E}_A, \quad \dot{U}_B \approx \dot{E}_B; \quad \dot{U}_C \approx \dot{E}_C.$$

Albatta haqiqiy generatorning tuzilishi yuqoridagi soddalashtirilgan generatorning tuzilishidan birmuncha murakkabdir, lekin ko'rilgan fizik jarayonlar deyarli o'zgarishsiz qoladi.



8.6-rasm. Faza ko'paytuvchisi.

Uch fazali tizimning faza ko'paytuvchisi. Biror vektorni α ga ko'paytirilsa, u $+120^\circ$ burchakka buriladi; shu vektor α^{-1} ga ko'paytirilganda esa -120° ga, yoki $+240^\circ$ ga buriladi. Bundan tashqari, vektorni $+240^\circ$ ga burish uchun uni α^2 ga ko'paytirish bilan ham amalga oshirish mumkin:

$$\alpha^2 = \alpha^{-1} = 1 \angle 240^\circ = 1 \angle -120^\circ = -0,5 - j\sqrt{3}/2. \quad (8.8)$$

Demak, $\alpha^3 = 1$ ekan. Ushbu fikrlar 8.6-rasmda tasdiqlangan. Keltirilgan bog'lanishlardan quyidagi sodda ifoda kelib chiqadi:

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0 \quad (8.9)$$

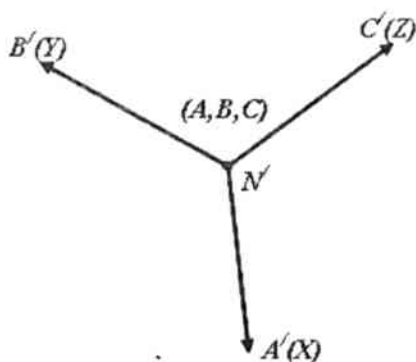
Generator chulg'amlarini «yulduz» usulda ulash. 8.5, a-rasmda keltirilgan har bir faza chulg'amlari juft qisqichlaridan bittadan, ya'ni X, Y, Z ketlarni birlashtirib umumiy nuqta-neytral N ga ulasak, «yulduzcha» ulangan chulg'amli generatorni hosil qilamiz (8.3, a va 8.4-rasmlar).

Hosil bo'lgan generatorning to'rttala qisqichlariga to'rtta o'tkazgich ulanishi mumkin: uchta (A, B, C) faza va bitta neytral N ;

ular neytrali (nol liniyasi) bo'lgan uch fazali liniyani tashkil etadilar. Fazalalararo kuchlanishlar yoki liniya kuchlanishlari qiymatlari faza (ixtiyoriy faza va neytral orasidagi) kuchlanishlari qiymatidan $\sqrt{3}$ marta katta.

8.5-rasmda keltirilgan chulg'amlarni boshqacha usul bilan ham yulduz ulash mumkin. A , B va C qisqichlarni umumiy neytral N' ga ulab to'rtta tashqi qisqichlari X , Y , Z va N' bo'lgan uch fazali generatorni hosil qilamiz. Bunda X , Y va Z nuqtalarni qayta belgilab (A' , B' , C') olish mumkin.

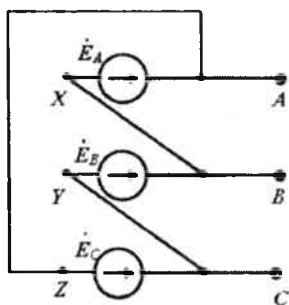
8.7-rasmda har bir faza va liniya kuchlanishlarini osonlik bilan aniqlash mumkin bo'lgan topografik diagramma keltirilgan. Ushbu holatda, ilgari ko'rilgan (8.3-rasm)ga nisbatan kuchlanishlar ishoralari bilan farqlanadilar.



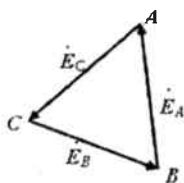
8.7-rasm. Topografik diagramma.

Generator chulg'amlarini "uchburchak" usulda ulash. Agar har bir faza chulg'aming boshini keyingi fazaning keti bilan ulasak berk "uchburchak" hosil (8.8,a-rasm) qilamiz. Bunday ulash generatorning faza chulg'amlari simmetrik bo'lgan holat uchun mumkindir, chunki ketma-ket ulangan e.yu.k. ning yig'indisi nolga teng (8.8,b-rasm):

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = \dot{E}_a(1 + a^2 + a) = 0 \quad (8.10)$$

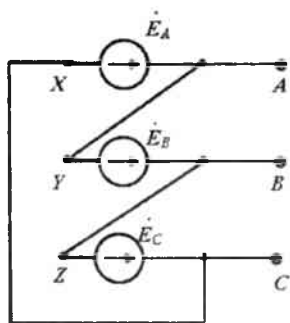


a)

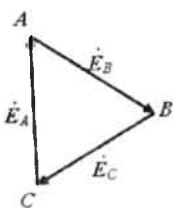


b)

8.8-rasm. Generator chulg'amlarini chap "uchburchak" usulda ulash.



a)



b)

8.9-rasm. Generator chulg'amlarini o'ng "uchburchak" usulda ulash.

Uchburchak usulda ulangan generatorning chiqish qismida faqat uchta qisqichlari (A, B, C) mavjuddir. Bunda liniya kuchlanishlari generatorning faza kuchlanishlariga teng:

$$U_{AB} = \dot{E}_A; \quad U_{BC} = \dot{E}_B; \quad U_{CA} = \dot{E}_C.$$

Chulg'amlarni uchburchak usulda ulash uchun boshqa usuldan ham foydalanish mumkin (8.9,a-rasm). Bunda liniya kuchlanishi ilgarigi uchburchak ulanishdan fazasi bilan farqlanadi. 8.8.-rasm-dagi ulanishni, ba'zan-chap ulanishli, 8.9-rasmdagini — o'ng ulanishli uchburchak usuli deyiladi.

8.3. Simmetrik uch fazali zanjir

Yulduz-yulduz. “Yulduz” ulangan generatorning har bir fazasi va neytrali orasiga bir xil iste’molchi Z larni ulab simmetrik yuk ulashning eng soddalashtirilgan sxemasini hosil qilish mumkin. Bunday zanjir toklarning musbat deb tanlangan yo‘nalishlari bilan 8.10-rasmda keltirilgan. Bunda Z_L – liniya simlarini qarshiliklari qarshiliklari; N va N' – generator va yukning neytral nuqtalari; Z_N – neytrallarni birlashtiruvchi o‘tkazgichning qarshiligi.

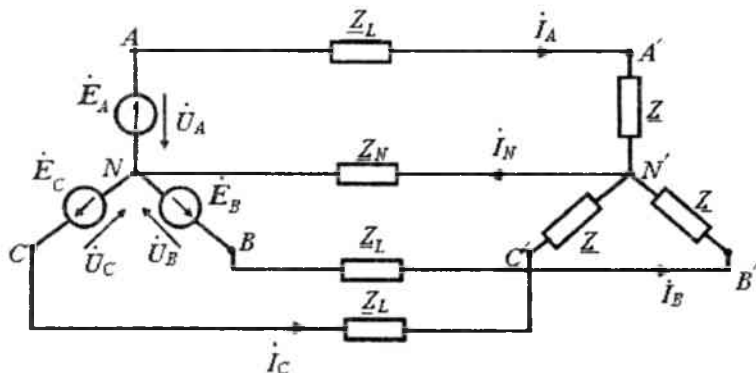
Simmetriya shartiga ko‘ra generator faza chulg‘amlaridagi I_A, I_B, I_C toklar qiymatlari teng va

$$I_B = I_A \alpha^2; \quad I_C = I_A \alpha \quad (8.11)$$

fazalari o‘zaro 120° ga siljigan deb tahmin qilish mumkin.

Neytral o‘tkazgichdagi tok I_N Kirxgofning birinchi qonuniga asosan uchala faza toklarining yig‘indisiga teng:

$$I_N = I_A + I_B + I_C. \quad (8.12)$$



8.10-rasm. Yulduz-yulduz ulash.

Oxirigi ikki ifodalarni taqqoslash natijasida shuni aniqlash mumkinki, simmetriyada neytral o‘tkazgichdagi tok nolga teng bo‘ladi:

$$I_N = I_A(1 + \alpha^2 + \alpha) = 0,$$

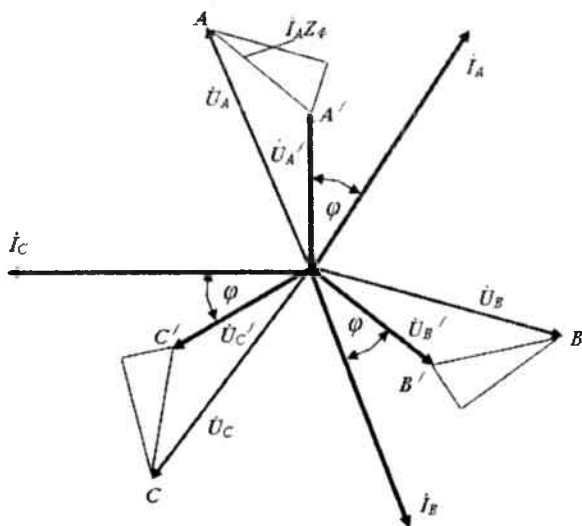
chunki (8.9)ga ko'ra $1 + \alpha + \alpha^2 = 0$. Agar shunday ekan (ya'ni $I_N = 0$), u holda N va N' nuqtalarning potentsiallari mos keladi. Demak, generatorning to'la faza kuchlanishi ketma-ket ulangan qarshiliklar Z_L va Z ga uzatiladi va Om qonuniga binoan faza toklari quyidagicha aniqlanadi:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= U_A / (\underline{Z}_L + \underline{Z}); \\ I_B &= U_B / (\underline{Z}_L + \underline{Z}); \\ I_C &= U_C / (\underline{Z}_L + \underline{Z}), \end{aligned} \right\} \quad (8.13)$$

fazadagi kuchlanishlar esa quyidagiga aniqlanadi;

$$U_A = I_A \underline{Z}; U_B = I_B \underline{Z}; U_C = I_C \underline{Z} \quad (8.14)$$

Shunday qilib, uch fazali simmetrik tizimlarda neytral o'tkazgichning mavjudligi ortiqqa ekan. Biroq, tok simmetriyasining buzilishi (masalan, fazalardan birida yukning uzilishi) natijasida tokning ayrim fazalaridagi toklarning qiymati tubdan farqlanishi mumkin. Neytral o'tkazgich mavjudligi ayrim fazalardagi kuchlanishning uchala fazalardagi toklarning o'zaro nisbatiga bog'likligidan ma'lum darajada saqlaydi.



8.11-rasm. Zanjirning topografik diagrammasi.

Ushbu tahlil qilingan zanjirning topografik diagrammasi 8.11-rasmda keltirilgan. A va A' , B va B' , C va C' nuqtalarni tutash-tiruvchi gipotenuzalarning uchburchaklari faza o'tkazgichlaridagi kuchlanishlar pasayuvini tasvirlaydilar, masalan,:

$$U_A - U_{A'} = I_A Z_l = I_A (r_f + jx_f).$$

Oddiy bir fazali zanjirlardagi kabi (5.72), faza kuchlanishning pasayuvi quyidagicha aniqlanadi:

$$U_A - U_{A'} \approx I_A (r_f \cos \varphi + x_f \sin \varphi) \quad (8.16)$$

bunda, φ -yuk qarshiligi (Z) ning faza burchagi; uning qiymati faza tokining faza kuchlanishidan kechikish burchagiga teng. Diagramma (8.11-rasm)da liniya kuchlanishlari vektorlari $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{A'B'}$, $\dot{U}_{BC}$, ... keltirilmagan; chunki generatorning liniya kuchlanishi $\dot{U}_{AB}$, V va A nuqtalarni birlashtiruvchi vektor bilan tasvirlanadi, iste'molchining liniya kuchlanishi $\dot{U}_{A'B'}$ B' va A' nuqtalarni birlashtiruvchi vektor bilan tasvirlanadi va h.k.

(8.16) bog'lanish va topografik diagrammani solishtirish natijasida aniqlash mumkinki, liniya kuchlanishining pasayuvi quyidagiga teng bo'ladi:

$$U_{AB} - U_{A'B'} \approx \sqrt{3} I_A (r_f \cos \varphi + x_f \sin \varphi). \quad (8.17)$$

Yulduz-Uchburchak. 8.12,a-rasmda chulg'amlari "yulduz" shaklida ulangan generatorga "uchburchak" shaklida ulangan yukning ulanish sxemasi keltirilgan.

Tahlilning boshlanishida faza o'tkazgichlarining qarshiliklarini ($Z_f=0$) hisobga olmaymiz. Ushbu vaziyatda uchburchakning har bir tomoni kuchlanishlari faza kuchlanishlaridan $\sqrt{3}$ marta katta bo'lgan fazalararo (liniya) kuchlanishlariga ulangan bo'ladi. Shunga o'xshash, uchburchakning tomonlaridan oqayotgan toklarning qiymatlari ham faza toklaridan $\sqrt{3}$ marta katta bo'ladi:

$$I_{AB} = U_{AB} / Z; \quad I_{BC} = U_{BC} / Z; \quad I_{CA} = U_{CA} / Z. \quad (8.18)$$

Simmetrik tizimlarda ushbu toklar o'zaro 120° ga (8.12,b-rasm) siljigan bo'lib, ular o'zlarining kuchlanishlaridan φ burchakka kechikadilar.

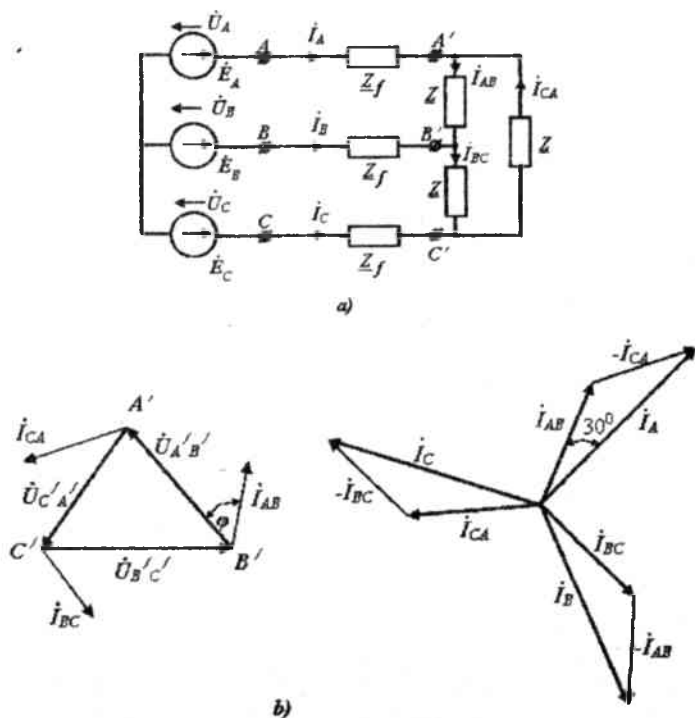
Faza o'tkazgichlaridagi toklarning yoki liniyadagi toklarning qiymatlarini Kirxgofning birinchi qonuni asosida aniqlash mumkin:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}; \quad I_B = I_{BC} - I_{AB}; \quad I_C = I_{CA} - I_{BC}. \quad (8.19)$$

Absolyut qiymatlari bo'yicha liniya toklari uchburchak tomonlaridagi toklardan $\sqrt{3}$ marta katta. Liniya toklari generatorning "yulduz" ulangan chulg'amlarining faza toklari bilan mos keladi.

"Yulduz"- "uchburchak" ulash tizimidan «yulduz» - «yulduz» ulash tizimiga o'tish oson; buning uchun yukning "uchburchak" ulanishini ekvivalent "yulduz" ga aylantiriladi. Simmetrik uchburchak shoxobchalari qarshiligi Z_Δ dan ekvivalent yulduz shoxobchalarining Z_Λ qarshiligi 3 marta kichikdir:

$$\underline{Z}_\Lambda = \frac{1}{3} \underline{Z}_\Delta \quad (8.20)$$



8.12-rasm. Yulduz-uchburchak ulanish.

Agar Z_f qarshilikning qiymatini e'tiborga olish zarur bo'lsa, u holda uning qiymatlarini ekvivalent yulduz qarshiliklariga qo'yish kerak.

Ushbu tahlillar 8.12,b-rasmda keltirilgan vektor diagrammasidan kelib chiqadi, yoki analitik ifodalar yordamida aniqlanishi mumkin.

8.1-misol. 8.1,a-rasmda keltirilgan zanjirda iste'molchi olayotgan quvvat $P = 30 \text{ kVm}$, $\cos\varphi = 0,8$ ($\varphi > 0$). Iste'molchining liniya kuchlanishi $U_{A'B'} = U_{B'C'} = U_{C'A'} = 380 \text{ V}$.

Har bir faza o'tkazgichining qarshiligi $Z_f = 0,1 + j0,2 \Omega$.

Generatorning kuchlanishi va istemolchini manba bilan ulaydigan o'tkazgichlar qarshiliklari Z_f da isrof bo'layotgan quvvat aniqlansin.

Yechish. Iste'molchining bir fazasidagi quvvat qiymati $S = 10 + j7,5 \text{ kVA}$. Demak, uchburchak tomonlarining qarshiliklari:

$$Z_\Delta = U_{A'B'}^2 / S^* = 11,5 \angle 36^\circ 50' \Omega.$$

Ekvivalent yulduz shohobchalarining qarshiliklari $Z_A = Z_\Delta/3$ ni $U_A' = 380 / \sqrt{3} = 219 \text{ V}$. bo'lganda A faza o'tkazgichlaridagi tokning qiymati

$$I_A = U_A' / Z_A = 3U_A' / Z_\Delta = 57,2 \angle -36^\circ 50' \text{ A}.$$

Generatorning faza kuchlanishi

$$\begin{aligned} U_A &\approx U_A' + I_A(r_f \cos\varphi - x_f \sin\varphi) = \\ &= 219 + 57,2(0,1 \cdot 0,8 + 0,2 \cdot 0,6) = 230 \text{ V}. \end{aligned}$$

Generatorning liniya (fazalararo) kuchlanishi

$$U_{AB} = \sqrt{3}U_A = 398 \text{ B}.$$

Faza o'tkazgichlarida yo'qotilayotgan quvvat isrofi

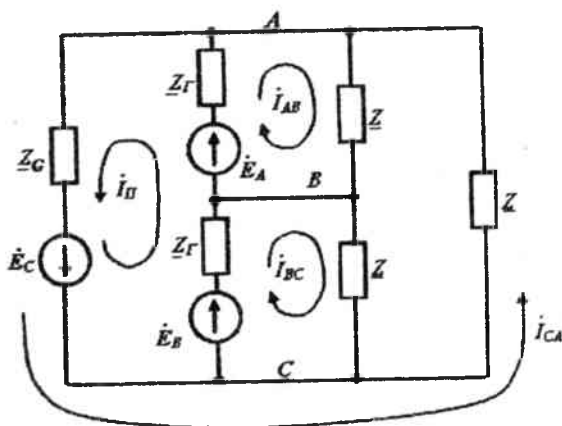
$$\Delta P = 3I_A^2 r_f = 980 \text{ W}.$$

«Uchburchak»-«uchburchak». Ko'rilayotgan (8.13-rasmda) zanjirdagi generator va iste'molchi «uchburchak» ulangan, hamda ularni ulaydigan o'tkazgichlar qarshiligi ($Z_f = 0$) nolga teng bo'lsin. Bunday holda iste'molchining uchburchagidagi toklarning qiymatlari berilgan (8.18) liniya kuchlanishlari yordamida aniqlanadi.

Generator shohobchalaridagi toklar iste'molchining parallel ulangan mazkur shohobchalaridagi toklarga teng; $\dot{I}_{AB}$ toki $\dot{E}_A$

e.yu.k.li shohobchanning tokiga teng; I_{BC} toki - E_B li shohobcha tokiga; I_{CA} toki esa e.yu.k E_C ga teng bo'lgan shohobcha tokiga teng.

Ushbu fikrlarni isbotlash uchun generatorning fazalari qarshiliklari Z_G ni e'tiborga olib tuzilgan kontur tenglamalariga murojat etish zarur.



8.13-rasm. Uchburchak -uchburchak ulanish.

Har xil sxemalarning ekvivalentligi. «Uchburchak» turdagi ulanishdan ekvivalent «yulduz» turiga o'tish yoki «yulduz»dan ekvivalent «uchburchak»ka o'tish, ixtiyoriy simmetrik zanjirni aksariyat, tahlil qilish uchun qulay bo'lgan oddiy «yulduz»-«yulduz» ulanishga o'tkazishga imkon beradi; shunga o'xshash ixtiyoriy zanjir ulanishini «uchburchak»-«uchburchak» ulashga o'tkazish ham mumkin. Ayniqsa, yukning uchburchagi va generatorning orasida o'tkazgichlar qarshiliklari (Z_f) mavjud bo'lib ularni hisobga olish zarur bo'lganda ekvivalent «yulduz» shohobchalariga ushbu qarshilik oddiy qo'shilishini e'tiborga olsak, «uchburchak»ni ekvivalent «yulduz»ga o'zgartirish qanchalar muhimligini ko'rish mumkin.

8.4. Uch fazali simmetrik zanjirlar quvvati

Simmetrik yukning yulduz ulangan holatdagi bir faza quvvati quyidagicha aniqlanadi:

$$\tilde{S}_A = U_A I_A = U_A I_A (\cos \varphi + j \sin \varphi).$$

Uchala fazaning to'liq iste'mol qiluvchi quvvati undan 3 marta kattadir:

$$\tilde{S} = P + jQ = 3S_A = 3U_A I_A (\cos \varphi + j \sin \varphi). \quad (8.21)$$

Ushbu ifodalar simmetrik uch fazali tizimning ham aktiv, ham reaktiv quvvatlarini aniqlaydi. Yulduz ulanganda liniya toki I_l faza toki I_f ga teng; liniya kuchlanishi U_l esa faza kuchlanishi U_f dan $\sqrt{3}$ marta kattadir. Shuning uchun (8.21) dagi quvvat liniya kuchlanishi va toki orqali ifodalanishi mumkin;

$$\tilde{S} = \sqrt{3} U_l I_l (\cos \varphi + j \sin \varphi). \quad (8.22)$$

Shunga e'tiborni kuchaytirish zarurki, tengliklardagi $\varphi = \angle U_A, I_A$ fazaning kuchlanishi va toki orasidagi faza siljish burchagidir.

Yukning simmetrik uchburchak bo'lgandagi quvvatini hisoblash yo'li ham ushbu (8.22) tenglikka olib keladi. Uchburchakning barcha shohobchalari iste'mol qilayotgan quvvati

$$\tilde{S} = 3\tilde{S}_{AB} = 3U_{AB} I_{AB} (\cos \varphi + j \sin \varphi). \quad (8.23)$$

Bunday holatda liniya kuchlanishi U_l faza kuchlanishi U_f ga teng, liniya toki I_l esa uchburchakning ixtiyoriy tomoni faza toki I_{AB} dan $\sqrt{3}$ marta katta. (8.23) tenglikdagi faza kuchlanishlari va toklarini liniya kuchlanishi va toklariga almashtirsak avvalgi (8.22) tenglikni hosil qilamiz; bu holda ham φ -faza toki va kuchlanishi (uchburchak shohobchalari) orasidagi faza siljish burchagidir.

Uch fazali simmetrik tizim quvvatining oniy qiymati o'zgarmas bo'ladi; bunga iqror bo'lish uchun uchala fazalar quvvatlarining oniy qiymatlarini qo'shish yetarlidir. Masalan, yulduz ulanganda A fazasidagi kuchlanish $u_A = \sqrt{2} \cdot U_A \sin \omega t$ va tok $i_A = \sqrt{2} \cdot I_A \sin (\omega t - \varphi)$ bo'lsa, shu fazaning oniy quvvati quyidagicha aniqlanadi:

$$p_A = u_A \cdot i_A = U_A I_A [\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi)].$$

Biroq, V fazasidagi kuchlanish va tok A fazadagiga nisbatan $2\pi/3$ burchakka kechikadi, ya'ni $u_B = \sqrt{2} \cdot U_B \sin (\omega t - 2\pi/3)$ va $i_B = \sqrt{2} I_B \sin (\omega t - 2\pi/3 - \varphi)$ bo'ladi. Shuning uchun

$$p_B = U_B I_B [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi - 4\pi/3)]$$

S fazasi uchun xam shunga o'xsbash aniqlanadi:

$$p_C = U_C I_C [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi + 4\pi/3)].$$

Simmetrik tizimning uchala fazalari quvvatlarining oniy qiymatlarini qo'shib, ularning o'zgaruvchan tashkil etuvchilarining yig'indisi nolga teng ekanini ko'ramiz, chunki

$$\cos \alpha + \cos(\alpha + 4\pi/3) + \cos(\alpha - 4\pi/3) = 0.$$

Cimmetrik tizimda (yulduz bo'lganda)

$$U_A = U_B = U_C = U_L / \sqrt{3}; \quad I_A = I_B = I_C = I_L; \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_L.$$

Shuning uchun aktiv quvvatning qiymati

$$P_A = P_B + P_C = 3 \frac{U_L}{\sqrt{3}} I_L \cos \varphi = 3 U_L I_L \cos \varphi$$

o'rtacha yoki aktiv quvvatga teng bo'ladi;

$$p = P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi. \quad (8.24)$$

Keltirib chiqarilgan natija shu bilan muhimki, simmetrik tizimda generatordan olinayotgan quvvat o'zgarishsiz ekan; iste'molchining motorlaridagi aylantiruvchi moment ham o'zgarmas qiymatda bo'lar ekan. Bir fazali generator bilan solishtirganimizda ular tafovuti oydinlashadi. Bir fazali generatordan olinayotgan quvvat esa pulslanuvchi edi.

Quvvatni o'lchash. Generator va iste'molchini ulaydigan uch fazali uch o'tkazgichli zanjirlarni, bitta umumiy o'tkazgichi bo'lgan ikkita ikki o'tkazgichli zanjirlar deb ko'rish mumkin;

masalan, 8.14-rasmdagi uch o'tkazgichli zanjirni umumiy o'tkazgichi V va toki $I_B = -(I_A + I_C)$ bo'lgan ikki AV va SV liniyalar deb qarash mumkin. Bunda birinchi liniyada kuchlanish $U_{AB} = U_A - U_B$ bo'lganda I_A toki, ikkinchi liniyada

$U_{CB} = U_C - U_B$ da I_C toki oqadi.

Birinchi liniyadan uzatilayotgan quvvatning qiymati:

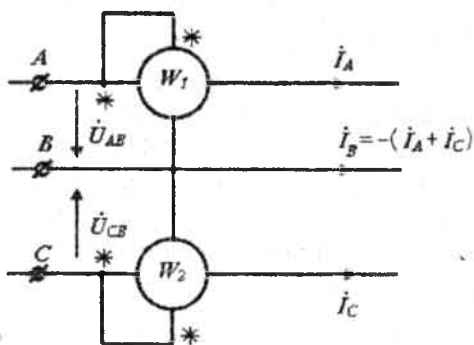
$$\tilde{S}_1 = \dot{U}_{AB} \cdot I_A, \quad (8.25)$$

ikkinchi liniyadan esa quyidagi quvvat uzatiladi:

$$\tilde{S}_2 = \dot{U}_{CB} \cdot I_C. \quad (8.26)$$

Uchala liniyadan uzatilayotgan to'la quvvat

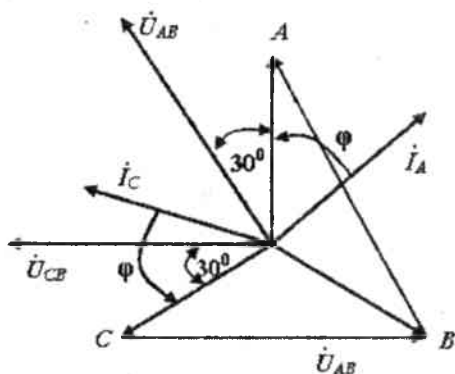
$$\tilde{S} = \tilde{S}_1 + \tilde{S}_2 \quad (8.27)$$



8.14-rasm. Quvvatni o'lchash.

Taxlil qilingan vaziyatdan shuni ko'rish mumkinki, uchta o'tkazgichli uch fazali uzatish tizimlarida uchchala fazadagi quvvatlarni ikki vattmetr yordamida o'lchash mumkin ekan; vattmetrlarning har bir ikki o'tkazgichli ikki zanjirlardan birining quvvatini o'lchaydi. Vattmetrlarning bunday ulanishi (Aron sxemasi) 8.14-rasmida keltirilgan.

Ushbu isbotda uch fazali tizimning simmetrikligi haqida hech qanday taxmin qilmadi, shuning uchun quvvatni ikki vattmetr yordamida o'lchash taklif qilingan usulni uch fazali tizimning simmetrik yoki nosimmetrik bo'lganida ham qo'llash mumkin.



8.15-rasm. Kuchlanish va toklarning vektor diagrammalari.

Yuqoridagi (8.14-rasm) zanjirning simmetrik holati uchun kuchlanish va toklarning vektor diagrammalari 8.15-rasmda keltirilgan; qalinroq chiziqlar bilan vattmetrlarning tok va kuchlanishlari ifodalangan. Birinchi vattmetrning I_A toki faza kuchlanishi U_A dan φ (yukning xarakteriga bog'liq bo'lgan) burchakka kechikadi. Birinchi vattmetrga ulangan liniya kuchlanishi U_{AB} faza kuchlanishi U_A dan 30° ga burchakdan oldinda bo'ladi. Shuning uchun W_1 vattmetrning kuchlanishi U_{AB} va toki I_A orasidagi burchak $\varphi + 30^\circ$ ga teng bo'ladi. Ikkinchi vattmetr W_2 dagi kuchlanish U_{CB} esa I_C tokni diagrammada ko'rinishicha $\varphi - 30^\circ$ burchakka o'zib ketgan. Shuning uchun 8.14-rasmda keltirilgandek, ulangan har bir vattmetrlarning ko'rsatishi quyidagicha bo'ladi:

$$P_1 = \operatorname{Re}(U_{AB} I_A) = U_{\ell} I_{\ell} \cos(30^\circ + \varphi);$$

$$P_2 = \operatorname{Re}(U_{BC} I_C) = U_{\ell} I_{\ell} \cos(30^\circ - \varphi).$$

Iste'molchi yuki faqat aktiv bo'lsa ($\varphi = 0$), ikkala vattmetrning ko'rsatishi bir xil bo'ladi.

Uzatilayotgan hamma aktiv quvvat ikki vattmetr ko'rsatishining algebrin yig'indisiga teng bo'ladi.

Keyingi tahlillar asosida ikki vattmetrning ko'rsatishlari asosida φ burchagining qiymatini aniqlash mumkin:

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_2 - P_1}{P_2 + P_1} \quad (8.28)$$

Bu tenglikdan ikki vattmetr ko'rsatishi bo'yicha simmetrik tizimlarning reaktiv quvvatlarini ham aniqlash mumkin:

$$Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} (P_2 - P_1). \quad (8.29)$$

8.5. Uch fazali liniyalarda energiya uzatish

Quyida $S = P + jQ$ quvvatni iste'molchiga uzatish zarur bo'lgan (8.16-rasm) zanjirni ko'raylik. Har bir faza o'tkazgichining qarshiligi $Z_{\ell} \approx r_{\ell} + jx_{\ell}$. Shu bilan birga liniya kuchlanishi ham mavjud bo'lsin.

O'tkazgichlardagi quvvat isrofi, hamda kuchlanishlar pasayuvini aniqlash uchun liniya tokini bilish zarur. Uni esa, yuk simmetrik bo'lganda berilgan quvvat va liniya kuchlanishlari yordamida aniqlash mumkin; bunda iste'molchining qanday ulanish usulining farqi yo'q.

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi, \quad (8.30)$$

bu yerda, U va I - liniya kuchlanishi va toki.

Kuchlanishlar pasayuvi quyidagi taqribiy ifoda yordamida aniqlanadi:

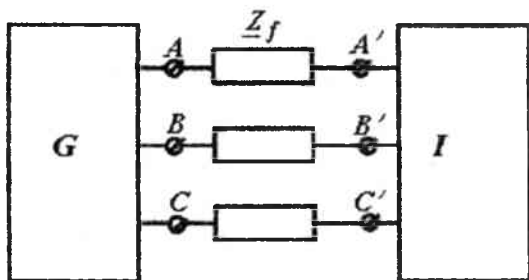
$$\Delta U \% = \frac{\sqrt{3}I(r_f \cos \varphi + x_f \sin \varphi)}{U} \cdot 100. \quad (8.31)$$

Hamma o'tkazgichlarda ajralayotgan (isroflanayotgan) quvvatning qiymatini Joule-Leniya qonuni bo'yicha aniqlanishl hammaga ma'lum:

$$\Delta P = 3I^2 r_f. \quad (8.32)$$

Oxirgi tenglikka (8.30)dan tokni qo'yib, quvvat isrofini aniqlash uchun ifodani hosil qilamiz:

$$\Delta P = \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} \cdot r_f. \quad (8.33)$$



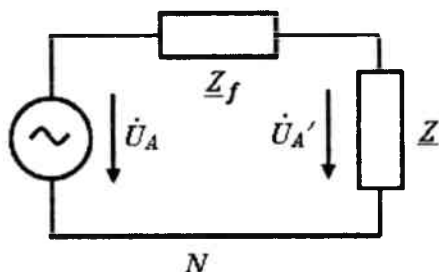
8.16-rasm. Quvvatni iste'molchiga uzatish.

Natijada, uch fazali liniyalarning foydali ish koeffitsiyentini aniqlash mumkin:

$$\eta_{3f} = \frac{P}{P + \Delta P} = \frac{I}{I + \frac{P}{U^2 \cos^2 \varphi} r_f}. \quad (8.34)$$

$\cos\varphi$ ning ta'siri va uning qiymati boshqarish (rostlash), berilgan kesim yuzali o'tkazgichlarning joizli yuklanishi va boshqa shunga o'xshash masalalar bir fazali tizimlardagi kabi hal qilinadi.

Bir fazani hisoblash. 8.16-rasmdagi zanjirlar tizimida ixtiyoriy vaziyatda, generatorni ham, iste'molchilni ham yulduz ulangan deb hisoblash mumkin: yuklanish simmetrik bo'lganda esa ushbu yulduzlarning neytral nuqtalari (N va N') orasidagi potensiallar farqi nolga teng. Shuning uchun hisobni faqat, boshqa fazalar holatidan qat'iy nazar bir faza uchun olib borish mumkin; boshqacha aytganda hisoblashni 8.17-rasmdagi zanjir uchun amalga oshiriladi.

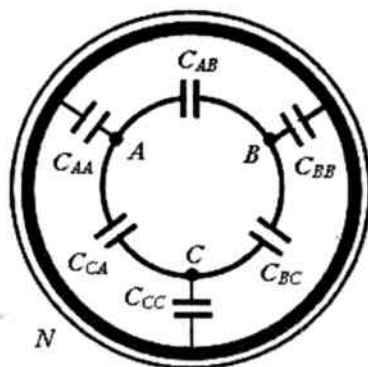


9.17-rasm. Bir fazani hisoblash.

Liniyalarni hisoblashda sig'imni e'tiborga olish. Simmetrik uzun tarmoqlarni tahlil qilganimizda, ayniqsa, faza o'tkazgichlari orasida katta sig'imga ega bo'lgan kabel tarmoqlarini ko'rganda, bir fazaga keltirilgan parametrlar bilan hisob olib borish qulay.

8.18-rasmda kabelning har bir faza o'tkazgichlari C_{AB} , C_{BC} va C_{CA} orasida sig'imlari hamda har bir faza o'tkazgichining kabel qobig'i orasidagi sig'imlari sxematik ravishda ko'rsatilgan. Ushbu sig'imlar xususiy sig'imlar deb ataladi. Simmetrik liniya (kabel) uchun

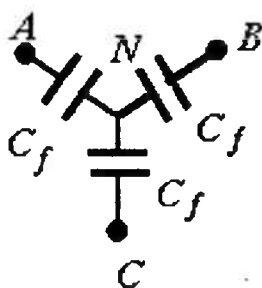
$$C_{AB}=C_{BC}=C_{CA} \quad \text{va} \quad C_{AA}=C_{BB}=C_{CC}.$$



8.18-rasm. Kabelning har bir faza o'tkazgichlari.

Faza o'tkazgichlari orasidagi C_{AB} , C_{BC} , C_{CA} sig'implar «uchburchak» ulanishini tashkil qiladilar; faza o'tkazgichlari va qobiq orasidagi sig'implar – «yulduz». Simmetrik uchburchakni o'zgartirib ekvivalent yulduz ulangan sig'implarni hosil qilamiz (8.19-rasm).

$$C_{\phi} = C_{AA} + 3C_{AB} \quad (8.35)$$



8.19-rasm. Ekvivalent yulduz ulangan sig'implar.

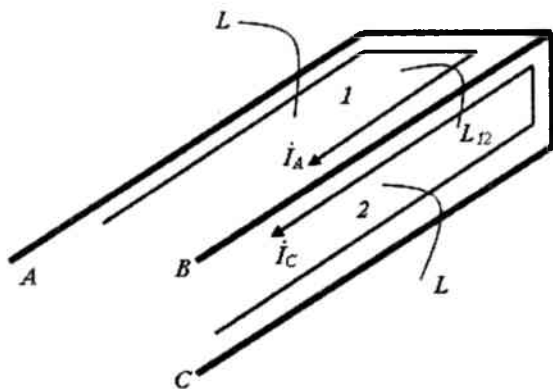
Ushbu tenglikdagi uch marta oshirilgan ($3C_{AB}$) sig'implarga e'tiborni qaratib shuni ta'kidlash zarurki, simmetrik uch burchakdan ekvivalent yulduzga o'tishda shoxobchalarning qarshiliklari

uchburchak tomonlari qarshiliklariga nisbatan 3 marta kamaytirilishi zarur; biroq qarshiliklarning kamayishi sig'implarning ortishiga olib keladi). Nisbatan uzun bo'lmagan liniyalarni hisoblash jarayonidagi bir faza hisobiga o'tishda barcha faza sig'implarini liniyaning uzunligi bo'ylab taqsimlangan emas, balki liniyaning o'rta uzunligida ulangan, yoki sig'im C_f ning yarmisi liniyaning boshida, qolgan yarmi esa liniyaning oxirida ulangan deb faraz qilinadi.

8.6 Uch fazali liniya induktivligi

Umumiy holda, uch fazali liniya zanjiridagi induktiv bog'langanlik mavjudligini isbotlash uchun ushbu uch o'tkazgichli liniyani umumiy o'tkazgichi bo'lgan ikki sirtmoqdan iborat, deb hisoblamoq maqsadga muvofiqdir (8.20-rasm).

Bu holda, ikki sirtmoqdan har biri o'zining xususiy induktivligi L_1 va L_2 ga ega bo'lib, ikki sirtmoq orasida o'zaro induktivlik $M = L_{12}$ (8.20-rasm) mavjud. Faraz qilaylik, A, B, C o'tkazgichlari bo'lgan uch fazali liniyada quvvat isrofi mavjud emas (r_f), hamda o'tkazgichning oxirida u qisqa tutashgan. AB va CB o'tkazgichli ikki sirtmoq umumiy o'tkazgich B ga ega.



8.20-rasm. Ikki sirtmoq orasida o'zaro induktivlik.

Ma'lumki, 1-sirtmoqning kirish qismidagi kuchlanish quyidagiga teng:

$$\dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{I}_A \cdot jx_1 + \dot{I}_C \cdot jx_{12} \quad (8.36)$$

bunda, $x_1 = \omega L_1$, $x_{12} = \omega L_{12}$.

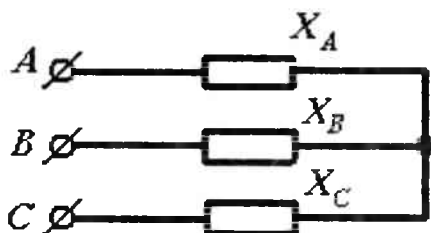
Shunga o'xshash, sirtmoq 2 ning ham kirish kuchlanishi quyidagicha aniqlanadi:

$$\dot{U}_C - \dot{U}_B = \dot{I}_C \cdot jx_2 + \dot{I}_A \cdot jx_{21} \quad (8.37)$$

bunda, $x_2 = \omega L_2$, $x_{21} = x_{12} = \omega L_{12}$.

Uch o'tkazgichli tizim bo'lganida $I_A + I_B + I_C = 0$, shuning uchun (8.36) tenglikda I_C ni I_A va I_B orqali ifodalansa, (8.37)da esa I_A ni I_B va I_C bilan ifodalansa, quyidagi tenglamalarni hosil qilamiz:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A - \dot{U}_B &= I_A j(x_1 - x_{12}) - I_B jx_{12}; \\ \dot{U}_C - \dot{U}_B &= I_C j(x_2 - x_{12}) - I_B jx_{12}. \end{aligned} \right\} \quad (8.38)$$



8.21-rasm. Ketma-ket ulangan reaktiv qarshiliklar.

Ushbu tengliklar shu bilan xususiyatlik ekanki, ular har bir A , V , S o'tkazgichlari 8.21-rasmda tasvir etilgandek faqat o'zlarining ketma-ket ulangan reaktiv qarshiliklariga ega:

$$x_A = x_1 - x_{12}; \quad x_B = x_{12}; \quad x_C = x_2 - x_{12}. \quad (8.39)$$

Bunday zanjirda qo'shimcha induktiv bog'lamishlar bo'lmaydi. 8.21-rasmdagi ekvivalent sxema, har qanday vaziyatda ham, kirishdagi kuchlanishlar ($\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$, $\dot{U}_{CA}$) va toklar ($\dot{I}_A$, $\dot{I}_C$, $\dot{I}_B = -(\dot{I}_A + \dot{I}_C)$) orasidagi bog'lanishni aniqlashga imkon beradi. Ammo,

nosimmetrik tizim bo'lganda 8.21-rasmdan foydalanib biror kirish qutblar (A, B, C) bilan zanjirning oxiridagi biror nuqta orasidagi kuchlanishni aniqlab bo'lmaydi.

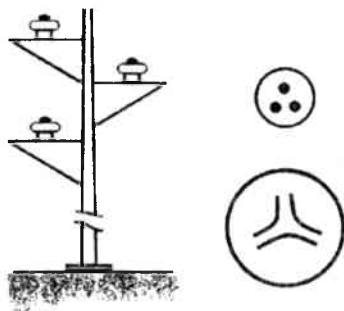
Simmetrik liniyada

$$x_A = x_B = x_C \quad (8.40)$$

Ushbu tenglik tizimning simmetrik ekanligi anglatadi; agar shu tenglik bajarilmasa, u holda nosimmetrikdir.

(8.39) va (8.40) tengliklarni taqqoslash natijasida simmetrik liniyalar uchun juda muhim, biroq tez ilg'ab bo'lmaydigan tenglik kelib chiqadi.

$$L = L_1 = L_2 = 2L_{12} = 2M \quad (8.41)$$

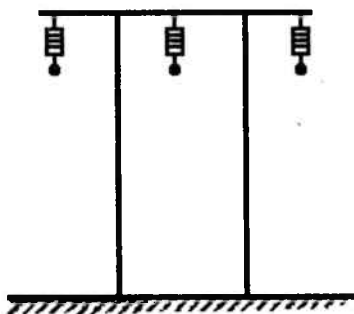


8.22-rasm. Uch dumalok tomirli o'tkazgichi bo'lgan uch fazali simmetrik kabel.

Ixtiyoriy ikki o'tkazgichli sirtmoqning *xususiy induktivligi* ixtiyoriy juft ikki o'tkazgichli sirtmoq deb qabul qilingan simmetrik uch fazali tarmoqning o'zaro induktivligidan *ikki marta kattadir*.

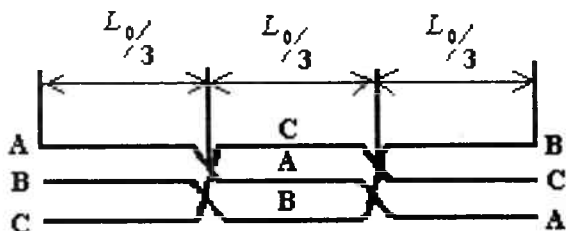
Ucho'tkazgichli liniyaning simmetriyasi ushbu o'tkazgichlarni o'ziga yarasha simmetrik joylashtirish yo'li bilan amalga oshiriladi. 8.22-rasmda uch dumalok tomirli o'tkazgichi bo'lgan uch fazali simmetrik kabel, simmetrik uch o'tkazgichli liniya (zaminning o'tkazgicha nisbatan har xil ta'sirlarini e'tiborga olmasak, u simmetrikdir) va o'nminglab amper tok qiymatiga mo'ljallangan

shina o'tkazchigi (unda ma'lum shaklda egilgan mis shinalari aylana qobiqqa joylashtirilgan) keltirilgan.



8.23-rasm. Nosimmetrik uch fazali havo liniyasi

8.23-rasmda nosimmetrik uch fazali xavo liniyasi ko'rsatilgan. U simmetrik holatga transpozitsiya (o'rin almashtirish) yo'li bilan (8.24-rasm) keltirilishi mumkin. Liniyaning ℓ_0 qismida har bir o'tkazgich galma-galdan bir-biriga nisbatan uch har xil holatda joylashadi.

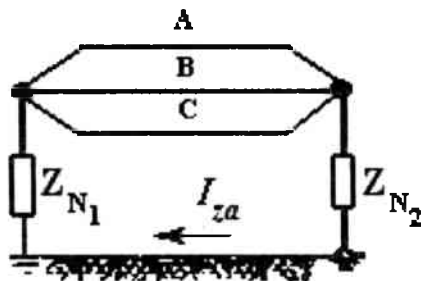


8.24-rasm. Simmetrik holatga transpozitsiya qilish.

Agar tok zamin orqali oqib o'tsa (8.25-rasm) hamda uchchala A , V , S o'tkazgichlardagi toklar nolga teng bo'lmasa, vaziyat murakkabroq kechadi.

$$I_3 = I_A + I_B + I_C. \quad (8.42)$$

Ushbu tok o'zining oqib o'chilish yo'lida ikki neytral Z_{N1} va Z_{N2} zaminlash zanjiridagi qarshiliklarni uchratadi; bundan tashqari bu tok "uch o'tkazgich-zamin" sirtmog'ida kuchlanish pasayuvini hosil qiladi. Uchchala o'tkazgichlar bir xil bo'lganda uchchala parallel o'tkazgichlardagi tok uchratayotgan aktiv qarshilik $r_0/3$ ga teng bo'ladi, bunda, r_0 - uchchala o'tkazgichdan birining aktiv qarshiligi.



8.25-rasm. Tok zamin orqali oqib o'tishi.

Tokning zamin qa'ridan oqishida ham aktiv qarshilikka uchraydi. Uning qiymati tuproqning solishtirma o'tkazuvchanligiga deyarli bog'liq emas va chastota 50 Gs bo'lganida 0,05 Om/km ni tashkil etadi. Tuproqning solishtirma o'tkazuvchanligiga bog'liq bo'lmaslik quyidagicha tushuntiriladi - tuproqning o'tkazuvchanligi ortsa, tok zaminga chuqur singmaydi, balki yer yuzida kichik kesimdan o'tadi (elektromagnit maydoni nazariyasiga qarang). Sirtmoq o'tkazgichlarining reaktiv qarshiligi quyidagicha yoziladi:

$$x_{zo} = 0,388 \ln(D/a_o),$$

bunda, a_o - o'tkazgich radiusi; D - tuproqning solishtirma qarshiligi (ρ) ga bog'liq bo'lgan shartli ekvivalent o'tkazgichning joylashish chukurligi. O'rtacha namlikdagi tuproq uchun ($\rho=10^2 \text{Om.m}$) chuqurlik $D=940$ m; toshsimon tuproq uchun ($\rho=10^4 \text{Om.m}$) chuqurlik $D=9,4$ km.

Demak, 8.25-rasmda tasvirlangan sirtmoqdagi I_z tok uchun to'liq kuchlanish pasayuvi quyidagicha aniqlanadi:

$$\dot{U} = \{Z_{N1} + Z_{N2} + [r_0/3 + j0,388 \ln(D/a_o)]\} I_z. \quad (8.43)$$

bunda, l -liniyaning uzunligi kilometrda.

Zamin toki I_z ning yo'qligida x va r larning qiymatlariga zaminning ta'siri e'tiborga olinmaydi.

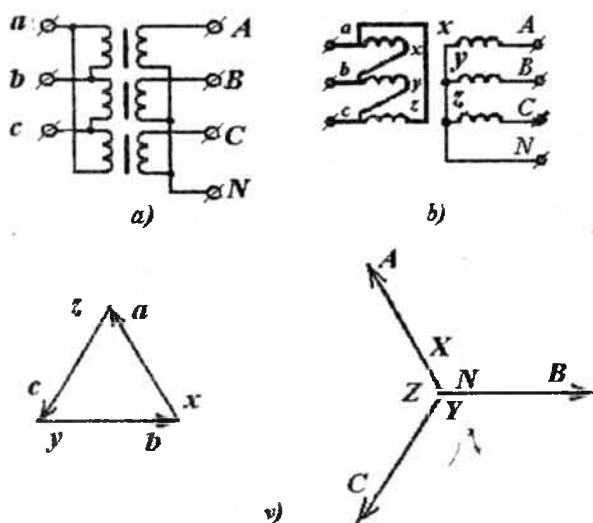
8.7 Uch fazali transformator

Uch fazali tizimlarning kuchlanishlarini uchta bir xil bir fazali transformatorlar yordamida o'zgartirish (transformatsiyalash) mumkin. Ularning chulg'amlari yulduz yoki uch burchak usulda ulanadi. Aksariyat, uchraydigan ulanishlar – quyi kuchlanish tomonida uchburchak va yuqori kuchlanish tomonida yulduz. Transformatorlarning bunday ulanishi 8.26-rasmda tasvirlangan. 8.26,a-rasmda sxematik ravishda transformator magnit o'zagi va chulg'amlari, 8.26,b-rasmda esa chulg'amlarning ulanish sxemalari keltirilgan. Bunda bir faza chulg'aming «boshi» va «keti» a, x va A, X ; ikkinchi fazaniki – b, y va B, Y ; uchinchil fazani c, z va C, Z qilib belgilangan; kichik harflar – quyi kuchlanishli chulg'amlarga, bosh harflar – yuqori kuchlanishli chulg'amlarga taaluqlidir. Chulg'amlarning ulanish usuliga bog'liq ravishda faza va liniya kuchlanishlarining u yoki bu joylanishlari hosil qilinadi. 8.26,v-rasmda chulg'amlarning 8.26,b-rasmda keltirilgan ulanishlari uchun vektorlarning joylashganligi ko'rsatilgan.

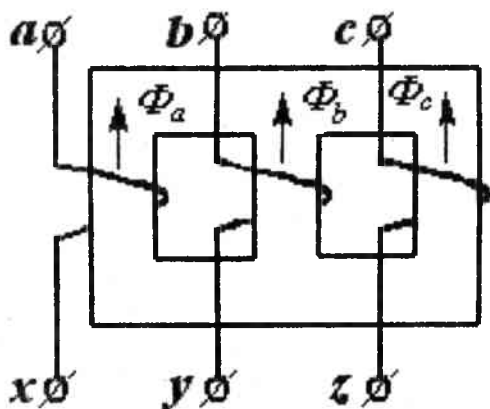
Uch fazali tizimlarda bir fazali transformatorlar qo'llanilsa ham (asosan yuqori quvvatlar va yuqori kuchlanishlarda), uch fazali transformatorlar kengroq tarqalgan. Soddalashtirilgan holatda bunday transformatorning magnit o'zagining yuqori va past qismlarida ko'ndalang ferromagnit o'zak bilan tutashtirilgan uchta ferromagnit sterjendan iborat. Har bir fazaga bir sterjen mos keladi (8.27-rasm). Sterjenlardagi magnit oqimlari mazkur faza kuchlanishlari bilan oddiy ifodalar bilan bog'langan

$$\dot{U}_{ax} = j\omega N \dot{\Phi}_a; \quad \dot{U}_{by} = j\omega N \dot{\Phi}_b; \quad (8.44)$$

Ushbu tenglamalarni keltirishda ko'rgazmali bo'lishi uchun induksiyalangan e.yu.k.lar kuchlanishlarga tenglashtirilgan, chulg'am bilan ilashgan magnit oqimining hammasi sterjendagi oqim sifatida ko'rsatilgan.



8.26-rasm. Uchta bir xil bir fazali transformatorlar.



8.27-rasm. Transformatorning magnit o'zagi.

Uchala faza kuchlanishlarining yig'indisi nolga teng bo'lsa,

$$\dot{U}_{Ax} + \dot{U}_{By} + \dot{U}_{Cz} = 0, \quad (8.45)$$

u holda sterjen oqimlari yig'indisi ham nolga teng bo'ladi

$$\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0, \quad (8.46)$$

demak, har bir sterjenning magnit oqimi qolgan ikki sterjenlar orqali tutashar ekan, masalan,

$$\Phi_A = -\Phi_B - \Phi_C.$$

Chulg'amlar uchburchak shaklda ulanganda (8.45) shart so'zsiz bajarilishi lozim. Bu shart chulg'amlar neytral o'tkazgichsiz yulduz ulanganda ham bajarilishi lozim.

Transformatorning ikkilamgi chulg'amlari birlamchi chulg'amga bog'liq bo'lmagan holda ulanadi.

Transformatorlarning bundan mufassal tahlili darslik chegarasidan chiqadi.

8.8. Aylanuvchi magnit maydon, asinxron va sinxron motorlar

O'qlari umumiy markaz (0) dan o'tgan (8.28,a-rasm) va biri-biridan 120° ga siljirilgan uchta g'altakni ko'rib chiqaylik. Bunda birinchi a g'altakdan A faza toki, ya'ni $i_a = I_m \sin \omega t$, ikkinchisi b dan V faza toki $i_b = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$ va uchinchi s orqali S faza toki $i_s = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$ oqadi. Har bir g'altak o'z o'qi yo'nalishida o'zining magnit maydonini tashkil etuvchisini hosil qiladi; uning induksiyasi tokka priorsional.

$$B = ki, \quad (8.47)$$

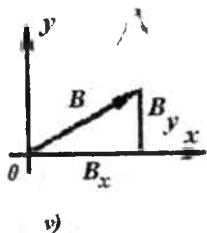
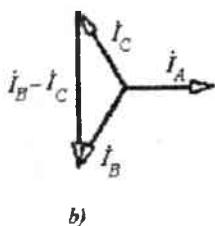
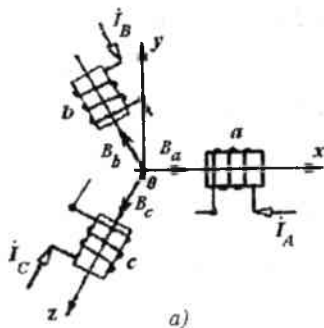
va u ham g'altak (8.28,a-rasmda) o'qi bo'ylab (V_w , V_v va V_s vektorlari) yo'naladi.

Koordinata o'qlari x va y ni shunday o'tkazaylikki, unda x o'qi a g'altakning o'qi bilan mos kelsin. Shubhasiz, to'la magnit induksiyasining x o'qi bo'ylab tashkil etuvchisi barcha uchta g'altaklarning ushbu o'q bo'ylab tashkil etuvchilarining yig'indisiga teng:

$$B_x = B_{ax} + B_{bx} + B_{sx}. \quad (8.48)$$

Shunga o'xshash, y o'qi bo'ylab tashkil etuvchilar

$$B_y = B_{ay} + B_{by} + B_{sy}. \quad (8.49)$$



8.28-rasm. O'qlari umumiy markazli uchta g'altak.

g'altaklarning geometrik joylashganligidan quyidagilarni aniqlash mumkin:

$$B_{ax} = ki_a; \quad B_{ay} = 0;$$

$$B_{xb} = -ki_b \cdot \cos 60^\circ; \quad B_{yb} = ki_b \cdot \cos 30^\circ;$$

$$B_{xc} = -ki_c \cos 60^\circ; \quad B_{yc} = -ki_c \cos 30^\circ.$$

Bu holatda

$$B_x = k[i_a - (i_b + i_c) \cos 60^\circ] = ki_a (1 + \cos 60^\circ) = \frac{3}{2} ki_a \sin \omega t, \quad (8.50)$$

(bu yerda, $i_b + i_c = -i_a$ ekanligi e'tiborga olingan).

Endi induksiya vektorining ikkinchi tashkil etuvchisini aniqlaymiz:

$$B_y = k(i_b - i_c) \cos 30^\circ.$$

Toklarning vektor diagrammalaridan (8.28, *b*-rasm)

$I_b - I_c = -j\sqrt{3} I_a$ yoki $i_b - i_c = \sqrt{3} I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$
 ekanligi ko'rinadi. U holda

$$B_y = k\sqrt{3} I_m \cos 30^\circ \sin(\omega t - 90^\circ) = \frac{3}{2} k I_m \sin(\omega t - 90^\circ). \quad (8.51)$$

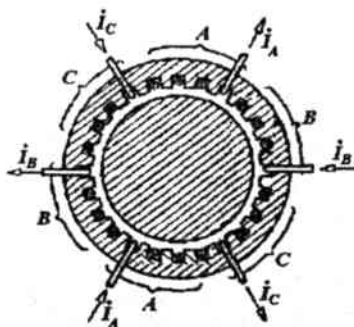
Hosil qilingan (8.50) va (8.51) bog'lanishlardan ko'rinadiki, magnit induksiyasining vektori o'z absolyut qiymatini o'zgartirmaydi.

$$B = \frac{3}{2} k I_m \quad (8.52)$$

va fazoda ω tezlik bilan aylanadi. Ushbu fikrlar 8.28, *v*-rasmida keltirilgan, chunki magnit induksiyasi vektorining qiymati quyidagi umumlashtirilgan tenglikdan aniqlandi:

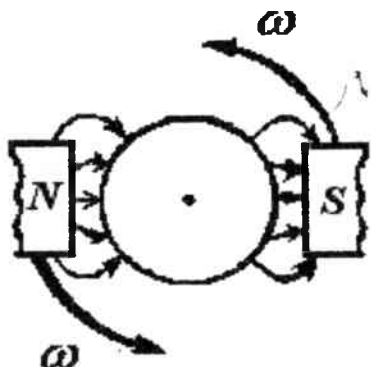
$$B = e_x B_x + e_y B_y = \frac{3}{2} k I_m [e_x \sin \omega t + e_y \sin(\omega t - 90^\circ)].$$

Agar chulg'amlar geometrik joylashganligini o'zgartirmay qoldirib, ikki chulg'amlardagi toklarning fazasini almashtirsak, masalan, *b* chulg'amiga *S* faza toki ulansa va *s* chulg'amga esa *V* faza tokini ulansa, u holda magnit maydon aylanish yo'nalishi teskari tomonga o'zgaradi.



8.29-rasm. Silindrik o'zak pazlari.

Agar uchchala g'altakning o'ramlarini ichi bo'sh ferromagnit silindrik o'zak pazlariga joylashtirib, uning ichki silindrik bo'shlig'iga silindrik ferromagnitni kiritsak (8.29-rasm), hosil bo'lgan tizimda ham aylanuvchi magnit maydoni hosil bo'ladi. Bu magnit maydoni kuchaytirilgan bo'ladi, chunki u magnit maydoni oqib o'tish yo'lining ko'p qismi magnit singdiruvganligi katta bo'lgan materialga to'g'ri keladi. Ichki silindr hamda havo oralig'idagi magnit maydoni $N-S$ magnitlarning hosil qilayotgan maydoniga o'xshash bo'lib, ω tezlik bilan aylanadi (8.30-rasm).



8.30-rasm. Silindr hamda havo oralig'idagi magnit maydon.

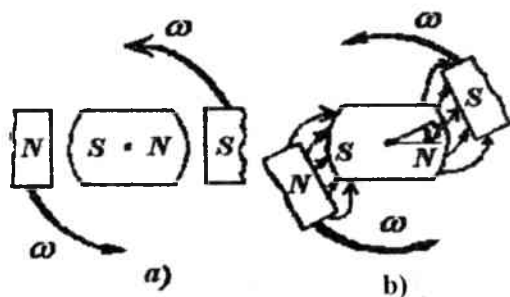
Asinxron motorning ishlash prinsipi. Yuqorida keltirilgan 8.29-rasmni asinxron motorining sxematik tasviri deb hisoblash mumkin; tashqi qo'zg'olmas xalqa-stator, uning chulg'amlari aylanuvchi maydonni hosil qiladi; aylanuvchi magnit maydoniga ergashuvchi ichki silindr-rotor. Ushbu asinxron motori tuzilishi, ishlab chiqarilishi va ekspluatatsiyasining juda sodda ekanligi, aynan shu xossalari, uch fazali tizimlarning keng tarqalishiga sabab bo'lgan motordir.

Mashxur fransuz olimi Arago o'tkazgan tajribaga ko'ra, 8.30-rasmda keltirilgan $N-S$ magnit qutublari aylantirilsa, u holda qutblar orasiga joylashtirilgan rotor (silindr yoki disk) ham unga ergashib aylanishiga ishomish mumkin. Bu hodisa shunday tushuntiriladi:

magnit maydoni ω_c tezlik bilan aylantirilganda o'tkazuvchan rotorda uyurma toklar hosil bo'ladi; bu toklar magnit maydoni bilan o'zaro tavsiri natijasida, ular rotorni ω_r tezlik bilan aylanishga yoki aylanuvchi magnit maydoniga ergashga olib keladi. Ular tezliklarining farqi $S = \omega_{\tau} - \omega_{rot}$ sirpanish deyiladi.

Agar rotor stator bilan bir xil tezlikda aylansa ($S=0$) rotorda hech qanday tok hosil bo'lmaydi, chunki bunda magnit maydon va rotor bir biriga nisbatan qo'zg'olmas bo'ladi.

Sinxron motorning ishlash prinsipi. 8.29 va 8.30-rasmlarda keltirilgan tizimlardan sinxron motorning farqi, uning rotori tuzilishidadir. Sinxron mashinaning rotori $N-S$ qutublari mavjudligi bilan farqlanadi. Bu qut-blar o'zgarmas magnit (kichik quvvatli mashinalarda) yoki elektromagnit shaklida bajarilishi mumkin. Elektromagnitli bo'lganda, halqa-shchetka tizimi orqali o'zgarmas tok manbaiga ulanadigan rotor chulg'ami mavjud.



8.31-rasm. Mashinaning rotori.

Sinxron motori ishlashini tushuntirish uchun aylanuvchi magnit maydonini aylanayotgan magnitlarning maydoni sifatida tasavvur qilaylik; mashinaning rotori ham magnit qutblari sifatida tasvirlanishi mumkin (8.31,a-rasm). Tashqi maydon (stator maydoni) o'qi rotor magnit maydoni o'qi bilan mos kelganda, rotor hech qanday aylantiruvchi moment ta'sirini sezmaydi. Agar magnit maydonlarning o'qlari mos kelmasa (brortasi γ burchakka surilgan bo'lsa), u holda rotorga aylantiruvchi moment ta'sir etadi: u maydon

o'qlarni mos holiga keltirishga intiladi va rotorni eng qisqa yo'l bilan burishga intiladi. Kulonning magnit qonuni (har xil qutblar, tortilishi) va Faradey qoidasini magnit maydoni tasviriga tatbiq etish asosida tushuntirilishi mumkin; sxematik tasviri 8.31,b-rasmda keltirilgan: magnit kuch ehiziqlarining uzunliklari qisqarishga intiladi (ularni tarqoq va tarang tartilgan iplarga qiyos qilish mumkin).

Bu motorlarning aylanish yo'nalishi stator chulg'amlarini ta'minlayotgan manba fazalari ketma-ketligigi bog'liq.

8.9. Statik yuklangan uch fazali nosimmetrik zanjir

Nosimmetrik yuk va nosimmetrik manba bo'lgandagi uchfazali zanjirlarni tahlil qilganda ularni bir nechta manbai bo'lgan tarqoq zanjir deb qarab, ularga hisoblashning umumiy usullarini qo'llash mumkin. Ushbu tasdiqni aylanuvchi mashinasi bo'lgan zanjirlarga tatbiq etib bo'lmaydi. Chunki ularning ekvivalent qarshiliklari berilgan kuchlanishning nosimetriya darajasiga bog'liq.

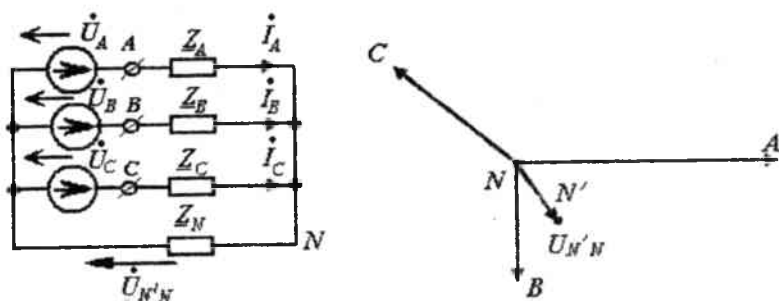
Ba'zi holatlarda uch fazali transformatori bo'lgan zanjirlarga ham tatbiq etilishi mumkin emas. Ushbu masala nosimmetrik tizimlarni hisoblashning maxsus usullari (§8.10) bo'limida kengroq ko'riladi.

Bunda biz generatorning berilgan kuchlanishida (uning ichki qarshiligini hisobga olmay) statik yuklari bo'lgan (aylanuvchi mashinasiz) zanjirlarni ko'rish bilan cheklanamiz. Nosimmetrik uch fazali tizimlarning ba'zi xarakterli misollarini ko'ramiz.

Yulduz-yulduz. Ushbu zanjirlarni (8.32-rasm) faza kuchlanish $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ larning ixtiyoriy qiymatlarida, yuk yulduzi shohobchalari $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$ va neytral o'tkazgich $\underline{Z}_N$ qarshiliklarining ixtiyoriy qiymatlarida ikki tugunli zanjir sifatida hisoblash maqsadga muvofiqdir.

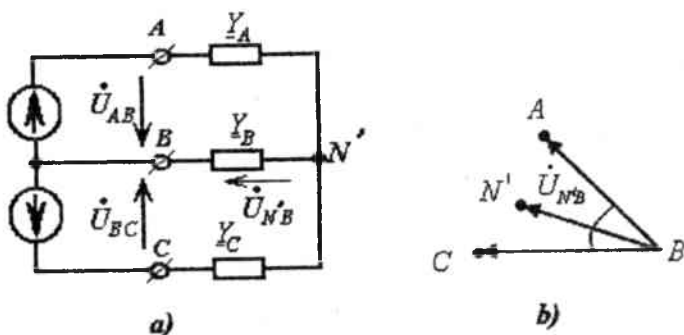
Bunda, birinchi galda, neytralning siljishini ikki tugun zanjiri bog'lanishi (3.73) dan aniqlash zarur:

$$\dot{U}_{NN} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N} \quad (8.54)$$



8.32-rasm. Yulduz-yulduz ulanish.

Bu kuchlamish ma'lum bo'lsa, topografik diagrammada (8.33,b-rasm) N' nuqtaning joylanganligini aniqlash oson. Hisoblashning keyingi tartibi aniq. Oxirgi tenglikdan foydalanib, faqat V shohobchadagi qarshilik o'zgargandagi $U_{N'B}$ vektorning geometrik o'rni aniqlash oson. Aytaylik, $y_B = \text{var}$ da hamda $\varphi_B = \text{const}$ bo'lgandagi faza o'tkazuvchanligi $Y_B = y_B \angle -\varphi$ bo'lsin.



8.33-rasm. Yulduz-yulduz ulanish va topografik diagramma.

Unda $U_{N'B}$ uchun aylana diagrammasining tenglamasini hosil qilamiz:

$$U_{N'B} = \frac{C}{1 + x \angle -\delta} \quad (8.55)$$

bunda, $C=(\dot{U}_{AB}\cdot\underline{Y}_A+\dot{U}_{CA}\cdot\underline{Y}_C)/(\underline{Y}_A+\underline{Y}_C)$ va $x=y_B/|(\underline{Y}_A+\underline{Y}_C)|$.

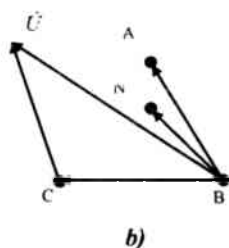
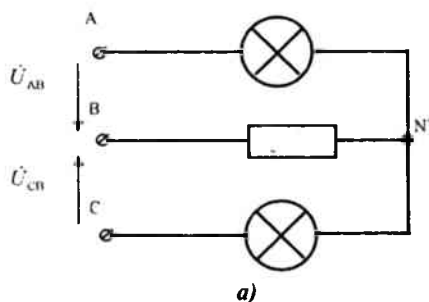
Burchak $\delta = const$ ning qiymatini ham aniqlash mumkin.

Fazalar ketma-ketligini aniqlash uchun zanjir. Fazalardan biriga, masalan, V fazasiga, sof reaktiv element (sig'im yoki induktivlik) ulab, qolgan ikki fazaga bir xildagi qizish lampasini (8.34 a-rasm) ulanadi. Nosimmetriya natijasida neytral nuqta N ning siljishi sababli ikki lampadan birining yoruqligi katta, ikkinchisi esa sust bo'ladi. Agar V fazaga kondensator ulangan bo'lsa, u holda yorug'ligi ko'p lampa S kechikuvchi fazada bo'ladi.

Darxaqiqat, (8.54) tenglikka ko'ra,

$$\dot{U}_{N'B} = \dot{U} \frac{d}{2g + j\omega C},$$

bunda, $U = U_{AB} + U_{CB}$ (8.34, b-rasm); $g = 1/r$.

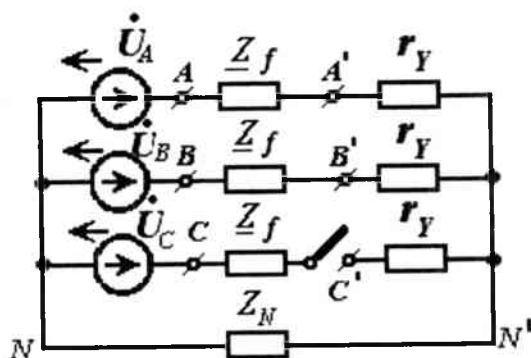


8.34-rasm. Fazalar ketma-ketligini aniqlash.

Agar V fazada induktivlik ulangan bo'lsa, u holda A o'zuvchi fazada yorug'lik ko'p lampa bo'ladi.

8.2-Misol. Faza o'tkazgichlari qarshiliklari $Z_r=r_r=005$, Om va to'rtinchi neytral sim qarshiligi $Z_N=r_N=0,14$ Om bo'lgan kabel (sim kesim yuzasi 35 mm^2 , uzunligi 100m) liniyasi orqali har birining quvvati 10 kVt, kuchlanishi 127 V bo'lgan va har biri faza va neytralga ulangan uch guruh yuk ta'minlanadi. Kabelning kirish qismidagi kuchlanish $U_f=130B$.

Har bir yuk guruhining qarshiliklari $r_H = 1,61 \text{ Om}$ ga teng va kuchlanishga bog'liq bo'lmasa, quyidagi shartlarda kabel chiqishidagi $\dot{U}'_f$ faza kuchlanishini aniqlang: 1) normal yuklanish bo'laganda va 2) bir guruh lampalarni o'chirib (tok faqat ikki fazada mavjud) (8.35-rasmga qarang).



8.35-rasm. Nosimmetriya hosil etish.

Yechish: 1) Normal yuklanish bo'lganda (hamma fazalarida yuk simmetrik ulanganda) $U_{N'N} = 0$ bo'ladi, shuning uchun $I = U_f / (r_f + r_Y)$ va $U'_\phi = I r_H = 126 \text{ B}$.

2) Bir faza uzilganda, 8.35-rasmdagi zanjir hisoblanadi. Uning uchun

$$U_{N'N} = \dot{U}_A Y_A \frac{1 + a^{-1}}{2Y_A + Y_N} = 4,66 - j8,12 \text{ B},$$

bunda, $\dot{U}_A = U_A = 130 \text{ B}$, $Y_A = 1 / (r_f + r_Y)$, $Y_N = 1 / Z_N$.

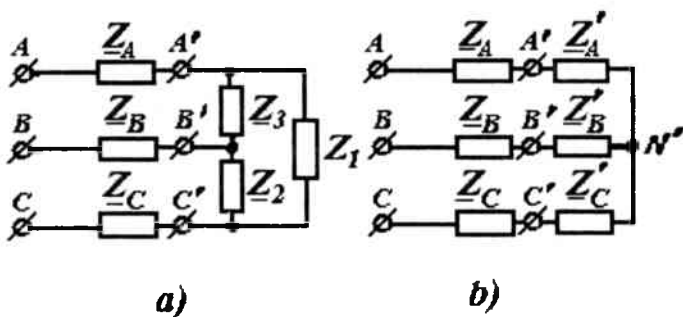
A va V fazalardagi toklar:

$$I_A = (\dot{U}_A - \dot{U}_{N'N}) Y_A = 75,5 \angle 3^\circ 40' \text{ A},$$

$$I_B = (\dot{U}_B - \dot{U}_{N'N}) Y_A = 75,5 \angle -123^\circ 40' \text{ A}.$$

Bunda lampalar ulangan guruhlardagi kuchlanishlar quyidagicha bo'ladi:

$$\dot{U}'_A = I_A r_Y = \dot{U}_B = I_B r_Y = 122 \text{ B}.$$



8.36-rasm. Aralash ulashishlar.

Aralash ulashnislilar. Agar yuk uchburchak ulansa va liniya kuchlanishlari ma'lum bo'lsa, har bir shoxobchadagi tok Om qonuni asosida aniqlanadi. Biroq, kuchlanishlari ma'lum bo'lgan manbaning A, B, C qutblari bilan uchburchak ulangan yukning orasida liniyaning faza qarshiliklari (8.36,a-rasmdagi $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$) ulangan bo'lsa, masalaning yechimi murakkablashadi. Bu holda uchburchak qarshiliklari ($\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$)ni ekvivalent yulduzga aylantirish tavsiya etiladi: bu yangi yulduzning shoxobchalari qarshiliklari ($\underline{Z}'_A, \underline{Z}'_B, \underline{Z}'_C$) liniyaning faza qarshiliklariga ketma-ket ulangan bo'lib qoladi va endi ilgari ma'lum bo'lgan zanjir hisoblanadi.

Ushbu zanjirda A', B', C' tugunlari potentsiallarini aniqlanib, uchburchak shoxobchalaridagi toklarni aniqlash oson.

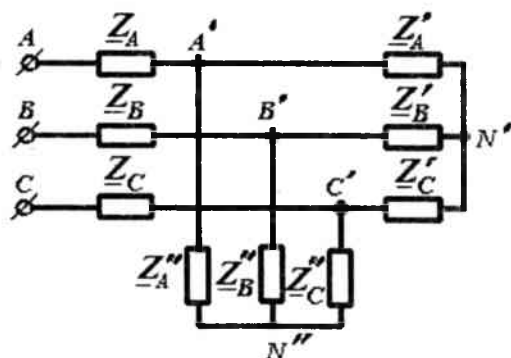
Agar A', B', C' tugunlarga uchburchakdan tashqari yulduz ulangan yuk qo'shilsa, masala yanada murakkablashadi. Bu holatda quyidagilar tavsiya etiladi;

1) yulduzni uchburchakka o'zgartirish; 2) ikki uchburchaklarning mazkur parallel shoxobchalarini qo'shish; 3) yangi hosil bo'lgan umumiy uchburchakni ekvivalent yulduzga aylantirish va 8.36, b-rasmdagi zanjirga keltirib hisoblash.

Avval uchburchakni yulduzga aylantirsak, 8.37-rasmda keltirilgandek, A', B', C' tugunlarga ulangan ikki yulduzli zanjir hosil qilgan bo'lar edik. Biroq, bunday kichik «3» V yulduzlarning

shohobchalarini parallel ulangan deb bo'lmas edi, chunki ularning N' va N'' neytralari har xil potentsialli bo'lishi mumkin.

8.37-rasmdagi zanjirni hisoblashda quyldagiga amal qilish zarur; 1) avvalo, har bir yulduzni uchburchakka aylantirish zarur; 2) ikki uchburchakning parallel shohobchalarini qo'shib, bir ekvivalent uchburchakka keltirish; 3) bu bltta ekvivalent uchburchakni ekvivalent yulduzchaga aylantirish.



8.37-rasm. Ikki yulduzli zanjir.

Oxirgi amaldan so'ng nosimmetrik uch fazali zanjirlarni (8.36. b-rasmdagidek) hisoblashga o'tiladi.

Ushbu aylantirish usulining ko'rgazmali va universal ekanligini usulni amerikalik muhandis Kennelining aynan uch fazali nosimmetrik zanjirlarni hisoblash uchun taklif etganligidan ko'rish mumkin. Bu usul boshqa turdagi murakkab zanjirlarni hisoblashda ham keng qo'llaniladi.

Real uch fazali zanjirlarning nosimmetrik rejimlarga ta'sirining ko'pgina xususiyatlari 8.10 bo'limda ko'riladigan maxsus usulga o'tish zaruratiga olib keladi.

8.10. Nosimmetrik uch fazali zanjirlarning simmetrik tashkil etuvchilari

Nosimmetrik vektorlar tizimini uchta simmetrik vektorlarga ajratish. Garmonik o'zgarayotgan qiymatlarni tasvirlovchi uch

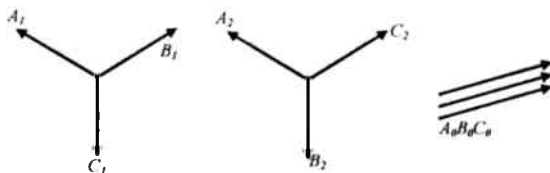
vektorlarni (yoki komplekslarni) A, B, C , harflari bilan belgilaymiz. Uch vektor to'g'ri ketma-ketlik simmetrik tizimini tashkil etadi va "1" indeks bilan belgilanadi. Bunda,

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= aB_1 = a^2C_1, \text{ yoki} \\ B_1 &= a^2A_1, C_1 = aA_1, \end{aligned} \right\} \quad (8.56)$$

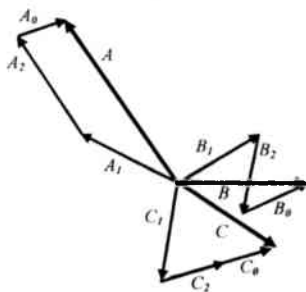
bunda, a -avvaldan ma'lum uch fazali tizimning faza ko'paytirgichi (8.6-rasm). To'g'ri ketma-ketlikning uch vektori 8.38,a-rasmning chapida tasvirlangan.

Yana uch vektorlar boshqa simmetrik tizimni - *teskari ketma-ketlik* deb nomlangan tizimni hosil qilaishi mumkin. Teskari ketma-ketlik vektorlari "2" indeks bilan belgilanadi. Teskari ketma-ketlik simmetrik tizimida B_2 vektori A_2 vektoridan $2\pi/3$ fazali burchagiga ilgarilab ketadi va C_2 vektordan $2\pi/3$ burchakka kechikadi (8.38,a-rasmning o'rtasida). Demak, teskari ketma-ketlikni hosil qiluvchi ushbu vektorlar tizimi uchun quyidagilarni yozish mumkin:

$$B_2 = aA_2, \quad C_2 = a^2A_2. \quad (8.57)$$



a)



b)

8.38-rasm. Simmetrik vektorlarga ajratish.

Uchta vektorlar uchinchi simmetrik tizimni ham hosil qilishi mumkin. Uni nol ketma-ketlik tizimi deb ataladi va mazkur vektorlarni «0» indeks bilan belgilanadi. Uchta nol ketma-ketligi vektorlari bir-birlariga teng (8.38,*a*-rasm) o'ngda).

$$A_0 = B_0 = C_0. \quad (8.58)$$

Uchchala ketma-ketliklarning birxil nomli vektorlarini o'zaro qo'shib nosimmetrik tizimni (8.38,*b*-rasm) hosil qilamiz.

$$A = A_0 + A_1 + A_2;$$

$$B = B_0 + B_1 + B_2;$$

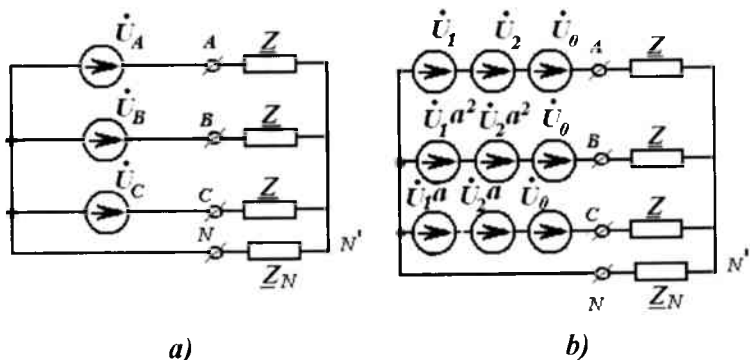
$$C = C_0 + C_1 + C_2.$$

Har bir simmetrik tashkil etuvchilarni vektorlar A_0, A_1, A_2 orqali (8.56)-(8.58) tengliklar bilan ifodalasak, yuqoridagi tengliklar tizimini quyidagicha yozish mumkin:

$$A = A_0 + A_1 + A_2;$$

$$B = A_0 + a^2 A_1 + a A_2; \quad (8.59)$$

$$C = A_0 + a A_1 + a^2 A_2.$$



8.39-rasm. Yulduz ulangan generator faza kuchlanishlari.

Ushbu tenglamalar tizimining aniqlovchisi noldan farqlidir. Shuning uchun, ushbu tenglamalar tizimi berilgan A, B, C larda A_0, A_1, A_2 larga nisbatan yechilishi mumkin:

$$\begin{aligned} A_0 &= (A + B + C)/3; \\ A_1 &= (A + aB + a^2C)/3; \\ A_2 &= (A + a^2B + aC)/3 \end{aligned} \quad (8.60)$$

Agar, $a^3 = 1$ va $1 + a + a^2 = 0$ ekanligini nazarda tutsak, u holda ushbu tenglamalar tizmini yechish oson. Masalan, yulduz ulangan generatorning faza kuchlanishlari nosimetrik va U_A, U_B, U_C ga teng bo'lsin (8.39, a-rasm). Ushbu generator quyidagi shart bilan

$$\left. \begin{aligned} U_A &= U_1 + U_2 + U_0; \\ U_B &= a^2 U_1 + a U_2 + U_0; \\ U_C &= a U_1 + a^2 U_2 + U_0. \end{aligned} \right\} \quad (8.61)$$

har bir fazasida uchta kuchlanish manbai bo'lgan holatga keltirilish mumkin. Shuning uchun

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= (U_A + U_B + U_C)/3; \\ U_1 &= (U_A + aU_B + a^2U_C)/3; \\ U_2 &= (U_A + a^2U_B + aU_C)/3. \end{aligned} \right\} \quad (8.62)$$

Har xil ketma-ketlik tashkil etuvchilari simmetrik zanjirlari qarshiliklarining fizik farqlari. Nosimetrik manbali zanjirni hisoblashda hamma parametrlar chiziqli bo'lganda superpozitsiya usulini qo'llashi mumkin. Bunda simmetrik parametrlar hisoblash uch bosqichdan iborat bo'ladi;

1) simmetrik manbaning to'g'ri ketma-ketligi ta'sir etayotganda to'g'ri ketma-ketlikning simmetrik toki aniqlanadi;

$$I_1 = U_1 / \underline{Z}_1;$$

2) o'sha A fazasi uchun teskari ketma-ketlik toki aniqlanadi;

$$I_2 = U_2 / \underline{Z}_2;$$

3) nol ketma-ketlik toki aniqlanadi;

$$I_0 = U_0 / \underline{Z}_0.$$

Tokning barcha simmetrik tashkil etuvchilari aniqlangandan so'ng A, B, C fazalardagi toklarni (8.59)dan foydalanib aniqlanadi;

$$I_A = I_0 + I_1 + I_2; \quad I_B = I_0 + a^2 I_1 + a I_2; \quad I_C = I_0 + a I_1 + a^2 I_2.$$

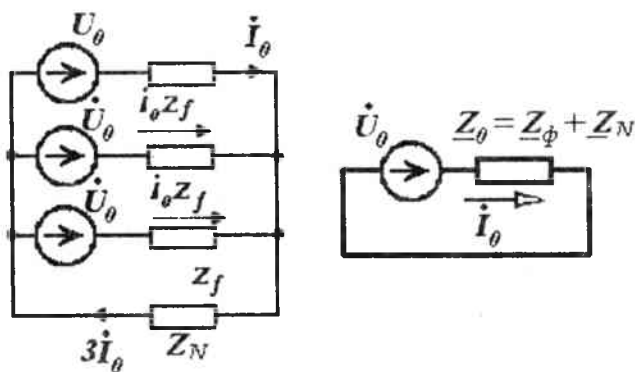
Ushbu hisoblashni amalga oshirish uchun faza qarshiligining to'g'ri ($\underline{Z}_f$), teskari ($\underline{Z}_f$) va nul ($\underline{Z}_0$) tashkil etuvchilarini bilish zarur. Umumiy holda bu qarshiliklar xar xil.

Nol ketma-ketlik toki uchun qarshilik. Neytrali bo'lgan simmetrik yulduz ulangan zanjirga nol ketma-ketlik manbai ta'sir etganda (8.40-rasm) har bir faza o'tkazgichlaridagi toklar birxil (I_0), neytral o'tkazgichda esa $I_N = 3I_0$. Shuning uchun, agar har bir faza qarshiligi $\underline{Z}_f$, neytral o'tkazgich qarshiligi $\underline{Z}_N$ bo'lsa, u holda Kirxgofning ikkinchi qonuni asosida

$$U_0 = I_0 \underline{Z}_f + 3I_0 \underline{Z}_N = I_0 \underline{Z}_0, \quad (8.63)$$

bundan bir fazadagi nol ketma-ketlik toki uchun qarshilik quyidagiga teng:

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_f + 3\underline{Z}_N \quad (8.64)$$



8.40-rasm. Nol ketma-ketlik toki uchun qarshilik.

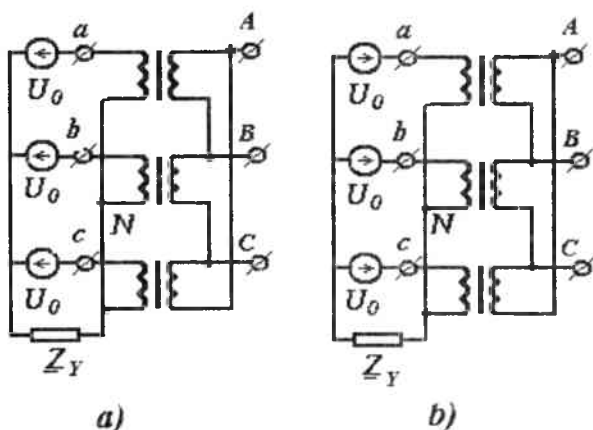
Nol ketma-ketlik toki zanjirda neytral o'tkazgichi bo'lganda yoki liniya boshi va oxirida zaminlangan neytral bo'lganda oqishi mumkin. Keyingi holatda $\underline{Z}_0$ ning qiymati, asosan, «o'tkazgich-zamin» tizimining qarshiligi bilan, (8.64) va (8.43) tengliklar yordamida ifodalanadi;

$$\underline{Z}_0 = 3(\underline{Z}_{N1} + \underline{Z}_{N2}) + [r_0 + 0,15 + j1,01 \ln(D/a_{\text{eff}})]l. \quad (8.65)$$

Zanjirga transformator yoki aylanuvchi mashina ulanganda vaziyat butkul boshqacha bo'ladi.

8.41-rasmda bir fazali transformatorlar uch fazali zanjir sifatida ulangan. Ularning birlamchi chulg'amlari yulduz ulangan; neytrallari esa generator neytrallari bilan ulangan.

Transformatorlarning ikkilamchi chulg'amlari tashqi zanjirdan uzilgan (yuksiz ishlash rejimi.) 8.41, *a*-rasmda ikkilamchi chulg'am yulduz ulangan, 8.41, *b*-rasmda esa uchburchak. Ikkala transformatorlarning ham barcha boshqa parametrlari bir xildir. Ushbu ikki holatda transformatorlarning chulg'amlari nol ketma-ketlik tokiga bir xildagi Z_0 qarshilikni ko'rsatadimi?



8.41-rasm. Transformatorning ikkilamchi chulg'amlari.

Yulduz-yulduz ulangan transformatorlarning ikkilamchi chulg'amlarida tok bo'lmaydi, transformatorning har bir fazasidagi qarshilik juda katta; u transformatorning *yuksiz ishlagandagi* kirish qarshiligiga teng $Z_{0m} = Z_{1Y}$. Bunda ikkilamchi chulg'amlarda e.y.k. induksiyanadi, biroq, ular axamiyatli emas, chunki ikkilamchi chulg'am yulduz ulanib, tashqi yuk uzilgan (ikkilamchi chulg'amdan tok o'tmaydi).

Ikkilamchi chulg'amlari uchburchak ulangan transformatorlarda nol ketma-ketligi ta'sirida shunday tok hosil bo'ladiki, uning

qiymati qisqa tutashuvdagidek katta bo'ladi. Darhaqiqat, nol ketma-ketlik toki uchchala fazalarda qiymatlari teng va fazalari mos keladi. Bu holatda, transformatorning birlamchi chulg'ami tomonidan bir faza qarshiligi, ikkilamchi chulg'amning $\underline{Z}_{1q}$ qisqa tutashuvdagi transformatorning kirish qarshiligiga teng $\underline{Z}_{0m} = \underline{Z}_{1q}$. Transformatorlarda $\underline{Z}_{1r}$ ning qiymati $\underline{Z}_{1q}$ ning qiymatidan 100 va undan ko'p marta ortiqdir.

Agar uch fazali tizimda uch sterjenli magnit o'zagi bo'lgan (8.27-rasm) va chulg'amlari yulduz-yulduz ulangan transformator ulangan bo'lsa $\underline{Z}_{0m}$ ning qiymati $\underline{Z}_{1r}$ qiymatidan ancha kichik, chunki uchchala sterjendagi F_0 oqim bir xil bo'ladi, shu tufayli, F_0 ning hammasi to'laligicha ferromagnit o'zak orqali oqib o'ta olmaydi. Shuning uchun chulg'amlar induktivligi anchagacha kamayadi.

Transformatorning aniqlangan nol ketma-ketlik qarshiliklari $\underline{Z}_{0m}$ yuqorida ko'rilgan umumiy qo'shiluvchilar bilan birgallikda $\underline{Z}_0$ ning tarkibiga kiradi. Bundan tashqari uning tarkibida generatorning ham nol ketma-ketlik qarshiligi, hamda albatta, yuqorida keltirilganidek, zamin va liniyaning qarshiliklari ham kiradi.

To'g'ri va teskari ketma-ketlik qarshiliklari. Aylanuvchi mashinalar bo'lmagan simmetrik zanjirlarda to'g'ri va teskari ketma-ketlik qarshiliklari o'zaro mos bo'ladi;

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_r \quad (8.66)$$

Aylanuvchi mashinalar bo'lgan elektr zanjirlarida esa vaziyat butkul boshqadir; ularda uchchala ketma-ketliklarning qarshiliklari har xil bo'ladi.

Simmetrik tashkil etuvchilar orqali ifodalangan quvvat. Zanjirda kuchlanish va tokning $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$ va I_1, I_2, I_0 simmetrik tashkil etuvchilari ma'lum bo'lsin. Bunday tizimning uzatayotgan quvvati

$$\tilde{S} = \dot{U}_A \dot{I}_A + \dot{U}_B \dot{I}_B + \dot{U}_C \dot{I}_C,$$

to'g'ri $\tilde{S}_1 = \dot{U}_1 \dot{I}_1$, teskari $\tilde{S}_2 = \dot{U}_2 \dot{I}_2$ va nol $\tilde{S}_0 = \dot{U}_0 \dot{I}_0$ ketma-ketliklarning uzatayotgan quvvatlari yig'indisiga teng. Boshqacha qilib aytganda, tokning bir ketma-ketligi va kuchlanishning boshqa

ketma-ketligi o'zaro ta'siridagi quvvat nolga teng. Simmetrik tashkil etuvchilar ajratilishining ortogonalligi ham shuning uchundir.

Ushbu qiymat

$$\tilde{S} = \tilde{S}_1 + \tilde{S}_2 + \tilde{S}_0 \quad (8.67)$$

ekanligi isbotlash oson, masalan, nol ketma-ketlik toki va kuchlanishning to'g'ri ketma-ketligi uchun

$$U_1 I_0 + a^2 U_1 I_0 + a U_1 I_0 = U_1 I_0 (1 + a^2 + a) = 0.$$

Shunga o'xshash ifodalar tokning to'g'ri ketma-ketligi va kuchlanishning teskari ketma-ketligi uchun ham aniqlanadi.

Nosimmetrik tizimning umumiy holati. Agar manba va zanjirning parametrlari nosimmetrik bo'lsa, ixtiyoriy simmetrik tashkil etuvchining e.y.k.i tokning barcha uchchala tashkil etuvchilarini hosil qilishi mumkin. Bunday zanjirlarning tenglamalarini quyidagi shaklga keltirish mumkin:

$$\dot{E}_k = \underline{Z}_{kf} I_f \quad \text{va} \quad I_f = \underline{Y}_{fk} \cdot \dot{E}_k.$$

Bu ifodalardagi $\underline{Z}_{kf}$ va $\underline{Y}_{fk}$ -bir simmetrik tashkil etuvchining boshqasiga nisbatan uzatish qarshiligi va uzatish o'tkazuvchanligidir.

Murakkab elektr zanjirlarini hisoblashda va tahlil qilishda simmetrik tashkil etuvchilar usuli juda muhimdir. Yuqorida ushbu usulning faqat prinsipal asoslari berildi. Usulning kengaytirilgan tartibdagi o'zlashtirilishi esa boshqa fanlarda maxsus ko'riladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники, Т.1. 4-е изд. - СПб.: «Питер», 2003. -462 с.
2. Amirov S.F., Yaqubov M.S., Jabborov N.G'. Elektrotexnikaning nazariy asoslari.Birinchi kitob.-T., 2006, -145 b.
3. Каримов А.С. Назарий электротехника. 1-том. -Т.: «Ўзбекистон», 2003. -422 б.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров. 11-е изд. – М.: Издательство Юрайт, 2012. – 701 с.
5. Башарин С.А., Федоров В.В. Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей и электромагнитного поля.-М.: «Академия», 2004.-304 с.
6. Бакалов В.П., Воробийенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей.: Учебник для ВУЗов; Под ред. В.П. Бакалова, -М.: Радио связь, 1998. -444 с.
7. Белецкий А.Ф. Теория электрических цепей: Учебник для ВУЗов. -М.: Радио и связь, 1986. -544 с.
8. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи: Учебник для ВУЗов. 3-е изд., -М.: Высш. шк., 1990. -400 с.

9. Рашидов Ю.Р., Колесников И.К., Абидов К.Г. Электро-динамика и распространение радиоволн. Учебное пособие.-Т., 2003.-242 с.

10. Rashidov Y.R., Abidov K.Т., Kolesnikov I.K. Elektrotexnikaning nazariy asoslari. (Ma'ruza matnlar), -Т.: TDTU, 2002. -250 b.

11. Антонью А. Цифровые фильтры: анализ и проектирование: Пер. с англ. -М.: Радио и связь, 1993. -320 с.

12. Бекжонов Р.К., Камолхўжаев Ш.М., Ризаев З. Физикадан русча-ўзбекча атамалар лугати. -Т.: «Ўқитувчи», 1990. - 296 б.

13. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. М.: «Энергия», 1965.

14. Крылов В.В., Корсаков С.Я. Основы теории цепей для системотехников: Учеб. Пособие для ВУЗов. - М.: Высш. шк., 1990. -224 с.

15. Ruscha-o'zbekcha politexnika atamalar lug'ati. O.U.Salimov bosh muharrirligida. -Т.: «Fan», 1995. -360 b.

16. Elektrotexnik atamalar va tushunchalar ruscha –o'zbekcha va o'zbekcha-ruscha lug'oti. T.S.Kamalov umumiy muxarrirligida. - Т.: «Hihol», 2013.-824 b.

17.<http://www.toehelp.ru/>

18.<http://fismat.ru/elect/ozonov/>

19.<http://electrofaq.com/TOE.htm>

20.<http://electcsys.chat.ru/>

21.www.Ziyo.net

Elektr zanjirlar nazariyasi fanida qo'llaniladigan asosiy birliklar (xalqaro tizim «si»)

Qiymatlar	Birliklar	Belgilanishi	
		Xalqaro tizimda	Hozirgacha nashr etilgan adabiyotlarda
Uzunlik	metr	m	m
Massa	kilogramm	kg	kg
Vaqt	sekund	s	s
Tok kuchi	Amper	A	A
Kuchlanish, potensial, e.yu.k.	Volt	V	V
Elektr miqdori, zaryad	Kulon	C	Kl
Ish, energiya	Joul	J	J
Aktiv quvvat	Vatt	W	Vt
Reaktiv quvvat	VAr	VAr	$V \cdot A \cdot r$
To'la quvvat	Volt-Amper	$V \cdot A$	$V \cdot A$
Qarshilik	Om	Ω	Om
O'tkazuvchanlik	Simens	S	Sm
Sig'im	Farada	F	F
Induktivlik, o'zaro induktivlik	Genri	H	G

Chastota	Gers	Hz	Gs
Kuch	Nyuton	N	N
Tok zichligi	Amper/metr ²	A/m^2	A/m^2
Solishtirma qarshilik	Om · metr	$\Omega \cdot m$	$Om \cdot m$
Solishtirma o'tkazuvchanlik	Simens/metr	S/m	Sm/m
Elektr maydon kuchlanganligi	Volt/metr	V/m	V/m
Magnit induksiyasi	Tesla	T	T
Magnit maydoni	Veber	Wb	Vb
Magnit maydon kuchlanganligi	Amper/metr	A/m	A/m

MUNDARIJA

Kirish.....	3
Asosiy belgilar.....	6

1. Elektr va magnit maydon xususiyatlari, tok va kuchlanishlar tavsiflari

1.1 Zaryadlangan zarrachalar va elektromagnit maydon, elektr maydonining o'tkazgichdagi tok bilan bog'liqligi.....	8
1.2 O'tkazuvchanlik, ko'chirish va siljish toklari, tokning uzluksizligi.....	14
1.3 Kuchlanish, potensiallar farqi, elektr yurituvchi kuch.....	24

2. Elektr zanjirlarining elementlari va asosiy tushunchalari

2.1 Elektr va magnit zanjirlari.....	35
2.2 Elektr zanjirlarining elementlari	37
2.3 Elektr zanjirlarining fizik xususiyatlari, elektr zanjirlarini soddalashtirish.....	39
2.4 Elektr zanjiri elementlaridagi tok, kuchlanish va E.Y.K. larning shartli musbat yo'nalishlari	51
2.5 E.Y.K. va tok manbalari.....	54
2.6 Elektr zanjirlarining sxemalari.....	58
2.7 Elektr zanjiri sxemasining topologiyasi, sxema grafi...	65

2.8	Elektr zanjirlarining tahlili va sintezi.....	69
-----	---	----

3. O'zgarmas tok elektr zanjirlarini tahlil qilishda asosiy qonunlar va usullar

3.1	Elektr zanjirlar uchun Kirxgof va Om qonunlari.....	72
3.2	Oddiy elektr zanjirlari uchun Om va Kirxgof qonunlarini qo'llash.....	78
3.3	Kirxgof qonunlarini tatbiq etish.....	84
3.4	Kirxgof qonunlari asosida tuzilgan tenglamalar to'liqligi.....	87
3.5	Superpozitsiya (ustlash yoki jamlash) prinsipi.....	90
3.6	Kompensatsiya usuli.....	93
3.7	Chiziqlilik prinsipi.....	95
3.8	Ekvivalent generator usuli.....	98
3.9	Kontur toklar va tugun potentsiallari usullari.....	102
3.10	O'zarolik prinsipi.....	111
3.11	Elektr zanjir sxemalarida «uchburchak» ulashdan ekvivalent «yulduz» ulashga va aksincha o'tkazish tenglamalari.....	113

4. O'zgaruvchan tok zanjirlari

4.1	Umumiy tushunchalar.....	119
4.2	Rezistor va kondensatorli zanjirda o'zgaruvchan tok...	123
4.3	Davriy miqdor ta'sir etuvchi (effektiv) qiymati.....	127

4.4	Induktivlik va rezistori bo'lgan zanjirda o'zgaruvchan tok	128
4.5	Induktivlik, sig'im va rezistorli zanjirda o'zgaruvchan tok.....	131
4.6	O'zgaruvchan tok zanjiri uchun Kirxgof qonunlari.....	135
4.7	Oddiy garmonik funksiyalar ustida matematik amallar, geometrik usul	137
4.8	Kompleks (simvolik) usul.....	139
4.9	Kompleks tekislikda to'g'ri chiziq tenglamaci.....	149

5. Tarkibida L , R , C bo'lgan chiziqli o'zgaruvchan tok zanjiri nazariyasi va hisoblash usullari

5.1	Elektr zanjiri tenglamalarining kompleks shakldagi ko'rinishlari.....	151
5.2	Kompleks tekislikda potensial diagramma.....	160
5.3	O'zgaruvchan tok zanjirida quvvat.....	164
5.4	Energiyaning uzatilishl.....	172

6. Rezonans, chastotaviy tavsif va uzatish funksiyalari

6.1	Elektr zanjirlarida rezonans hodisalarining tahlili.....	181
6.2	Kuchlanishlar rezonansi.....	183
6.3	Toklar rezonansi.....	190
6.4	Chastotaviy tavsiflar.....	193
6.5	Zanjir elementlarining chastotaviy tavsiflari.....	201

6.6	Zanjirning uzatish funksiyasi.....	214
-----	------------------------------------	-----

7. Elektr zanjirlarida o‘zaro induktivlik

7.1	O‘zaro induktiv bog‘langan elementli zanjirlar.....	217
7.2	Induktiv bog‘langan zanjirlarni xususiyatlari.....	233
7.3	Chiziqli transformator.....	237
7.4	Ikki magnit bog‘langan konturlarda rezonans.....	249

8. Uch fazali zanjirlar

8.1	Ko‘p fazali zanjirlar.....	252
8.2	Uch fazali simmetrik generator.....	257
8.3	Simmetrik uch fazali zanjir.....	262
8.4	Uch fazali simmetrik zanjirlar quvvati.....	268
8.5	Uch fazali liniyalarda energiya uzatish.....	271
8.6	Uch fazali liniya induktivligi.....	275
8.7	Uch fazali transformator.....	280
8.8	Aylanuvchi magnit maydon, asinxron va sinxron motorlar.....	282
8.9	Statik yuklangan uch fazali nosimmetrik zanjir.....	287
8.10	Nosimmetrik uch fazali zanjirlarning simmetrik tashkil etuvchilari.....	292
	Foydalanilgan adabiyotlar.....	300
	Ilova.....	302

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Основные обозначения	6

1. Свойство электрического и магнитного поля, понятия тока и напряжения

1.1 Заряженные частицы и электромагнитное поле, зависимость электрического поля от тока в проводнике.....	8
1.2 Токи проводимости, смещения и переноса, непрерывность тока.....	14
1.3 Напряжение, разница потенциалов, электродви- жущая сила.....	24

2. Элементы электрических цепей и основные понятия

2.1 Электрические и магнитные цепи.....	35
2.2 Элементы электрических цепей.....	37
2.3 Физические свойство электрических цепей, упро- щение электрических цепей.....	39
2.4 Условные положительные направления тока, напряжения и э.д.с. на элементах электрических цепей.....	51
2.5 Источники э.д.с. и тока	54

2.6	Схемы электрических цепей.....	58
2.7	Топология схем электрических цепей, схема графов.....	65
2.8	Анализ и синтез электрических цепей.....	69
 3. Основные законы и методы для анализа электрических цепей постоянного тока		
3.1	Законы Кирхгофа и Ома для электрических цепей.....	72
3.2	Применение законов Кирхгофа и Ома для простых электрических цепей.....	78
3.3	Применение законов Кирхгофа.....	84
3.4	Полнота уравнений составленных по законам Кирхгофа.....	87
3.5	Принцип суперпозиции (наложения).....	90
3.6	Принцип компенсации	93
3.7	Принцип линейности.....	95
3.8	Метод эквивалентного генератора.....	98
3.9	Методы контурных токов и узловых потенциалов	102
3.10	Принцип взаимности.....	111
3.11	Уравнения схемах электрических цепей для перехода от соединения «треугольник-звезда» к эквивалентному соединению «звезда-треугольник».....	113

4. Цепи переменного тока

4.1 Общие понятия	119
4.2 Переменный ток в цепи с резистором и конденсатором	123
4.3 Действующее (эффектив) значение периодических величин.....	127
4.4 Переменный ток в цепи с резистором и индуктивностью.....	128
4.5 Переменный ток в цепи с индуктивностью, резистором и конденсатором	131
4.6 Законы Кирхгофа для цепи переменного тока.....	135
4.7 Математические операции с простыми гармоническими функциями, геометрический метод.....	137
4.8 Комплексной (символический) метод.....	139
4.9 Уравнения прямой на комплексной плоскости.....	149

5. Теория и методы расчета линейных цепей переменного тока содержащий L, R, C

5.1 Уравнения электрической цепи в комплексной форме.....	151
5.2 Потенциальная диаграмма на комплексной плоскости.....	160
5.3 Мощность в цепи переменного тока.....	164
5.4 Передача энергии.....	172

6. Резонанс, частотные характеристики и передаточные функции

6.1 Анализ резонансных эффектов в электрических цепях.....	181
6.2 Резонанс напряжений.....	183
6.3 Резонанс токов.....	190
6.4 Частотные характеристики.....	193
6.5 Частотные характеристики элементов электрической цепи.....	201
6.6 Передаточная функция цепи.....	214

7. Взаимная индуктивность в электрической цепи

7.1 Цепи с индуктивно связанными элементами.....	217
7.2 Особенности индуктивно связанных цепей.....	233
7.3 Линейные трансформаторы.....	237
7.4 Резонанс в двух магнита связанных контурах.....	249

8. Трехфазная цепь

8.1 Многофазные цепи.....	252
8.2 Симметричный трехфазный генератор.....	257
8.3 Симметричная трехфазная цепь.....	262
8.4 Мощность трехфазной симметричной цепи.....	268
8.5 Передача энергии по трехфазной линии.....	271
8.6 Индуктивность трехфазной линии.....	275

8.7	Трехфазный трансформатор.....	280
8.8	Вращающееся магнитное поле. Асинхронные и синхронные моторы.....	282
8.9	Несимметричная трехфазная цепь при стати- ческой нагрузке.....	287
8.10	Симметричные составляющие несимметричной трехфазной цепи.....	292
	Использованная литература.....	300
	Примечание	302

CONTENTS

Introduction.....	3
The basic designations.....	6

1. Property electric and a magnetic field, concept of a current and pressure

1.1 The charged particles and electromagnetic field, dependence of electric field from current in a conductor	8
1.2 Currents of conductivity, mixture and carrying over, current continuity	14
1.3 Voltage, difference of potentials, electromotive power	24

2. Elements of electric chains and the basic concepts

2.1 Electric and magnetic chains	35
2.2 Elements of electric chains	37
2.3 Physical properties of electric chains, simplification of electric chains	39
2.4 Conditional positive directions of a current, voltage and electromotive power on elements of electric chains.....	51
2.5 Sources electromotive power and a current	54
2.6 Schemes of electric chains	58

2.7 Topology of schemes of electric chains, the scheme of counts	65
2.8 The analysis and synthesis of electric chains	69

3. Organic laws and methods for the analysis of electric chains of a direct current

3.1 Laws Kirchhoff and Ohms for electric chains	72
3.2 Application of Kirchhoff law and Ohms for simple electric chains	78
3.3 Application of Kirchhoff laws	84
3.4 Completeness of the equations made under Kirchhoff laws	87
3.5 Principle of superposition	90
3.6 Principle of compensation	93
3.7 Principle of linearity	95
3.8 Method of the equivalent generator	98
3.9 Methods of planimetric currents and nodal potentials..	102
3.10 Principle of reciprocity.....	111
3.11 The equations schemes of electric chains for transition from connection "triangle-star" to equivalent connection «a star-triangle».....	113

4. Chains of alternating current

4.1 The general concepts	119
4.2 Alternating current in a chain with the resistor and the condenser	123
4.3 Operating (effektiv) value of periodic sizes	127
4.4 Alternating current in a chain with the resistor and inductance	128
4.5 Alternating current in a chain with inductance, the resistor and the condenser	131
4.6 Law of Kirchhoff for an alternating current chain	135
4.7 Mathematical operations with simple harmonious functions, a geometrical method	137
4.8 Complex (symbolical) method	139
4.9 The straight line equations on a complex plane	149

5. The theory and methods of calculation of linear chains of an alternating current containing L, R, C

5.1 The equations of an electric chain in the complex form.....	151
5.2 The potential diagramme on a complex plane	160
5.3 Capacity in an alternating current chain	164
5.4 Transmission of energy	172

6. Resonance, frequency characteristics and transfer functions

6.1 The analysis of resonant effects in electric chains	181
6.2 Resonance of voltage	183
6.3 Resonance of currents	190
6.4 Frequency characteristics	193
6.5 Frequency characteristics of elements of an electric chain	201
6.6 Transfer function of a chain	214

7. Mutual inductance in an electric chain

7.1 Chains with it is inductive the connected elements....	217
7.2 Features it is inductive the connected chains	233
7.3 Linear transformers	237
7.4 Resonance in two magnets the connected contours	249

8. Three-phase chain

8.1 Multiphase chains	252
8.2 The symmetric three-phase generator	257
8.3 The symmetric three-phase chain.....	262
8.4 Capacity of a three-phase symmetric chain	268
8.5 Transmission of energy on a three-phase line	271
8.6 Inductance of a three-phase line	275
8.7 The three-phase transformer	280
8.8 Rotating magnetic field. Asynchronous and synchro-	

nous motors.....	282
8.9 Asymmetrical three-phase chain at static loading	287
8.10 Symmetric components of an asymmetrical three- phase chain	292
The used literature	300
The note	302

[illegible]

ELEKTR TEXNIKANING NAZARIY ASOSLARI

Toshkent – «Fan va texnologiya» – 2015

Muharrir:	Sh.Kusherbayeva
Tex. muharrir:	M.Holmuhamedov
Musavvir:	D.Azizov
Musabhih:	N.Hasanova
Kompyuterda sahifalovchi:	Sh.Mirqosimova

E-mail: tipografiyacent@mail.ru Tel: 245-57-63, 245-61-61.

Nashr.lits. A1№149, 14.08.09. Bosishga ruxsat etildi 29.10.2015.

Bichimi 60x84 $\frac{1}{16}$. «Timez Uz» garniturası. Ofset bosma usulida bosildi.

Shartli bosma tabog'i 19,75. Nashriyot bosma tabog'i 20,0.

Tiraji 400. Buyurtma №155.

**«Fan va texnologiyalar Markazining
bosmaxonasi» da chop etildi.
100066, Toshkent sh., Olmazor ko'chasi, 171-uy.**