

ЎЗБЕКISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O՛RTA MAXSUS TA՛LIM VAZIRLIGI

S.F. AMIROV, M.S. YOQUBOV, N.G՛. JABBOROV

ELEKTROTEXNIKANING NAZARIY ASOSLARI

Birinchi kitob

Oliy o՛quv yurtlari talabalari uchun o՛quv qo՛llanma

TOSHKENT
«TALQIN»
2008

31.21
A60

Taqri zchilar:

Toshkent davlat texnika universiteti «Elektrotexnikaning nazariy asoslari» kafedrası (kaf. mudiri t.f.d. prof. *Y.R. Rashidov*, t.f.n., dots. *Q.G'. Obidov*);

Toshkent davlat aviatsiya instituti «Uchish apparatlari va aeroportlarning elektr jihozlari» kafedrası mudiri t.f.d. prof. *M.I. Ibodullayev*, Toshkent temir yoʻl muhandislari instituti «Elektr aloqa va radio» kafedrası mudiri t.f.d. prof. *A.A. Xoliqov*.

Amirov S.F.

Elektrotexnikaning nazariy asoslari: Oliy oʻquv yurtlari talabalari uchun oʻquv qoʻl. K. I/ S.F. Amirov, M.S. Yoqubov, N.G. Jabborov; OʻzR Oliy va oʻrta maxsus taʼlim vazirligi. — Toshkent: Talqin, 2008. — 144 b.

I. Yoqubov M.S. II. Jabborov N.G.

ББК 31.21я73

Oʻquv qoʻllanmaning ushbu birinchi kitobida elektrotexnikaning nazariy asoslariga tegishli boʻlgan tayanch tushunchalar, atamalar, oʻzgarmas va bir fazali sinusoidal tok chiziqli elektr zanjirlarini hisoblash usullari haqida tegishli bakalavriat yoʻnalishlarida taʼlim olayotgan talabalar uchun yetarli maʼlumotlar keltirilgan boʻlib, unda elektrotexnika tarixiga, uning rivojlanish bosqichlariga va boshqa texnik fanlarni oʻzlashtirishdagi oʻrniga alohida eʼtibor berilgan. Har bir bob tegishli masalalar, referat mavzulari va oʻz-oʻzini sinash savollari bilan toʻldirilgan.

Oʻquv qoʻllanma energetika, elektrotexnika, avtomatika, radiotexnika va elektr aloqa sohalariga oid taʼlim yoʻnalishlari talabalari uchun moʻljallangan boʻlib, undan ishlab chiqarish sohalarining mutaxassislari, muhandislar, magistrantlar va ilmiy-texnik xodimlar ham foydalanishlari mumkin.

Oʻzbekiston Respublikasi Oliy va oʻrta maxsus taʼlim vazirligi huzuridagi ilmiy-uslubiy birlashmalar faoliyatini muvofiqlashtiruvchi Kengash 5520200, 5521300, 5521400, 5521500, 5521600, 5521700, 5521800, 5522000, 5522800, 5630200 bakalavriat taʼlim yoʻnalishlari talabalari uchun oʻquv qoʻllanma sifatida tavsiya etgan

ISBN 978-9943-325-39-5

© «Talqin» nashriyoti, 2008.

SO‘ZBOSHI

«Elektrotexnikaning nazariy asoslari» fani elektrotexnika, elektroenergetika, radioelektronika, elektr aloqa va avtomatika sohalariga oid ta’lim yo’nalishlari va magistratura mutaxassisliklari talabalari uchun umummuhandislik fanlaridan hisoblanadi. «Elektrotexnikaning nazariy asoslari» fanining asosiy masalasi turli elektrotexnik qurilmalarda sodir bo’ladigan elektromagnit hodisalar va jarayonlarni sifat va miqdor tomonidan o’rganishdir.

Oliy ta’limning fan dasturi asosida yozilgan ushbu o’quv qo’llanmada talabalarda elektrotexnikaning nazariy asoslari bo’yicha zarur va yetarli bo’lgan tayanch tushunchalar, elektr va magnit zanjirlardagi fizik qonunlar va hodisalarning o’ziga xos xususiyatlari bayon etilgan.

Kitobdagi barcha materiallar hozirgi zamon elektroenergetikasi va elektrotexnikasiga asoslangan bo’lib, ularning texnik yechimlari esa xalq xo’jaligida tobora keng qo’llanilayotgan asboblardan, mashinalardan va uskunalardan avtomatlashtirish va ular asosida avtomatlashgan texnologik majmualardan elektr, magnit va elektron zanjirlarining xossa va xususiyatlarini o’rganishga bag’ishlangan. Ayrim boblarga tegishli materiallarda ideallashtirilgan tasavvurdan real elektr va magnit zanjirlarga o’tilgan.

So’nggi yillarda elektrotexnikadagi tayanch tushunchalar va ta’riflarga, elektr sxemalardagi shartli grafik belgilashlarga, oliy o’quv yurtlari fan dasturlariga jiddiy o’zgartirishlar kiritildi. Oliy va o’rta maxsus o’quv yurtlarida elektrotexnik fanlarning o’qitilish jarayoniga yangi pedagogik texnologiyalar joriy etilmoqda. Ushbu o’quv qo’llanmada bularning barchasini hisobga olishga harakat qilindi. Bu borada o’quv qo’llanma mazmuni elektrotexnika, energetika va avtomatika sohalariga oid ta’lim yo’nalishlarining O’zbekiston Respublikasi Oliy va o’rta maxsus ta’lim vazirligi tomonidan tasdiqlangan Davlat ta’lim standartlarida «Elektrotexnikaning nazariy asoslari» faniga qo’yilgan talablarga moslashtirildi.

Qoʻllanmada keltirilgan referativ mavzular va oʻz-oʻzini sinash savollari talabalarning mustaqil taʼlim olishi va fikrlash qobiliyatini oʻstirish uchun xizmat qiladi. Keltirilgan masalalar nazariy maʼlumotlarni mustahkamlashga hamda ularga amaliy va mantiqiy yondashishga va texnikani yaxshi idrok etishga yordam beradi.

Hozirgi vaqtda inson faoliyati doirasiga kirgan har bir sohada va yoʻnalishda elektrotexnika va elektronika qurilmalari mavjud. Shu sababdan elektrotexnika asoslarini bilish, uni tushunish va amalda qoʻllay olish nafaqat elektrotexnik xodimlar, balki turli soha mutaxassislari va xodimlari uchun ham ertangi kunning ravnaqini taʼminlashda katta ahamiyat kasb etadi.

Oʻquv qoʻllanmaning qoʻlyozmasini oʻqib chiqib, uning sifatini yaxshilash uchun oʻz fikr-mulohazalarini bildirgan Toshkent davlat texnika universiteti «Elektrotexnikaning nazariy asoslari» kafedrasini mudiri t.f.d. professor Y. Rashidovga, shu kafedraning dotsenti Q.Obidovga, «Energetika sohalari kasb taʼlimi va elektrotexnika» kafedrasini dotsenti O.M. Burxonxoʻjayevga, Toshkent davlat aviatsiya instituti «Uchish apparatlari va aeroportlarning elektr jihozlari» kafedrasini mudiri t.f.d. professor M. Ibodullayevga hamda Toshkent temir yoʻl muhandislari instituti «Elektr aloqa va radio» kafedrasini mudiri t.f.d. professor A. Xoliqovga, qoʻlyozmani kompyuterda terishda yaqindan yordam bergan aspirantlar X.Sattarov, N. Balgayev va Y.Shoyimovga mualliflar samimiy minnatdorchilik bildiradilar.

Oʻquv qoʻllanma tasdiqlangan fan dasturi doirasida yozilganligi bois koʻp mavzular hajmi chegaralangan va «Elektrotexnikaning nazariy asoslari» fanidan davlat tilida, lotin alifbosida yozilgan dastlabki asarlardan boʻlganligi sababli ayrim kamchiliklardan holi emas, albatta. Tegishli sohalarning mutaxassislari, talabalar va umuman oʻquvchilar fikr-mulohazalari asosida qoʻllanmaning keyingi nashrlari mukammalroq boʻladi degan, umiddamiz.

Ushbu kitob Oʻzbekistonda elektrotexnika va avtomatika sohaslariga oid yoʻnalishlar boʻyicha ilmiy maktablar yaratgan va koʻpgina olimlarni tarbiyalab voyaga yetkazgan hamda mualliflarni ushbu kitobni yozishga undagan texnika fanlari doktorlari, professorlar Zaripov Madiyor Faxritdinovich va Karimov Anvar Saidabdullayevichning yorqin xotiralari bagʻishlanadi.

ELEKTROTEXNIKA TARAQQIYOTI TARIXIDAN

Hozirgi zamon elektroenergetikasi mamlakatning yetakchi sohasidir. U ilmiy-texnik taraqqiyotda har qanday soha ishlab-chiqarishini jadallashtirishda hal qiluvchi rolni o'ynaydi.

Inson o'z faoliyatining barcha sohalarida elektr energiyadan foydalanadi. Elektr energiya boshqa energiya turlaridan quyidagi ajoyib xossalari bilan ajralib turadi:

a) boshqa (mexanik, kimyoviy, issiqlik, yorug'lik, atom) energiya turlaridan olinishi nihoyatda sodda;

b) uzoq masofaga yuqori foydali ish koeffitsiyenti (FIK) bilan uzatish va yuklamalarga oson taqsimlash mumkin;

d) boshqa turdagi energiyaga oson aylantirish mumkin;

e) turli quvvatga ega yuklamalarni bitta manbaga ulash mumkin;

f) turli fizik tabiatli parametrlarni tok va kuchlanishga oson o'zgartirish mumkin;

g) signallarni uzoq masofalarga bir onda uzatish mumkin (telefon, telegraf, radioaloqa).

Elektr energiyaning bu xususiyatlari qisqa tarixiy muddatda nafaqat elektroenergetikaning asosiy masalalarini, balki noelektrotexnikalarni yangi sifat darajaga ko'tarishga imkon berdi. Elektrotexnika fanining zamirida elektrotexnik, radiotexnik, elektromexanik va avtomatik uskunalar, shu jumladan hisoblash texnikasi tez sur'atlar bilan rivojlandi.

Elektrotexnikaning yuzaga kelishi o'zgarmas tok manbayining yaratilishi hamda elektr va magnetizm sohasidagi kashfiyotlar bilan bog'liq.

Qadim o'tmishda dastlab yunonlar Kichik Osiyoning Magneziya tog'idagi ruda parchalari temir jismlarni tortish xususiyatini payqadilar va bu hodisani magnetizm deb atadilar.

Miletlik Fales eramizdan avvalgi VIII—VII asrlardan oq qahraboning ishqalanish natijasida elektrlanishi va unda elektr maydon paydo bo'lishini ta'kidlagan. Elektr va magnit hodisalar qadimdan ma'lum, lekin bu hodisalar to'g'risidagi fan 1600-yilda ingliz fizigi U. Gilbert

elektr va magnit hodisalar to'g'risida tadqiqotlarini e'lon qilgandan keyin boshlandi. Elektr to'g'risidagi fanning rivojlanish bosqichida M.V. Lomonosov, G.V. Rixman, B. Franklino, Sh. Kulonning elektr hodisalarning tabiatini o'rganishga bag'ishlangan amaliy tadqiqotlari muhim ahamiyatga ega bo'ldi.

Elektr va magnit hodisalari o'zaro bog'liqligini rus olimi F. Epinus 1758-yilda o'z ma'ruzasida aytib o'tgan.

1785-yilda fransuz olimi Sh. Kulon o'z nomi bilan atalgan qonunni kashf etdi. U elektr maydoni kuchlanganligi tushunchasini kiritdi. Elektr zanjir tushunchasi 1794-yilda A. Volta tomonidan kiritilgan. Volt ustuni esa 1800-yilda yaratilgan. Rus akademigi V.V. Petrov 1802-yilda elektrokimybo bo'yicha birinchi tadqiqotlarini o'tkazgan va u elektrokimyoning asoschisi hisoblanadi.

Magnit strelkaga tokning ta'siri X. Ersted tomonidan 1819-yilda, toklarning o'zaro ta'siri esa A. Amper tomonidan 1820-yilda o'rganilgan. Amper birinchi bo'lib elektr toki, tok kuchi, elektr kuchlanish atamalarini kiritgan. Magnit maydonning dastlabki tadqiqotlari J.B. Bio va M. Savar tomonidan o'tkazilgan va Laplas tomonidan matematik jihatdan umumlashtirilgan (Bio-Savar-Laplas qonuni).

Elektrostatikaga oid ayrim tenglamalarni fransuz matematigi S. Puasson tadqiq etgan. Elektromagnit maydonning materialistik konsepsiyasi ingliz olimi M. Faradey tomonidan rivojlantirilgan. U elektr va magnit maydonlarni tadqiq etish uchun kuch va ekvipotensial chiziqlar atamalarini kiritgan.

1782-y. Laplas o'z nomi bilan ataladigan tenglamalarni og'irlik nazariyasiga tegishli asarlarida qo'llagan. Elektromagnit induksiya qonunini 1831 yilda ingliz fizigi M. Faradey tajriba yo'li bilan kashf etgan va elektrokimybo qonunlarini birinchi bor o'rgangan. Elektromagnitli telegraflar rus injeneri P.Shilling tomonidan 1832-yili yaratilgan. Rus akademigi B. Yakobi 1838-yili suv kemasi uchun elektr mashina yaratgan. Elektr zanjiriga oid qonuni 1826-yilda nemis olimi G. Om tomonidan kashf etilgan.

Elektromagnit o'lchash birligi absolyut tizimini nemis olimlari K.F. Gauss va T. Veber 1831—1833-yillari yaratdilar.

Tokning issiqlik ta'siri qonunini ingliz fizigi D. Joul 1841-yili va rus akademigi E. Lens 1842-yilda ta'riflab berishgan. 1844-yili E. Lens elektromagnit inersiya qonunini bayon qilgan. Nemis olimi G. Kirxgof 1845-yilda elektr zanjirlarga oid ikkita muhim qonungga ta'rif bergan.

Vektor potentsiali, induktivlik va o'zaro induktivlikni birinchi bor 1845-yil nemis olimi F. Neyman ifodalagan. Buyuk ingliz olimi D. Maksvell 1873-yili siljish toklari tushunchasini kiritdi, hamda hozirda uning nomi bilan ataladigan o'zgaruvchan elektromagnit maydon tenglamalarini tuzdi. Bundan faqat 25 yildan keyingina elektromagnit maydon mustaqil tarzdagi materiya deb isbot etildi.

Elastik muhitda energiya harakati rus olimi N.Umov tomonidan 1874-yilda nazariy jihatdan tadqiq qilingan.

Rus injeneri F. Pirotskiy 1875-yilda quvvati 4,4 kW o'zgarmas tokni 1 km masofaga uzatish tajribasini o'tkazgan.

Cho'g'lanish lampasi 1875-yil A. Lodigin tomonidan kashf etilgan.

1884-yil ingliz olimi D. Poyting elektromagnit maydon energiyasini uzatishni nazariy jihatdan tadqiq etgan.

1889—91-yillarda rus injeneri M.O.Dolivo-Dobrovolskiy elektr energiyaning uch fazali tizimi qism(generator, transformator, motor) larini ishlab chiqqan va kuchlanishi 15 kV, quvvati 150 kVA bo'lgan elektr energiyani 175 km masofaga uzatishni amalga oshirgan.

1872-yilda rus olimi A. Stoletov fotoeffekt hodisasini kashf etgan. Dunyoda birinchi bo'lib A. Popov radio aloqani amalga oshirgan.

1887—88-yillarda nemis olimi G. Gers elektromagnit to'lqinlarni mavjudligini eksperimental yo'l bilan isbot etdi.

Relyativistik elektrodinamikaning rivojlanishi 1905—1908-yillarda G. Lorens va G. Minkovskiyning izlanishlari bilan bog'liq.

O'ta o'tkazuvchanlik hodisasi nemis olimi G. Kamerling Onessom tomonidan 1911-yilda kashf etilgan.

«Elektrotexnikaning nazariy asoslari» faniga bevosita aloqasi bo'lgan matematik va umumnazariy ishlar to'g'risida quyidagi ma'lumotlarni berish mumkin.

Fransuz matematigi J.Dalamber, Peterburg fanlar akademiyasi akademiklari L. Eyler va D. Bernullilar bilan birgalikda to'lqin tenglamalari nazariyasini hamda matematik fizika asoslarini yaratishdi.

Laplasning to'g'ri o'zgartirish formulasi 1782-yilda taklif etilgan. Hajm integralini sirt integraliga o'zgartirish formulasini M.V.Ostrogadskiy 1828-yilda bergan.

Differensial tenglamalarni operator usulida integrallashni rus matematigi M. Vashenko-Zaxarchenko taklif etgan.

O'rama (svertka) teoremasi birinchi bor P.L.Chebishev tomonidan

1867-yil, Dyumel integrali esa 1883-yil berilgan. Ma'lum harakatning turg'unlik nazariyasini akademik A.M. Lyapunov bayon etgan. Operator usuli elektrotexnika faniga O. Xevisayd tomonidan 1892—1912-yillarda tatbiq etilgan.

Sinusoidal tok elektr zanjirlarini simvolik usulda hisoblash usulini amerika olimi Ch. Shteynmets 1894-yilda taklif etgan. Garmonik balans usulida chiziqli bo'lmagan elektr zanjirlarni hisoblash usulini fransuz olimi M. Joli 1911-yil joriy etgan. Sekin o'zgaradigan amplitudalar usulini 1927-yil golland olimi B. Vander-Pol taklif etgan. Kichik parametrlar usulini esa 1928-yil fransuz olimi G. Puankare taklif etgan.

Chiziqli bo'lmagan tebranishlar nazariyasidagi fundamental ishlarni akademiklar L. Mandelshtamm, N. Papaleksi va A. Andronov 1937-yil amalga oshirdilar.

Chiziqli bo'lmagan chastotaviy usulda tahlil etishni rus olimlari N.M. Krilov va N.N. Bogolyubov birinchi bo'lib taklif etdilar. Elektr zanjirlar sintezini birinchi bor nemis olimi I.O. Sobel (1924-y.), amerika olimi R. Foster (1924-y.), rus olimlari S. Yevlanov (1937-y.) hamda B.V. Bulgakov (1949-y.) nazariy jihatdan asosladilar.

Elektr zanjirlarni signal graflar bilan tahlil qilishni rus olimi B.N. Petrov (1945-y.) va amerika olimi S. Mezon (1953-y.) taklif etishgan.

Maydon nazariyasi masalalarini yechishda integral tenglamalarni qo'llashni rus olimlari G.A. Granberg, V.M. Alexin, O.V. Tozoni, E.V. Kotelnikov (1948-y.) taklif etdilar.

O'zbekistonda energetika va elektrotexnika fanlarini o'rganish va rivojlantirish XX asrning 30-yillaridan boshlandi. Respublikadagi energetika va elektrotexnikaning asosiy ilmiy yo'nalishlari N. Shcherdin va akademik X. Fozilov rahbarligida belgilandi va elektr stansiyalar elektr tizimini va jihozlarini takomillashtirish, puxtaligini oshirish, samaradorligini ko'tarishga qaratildi. Elektr tizimlarini hisoblashning ixcham usullari (X. Fozilov, K.R. Allayev, T.X. Nosirov, 1960—70 yillar) taklif etildi.

Elektr tizimlari rejimini ifodalaydigan katta o'lchamli chiziqli bo'lmagan tenglamalarni yechish (S. Solihov) masalalari tadqiq qilindi.

An'anaviy energiya hamda tiklanuvchi energiyadan kompleks foydalanish (R.A. Zohidov) masalalari xalq xo'jaligi uchun muhim ahamiyat kasb etadi.

1970—1980-yillarda akademik J. Abdullayev tomonidan energetika tizimlarida o'lchash texnikasi aniqligi, puxtaligi va samaradorligini oshi-

rish bo'yicha muhim tadqiqotlar amalga oshirildi. Shu yillarda o'zbek olimlari (M.Z.Xomidxonov, S.Z.Usmonov, N.M.Usmonxo'jayev, M.Xusanov, O.O.Xoshimov, K.Mo'minov) avtomatlashgan elektr yuritmalarning yangi avlodini hamda ko'p rotorli asinxron motorlarni (A.Dadajonov) yaratishga muvaffaq bo'ldilar. Elektr tarmoqlari optimal rejimlarini boshqarish asoslari (E. Payziyev) yaratildi.

Nazariy elektrotexnika sohasida chiziqli bo'lmagan elektr zanjirlari va tizimlari nazariyasi (G.R. Rahimov, Z.I. Ismoilov, P.F. Hasanov) hamda avtoparametrik tebranishlar zanjirlarida o'zgaruvchan tok fazalar soni va chastotasini o'zgartirish nazariyasi (A.S.Karimov, M.I. Ibodullayev) takomillashtirildi.

Tarqoq parametrli zanjirlar nazariyasi va ular asosida elektrotexnik hamda elektr o'lchash o'zgartkichlarini takomillashtirish (M.F. Zaripov) yo'nalishlarida ijobiy natijalarga erishildi.

Elektr o'lchashlar fanida yangi xarakteristikalariga ega chastotasi o'zgaruvchan o'zgartkichlar va o'lchash ko'priklari nazariyasi Sh.Sh. Zoxidov tomonidan takomillashtirildi.

O'ZBEKISTONDA ELEKTROTEXNIKANING RIVOJLANISHIGA DOIR TARIXIY MA'LUMOTLAR

Sobiq Turkistonning O'zbekiston hududiga taalluqli qismidagi barcha elektr stansiyalarining quvvati XX asr boshlarida 3000 kW bo'lib, jami 3,3 mln. kW·soat elektr energiya ishlab chiqarilgan hamda aholi jon boshiga yiliga 1 kW·soat to'g'ri kelgan.

Barcha mavjud sanoat korxonalarida 140 ta xususiy elektr stansiyalar mavjud bo'lib, eng kuchli elektr stansiya neft qazib olish korxonalarida-Chimyon qishlog'i (650 kW) hamda Qovunchidagi shakar-qand zavodida (442 kW) edi.

Toshkent shahrida dastlabki dizel elektr stansiya 1910-yilda qurilgan va uning quvvati 125 kW bo'lgan. 1911—1912-yillarda Toshkent tramvaylari uchun Belgiya hissadorlik jamiyati qurib ishga tushirgan issiqlik elektr stansiyasi har biri 290 kW quvvatli beshta o'zgarmas tok generatoridan tarkib topgan edi. Bu generatorlarning umumiy quvvati

1450 kW (2159 ot kuchi), kuchlanishi esa 600 V bo'lib, ularni dizel agregatlari harakatga keltirar edi.

Rus savdogari Davidov qurdirgan elektr stansiya (231 kW) gidroelektr stansiya (GES) bo'lib, suv turbinasining quvvati 200 ot kuchiga teng, stansiya qo'shimcha quvvatini 260 ot kuchli Volf lokomotivi ta'minlar edi.

Qishloq xo'jaligida va paxta tozalash zavodlarida bor-yo'g'i 4 ta elektr motor o'rnatilgan edi. Toshkent, Samarqand, Qo'qon, Farg'ona, Andijon shaharlarida atigi 2-3 tadan ko'cha elektr energiya hisobiga yoritilardi. Eng badavlat kishilar xonadoni elektr ta'minotidan bahramand bo'lgan.

Bir guruh tadbirkorlar — Belgiya hissadorlik jamiyati a'zolari Toshkent atrofida va Farg'ona viloyatida GES qurishni, uning energiyasini Qo'qon, Andijon va Namanganga 60 kV kuchlanishli elektr uzatish liniyasi yordamida uzatishni rejalashtirgan edilar. Afsuski, bu rejalar uzoq yillar amalga oshmadi.

1920-yillarda O'zbekiston shaharlarida bir necha dizel issiqlik elektr stansiyalar (IES) ishga tushirildi. Buxoro (490 kW), Samarqand (360 kW), Qo'qon (395 kW), Marg'ilon (75 kW), Termiz (89 kW), Qarshi, Vobkent, Xovos va boshqa shaharlardagi IESlar shular jumlasidandir.

1926-yilning 1 mayida Toshkentda Bo'zsu GESining (loyiha quvvati 4000 kW) birinchi navbati (2000 kW, har biri 1000 kW dan 2 ta agregat), 1929-yilda uchinchi agregat va 1936-yilning aprelida to'rtinchi agregat ishga tushirildi (hozir bu stansiya binosi O'zbekiston energetiklari muzeyi). 1924—1928-yillarda O'zbekiston Respublikasi elektr energetika xo'jaligi quvvati 2400 kW dan 12600 kW gacha ko'paydi. Jami elektr energiya ishlab chiqarish 10 barobarga oshdi.

Toshselmash zavodining qurilishi kuchli energetik baza yaratishni taqozo etdi. Shu sababli Toshkentda dizel elektr stansiya ishga tushirildi.

Respublikamizning bir qator sanoat korxonalarida — Kattaqo'rg'on yog'-moy zavodi, Andijon neft tarmoqlari va boshqa yirik korxonalarda yangi elektr stansiyalar qurildi, eskilari esa qayta jihozlandi. Natijada 1937-yilga kelib zavod va fabrikalar elektr stansiyalarining quvvati 25,4 ming kWga yetdi.

1937—1940-yillarda elektr energiya ishlab chiqarish tez sur'atlarda o'sib bordi. Chirchiq IES (12000 kW), Quvasoy IES (12000 kW) ishga tushirildi. Oq-tepa va Darg'om GESlari qurilishi boshlandi.

Sanoat korxonalarida elektr motorlarni ishlatish ko'lamlari kengaydi.

Shu davrlarda elektr ta'minotini markazlashtirish darajasi ham keskin ko'tarildi. Agar 1925-yilda markazlashgan elektr ta'minoti umumiy talabning 12,2%ini tashkil etgan bo'lsa, 1937-yilda bu ko'rsatkich 72%ga yetdi. Umumenergetik balansda elektr energiyasining solishtirma ko'rsatkichi-elektrlashtirish koeffitsiyenti 1925—1926-yillardagi 22,5 foizdan 1940-yilda 81,6 foizga yetdi. Elektr jihozlanganlik koeffitsiyenti 1940-yilda 3,31 marta ko'paydi.

Sobiq Ittifoqning markaziy hududlaridan ko'chirilgan sanoat korxonalarini elektr energiya bilan uzluksiz ta'minlash Chirchiq kanalida Oqqovoq GES larini loyihalab qurishni taqozo etdi. 1943 yilning yanvaridayoq quruvchilarning ulkan jasoratu-shijoati natijasida Oqtepa GES va shu yilning mart oyida Oqqovoq GES va sentyabrda 3-Oqqovoq GESlar misli ko'rilmagan tez muddatlarda ishga tushirildi. Bu O'zbekiston xalqining buyuk mehnat shijoati va g'alabasi edi.

Insoniyat tarixidagi eng vaxshiyona va ayovsiz jahon urushi (1939-1945-y.) davrida O'zbekistonda beshta yangi GES qurish haqida Davlat Mudofaa qo'mitasining qarori qabul qilindi (1942-yil 18 noyabr). Bular — Farhod, Solar, 1- va 2- Bo'zsuv GESlari hamda Oqqovoq GESlarining ikkinchi navbati edi.

O'sha davrda loyiha quvvati jihatidan dunyodagi eng kuchli GESlar qatoriga kirgan Farhod GES (loyiha quvvati 125000 kW) qurilishi 1942-yilning noyabr oyida boshlandi. Urush yillarida 6 ta yirik GES ishga tushirildi. Toshkent yonidagi GES (1943-yil mart oyida), Bo'zsuv GESi (1944-yil) shular jumlasidandir. Shovot, Shahrixon, Yangiariq GESlar qurilishlari keng ko'lamda tezkorlik bilan olib borildi. 1940-yilga nisbatan elektr energiya ishlab chiqarish 2,5 marta ko'paydi (1940-yil 481,8 mln. kW-soat, 1945-yil 1185,7 mln. kW-soat).

Elektr stansiyalarda o'rnatilgan generatorlar quvvati 170,1 dan 300,1 MWga yetdi. Respublika energetika bazasining mustahkamlanishi sanoat tuzilmasini batamom qayta qurib, qator yangi sohalarni rivojlantirishga asosiy turtki bo'ldi. Og'ir sanoat keskin rivoj topdi. 1944-yilda esa Bekobod metallurgiya zavodi po'lat quymalarini tuhfa etdi.

Kimyo, mashinasozlik, elektrotexnika va boshqa soha mahsulotlari hajmi keskin ortdi.

Natijada jami ishlab chiqarishda og'ir sanoat ulushi 1940-yildagi 13,3 foizdan 1945-yilda 47,3 foizga ko'paydi.

Ammo, yengil sanoat (paxta tozalash, oziq-ovqat) ulushi 1940-yillarda 61,1 foizdan 1945-yilda 39,1 foizgacha kamayganini ham e'tirof etish joiz.

1948-yilda Farhod GESining birinchi navbati ishga tushirildi. Bu O'zbekiston energetikasi tarixidagi eng ulkan zafarli davr hisoblanadi. GESning ishga tushirilishi Toshkent-Farg'ona energetika sistemalarini birlashtirishga asos soldi.

1- va 2- Oqqovoq, 2- va 3- Bo'zsuv, Shahrixon, Qumqo'rg'on GESlari qatori shu davrda Angren, Qo'qon IESlari va o'nlab boshqa sanoat yo'nalishidagi stansiyalar ishga tushirildi.

1945—1956-yillarda elektr energiya ishlab chiqarish 1940-yildagiga nisbatan 5,5 marta, ishlab chiqarishning jihozlanganlik ko'rsatkichi 16,5 marta ko'paydi. 1951—1955-yillarda o'nlab yangi stansiyalar, xususan, Toshkentda Shayxontohur va 2 ta yangi Bo'zsuv GESlari, Chirchiqda Yoshlar GESi ishga tushirildi, Toshkent issiqlik markazining quvvati ikki marta oshirildi. Andijonda 7-Shahrixon GESi qurildi. Farg'ona viloyatida Quvasoy GESning quvvati 3 marta ko'paytirildi. Angren IES qurilishi jadallashdi, Qayroqqum GES qurilishi qardosh O'zbekiston va Tojikiston energetikasining rivojiga alohida ahamiyat kasb etdi.

Chirchiq-Bo'zsuv GESlari qurilishi natijasida elektr energiya ishlab chiqarish ko'payibgina qolmay, balki bu gidrotexnik inshootlar qo'shimcha 70 ming gektar qo'riq yerni o'zlashtirish imkonini berdi. Farhod GES va Qayroqqum suv ombori qurilishlari 300 ming gektar yerga obi-hayot baxsh etdi.

1951-yil esa O'zbekiston olimlari uchun ulkan zafar yili bo'ldi. Sobiq Ittifoqda eng birinchi to'liq avtomatlashtirilgan va telemexanizatsiyalashgan stansiyalar majmui sifatida o'zbek energiya sistemasi GESlari ro'yxatga olindi.

O'zbekistonda bu davr asosan issiqlik stansiyalarni loyihalash, qurish va ishga tushirish davri bo'ldi. 1958-yilda Angren GRESning birinchi navbati (umumiy loyiha quvvati 600000 kW) ishga tushirildi. Toshkent energiya sistemasi GESlar bilan bu stansiya elektr energiya iste'molchi grafigini barcha rejimlarda tartibga tushirish va eng samarali rostdash imkonini yaratdi.

1960-yilda Navoiy GRESi (loyiha quvvati 840 mW), 1961-yilda esa Toshkent GRESi (loyiha quvvati 1800 MW) qurilishi boshlandi.

1963-yilda esa Toshkent GRESida birinchi energetik blok (150 MW) ishga tushirildi. Taxiatoshdan 2 ta yangi energoblok (quvvati 100 MWdan) ishlatildi. Bu stansiya Xorazm hamda Qoraqalpog'iston elektr ta'minotida va iqtisodiyotida muhim o'rin tutadi. Olmaliq va Farg'ona issiqlik energetik markazlari kengaytirildi.

Chorbog' gidroenergetik qurilishining ahamiyatini ayniqsa, o'z vaqtida qilingan ishlar qatorida munosib baholash joiz. Suv ombori hajmi deyarli 2 mlrd. m³ bo'lib, doimiy ravishda 300 ming gektar yerni sug'orish imkonini yaratdi. GES quvvati 600 MW (har biri 150 MW li 4 ta gidrogeneratorlar).

Qurilishlar nafaqat elektr ta'minot, balki irrigatsiya masalalarini kompleks hal etishga qaratilganligini alohida ta'kidlash kerak. Chorbog' GES qurilishi umuman Chirchiq-Bo'zsuv tizimida barcha GESlar ish rejimining samarasini oshirish hamda qo'shimcha 160 MW arzon elektr quvvati olish imkonini yaratdi.

1965-yilda barcha elektr stansiyalar quvvati 2816,6 MWga yetdi. Shundan GESlar quvvati 2270,5 MW bo'lib, 9 mlrd. kW-soat elektr energiya ishlab chiqardi.

Transformator nimstansiyalarida jami o'rnatilgan quvvat esa 45 mln. kVAgga yetdi.

1970-yilga kelib respublikani yalpi elektrlashtirish nihoyasiga yetdi va O'zbekiston yalpi elektrlashgan o'lkaga aylandi.

Gidroenergetika. O'zbekiston energetika sistemasida jami 27 ta GESlarda o'rnatilgan quvvatlar 1420 MWni tashkil etadi. 2002-yili ularda 6331, 2 mlrd. kW-soat elektr energiyasi ishlab chiqarildi.

Respublikadagi eng yirik GESlar bo'yicha ma'lumotlar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Nomi	O'rnatilgan quvvatlar, MW	Turbinalar soni	Qurilgan yillari	Suv manbai
Chorvoq GES	620,5	4	1970—1972	Chirchiq
Xo'jakent GES	165	3	1976	Chirchiq
G'azalkent GES	120	3	1980—1981	Chirchiq
Farhod GES	126	4	1948—1949	Sirdaryo

Issiqlik energetikasi. 60-yillarda respublikada elektr energiyasi hosil qilishni ko'paytirish asosan gazda ishlaydigan yirik IESlarni ishga tushirish yo'nalishida olib borildi. Yirik GES va IESlar qurilishi natijasida O'zbekiston energetika sistemasining jami quvvati 2002-yilda 11,3 ming MW ga yetdi. Respublikadagi eng yirik IESlar to'g'risidagi ma'lumotlar 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval

Nomi	O'rnatilgan quvvatlar, MW	Turbo-agregatlar soni	Qurilgan yillari	Joylashgan shahar	Izoh
Sirdaryo GRES	3000	10	1972—1981	Shirin	
Yangi Angren GRES	1800	6	1985-qurilish davom etmoqda	Nurobod	Loyiha quvvati 2400 MW
Toshkent GRES	1860	12	1963—1971	Toshkent	
Navoiy GRES	1250	11	1963—1981	Navoiy	
Angren GRES	484	8	1957—1963	Angren	
Taxiatosh GRES	730	5	1961—1990	Taxiatosh	
Tolimarjon GRES	----	--	qurilish 1984 yilda boshlangan	Nuriston	Loyiha quvvati 3200 MW

O'zbekiston elektr energetika sistemasi yiliga 47—48 mlrd. kW soat elektr energiya ishlab chiqarmoqda, shundan 90 foizi IESlarning hisobiga bo'lmoqda. Bu aholi jon boshiga deyarli 2000 kW·soat dan to'g'ri keladi, demakdir. Taqqoslash uchun aytib o'tish joizki Norvegiyada bu raqam 25000 kW·soat, AQShda esa 14000 kW·soat.

Hozirgi vaqtda O'zbekiston energiya sistemasi Markaziy Osiyo Birlashgan energiya sistemasining tarkibiy qismi bo'lib qolmoqda. Unda deyarli 50 foiz elektr quvvatlari mujassamlangan.

Bozor iqtisodiyotiga o'tish davrida O'zbekiston elektroenergetika sistemasida energoresurslarning yetishmayotganligi respublika energetiklari oldiga sistema ishlarini avtomatlash, yangi energiya manbalarini topish, qayta tiklanuvchi energiya manbalarini yaratish, ularning samaradorligini oshirish kabi muhim vazifalarni qo'yimoqda. Bularni bosqichma-bosqich hal etish mamlakatni 2010-yilgacha rivojlantirish va rekonstruksiya qilish Energetik Dasturida o'z aksini topgan. Bu

dastur asosini yonilg'i energo resurslardan samarali foydalanish, yangi zamonaviy texnologiyalarni sohaga tatbiq etish, dolzarb ekologik muammolarni hal qilish, bozor iqtisodiyoti talablari asosida tashkiliy-boshqaruv tizimini yangilash va h.k. tashkil etadi. Yangi (2001-yil) tashkil etilgan «O'zbekenergo» Davlat aksionerlik kompaniyasi aniq maqsadlar yo'lida tadbirlar ishlab chiqib, amaliyotga tatbiq etmoqda.

Hozir Yevropa rekonstruksiya, tiklanish va taraqqiyot banki kredit mablag'lari hisobiga «Siemens» (Germaniya) firmasi Sirdaryo IESda ikkita energo blokni qayta tiklash ishlarining birinchi bosqichini amalga oshirdi.

Ikkinchi bosqich ishlarini AQShning Savdo va taraqqiyot Agentligi granti hisobiga Sirdaryo IESda 5- va 6-energobloklarni qayta tiklash loyihasi ishlab chiqilmoqda.

Yaponiya hukumatining imtiyozli krediti hisobidan eng zamonaviy bug'-gazli energoblokni Toshkent IESda o'rnatish ishlari olib borilmoqda. Buni Yaponiyaning xalqaro hamkorlik agentligi amalga oshirmoqda. Chet el investitsiyalarini Navoiy IES, Muborak va Toshkent IEMlarida, shuningdek, Toshkent shahri elektr energiya uzatish tarmoqlarini yangilash va qayta tiklashga jalb etish masalalari hal etilmoqda.

Osiyo taraqqiyot banki va Bank moliya institutlarining mablag'larini esa mintaqamizda elektr tarmoq obyektlarini dispatcherlik va texnologik avtomatlashgan boshqaruvini hamda elektr energiya uchun hisob-kitobni takomillashtirishga yo'naltirish mo'ljallanmoqda.

To'liqmarjon IESda Markaziy Osiyoda birinchi bo'lib quvvati 800 MWli energoblokni montaj qilish ishlari tugallanmoqda. Samarqand viloyatida 500 kWli «So'g'diyona» nimstansiyasi qurilishi boshlandi. Umuman, mamlakatimizda elektr tarmoqlarini yangilash va yanada rivojlantirishga, magistral va taqsimlash tarmoqlarini optimal shakllantirish va natijada elektr uzatish samaradorligini oshirish kompleks texnik va texnologik yechimlarini joriy etishga ahamiyat kuchaytirilmoqda.

Respublikamiz suv xo'jaligi obyektlarining ulkan imkoniyatlaridan samaraliroq foydalanish maqsadida yurtimizda kichik gidroenergetikani rivojlantirish Dasturi ishlab chiqildi. Jumladan, qurilayotgan To'palang GESida (Surxondaryo viloyati) ikkinchi blokni (quvvati 72 MW) o'rnatish jadal olib berilmoqda. Yaqin kelajakda jami 440 MW quvvatli qator kichik GESlar qurilishi loyihalashtirildi. Natijada qo'shimcha 1,3 mlrd. kW/soat arzon elektr energiya iste'molchilarga yetkaziladi.

O‘ZBEKISTONDA ELEKTROTEXNIKANING RIVOJLANISHIGA HISSA QO‘SHGAN OLIMLAR TO‘G‘RISIDA

O‘zbekistonda energetika fanlari rivojlanishi XX asrning 30-yillariga to‘g‘ri keladi. Dastavval kichik bir olimlar guruhi sanoat xo‘jaligi bilan hamkorlikda energetika muammolarini hal qilish ustida ishlar olib borishdi.

Respublikamizda elektr energetika ilmining ilk maskani sifatida 1943-yilda O‘zbekiston Fanlar akademiyasi tarkibida Energetika instituti tashkil etildi (hozirgi energetika va avtomatika instituti). Bu ilmiy dargoh oldida dastlab mavjud elektr sistemasidan foydalanishni yaxshilash, O‘zbekistonning katta energetikasini barpo etish, sanoat korxonalarida elektr uskuna va qurilmalardan foydalanishni yaxshilash vazifalari turardi.

Mavjud gidroelektr stansiyalaridan olinadigan quvvatni oshirish davr talabi edi. Sohaga malakali, ilmiy-pedagogik va injener-texnik kadrlar tayyorlash vazifalari O‘rta Osiyo politexnika instituti (hozirgi Abu Rayhon Beruniy nomli Toshkent Davlat Texnika Universiteti), Suv xo‘jaligi muammolari instituti va Energetika institutiga yuklatilgan edi.

Urush yillari Moskva, Leningrad, Kiyevdan Toshkentga ko‘chirib keltirilgan mashhur olimlar M.Kostenko, M.Shatelen, L.Neyman, N.Shchedrin va b. bilan bir qatorda O‘zFA akademiklari A.Askochenskiy, V.Poslavskiy, R.Alimov va energetika instituti direktori O.Saidxo‘jayev samarali tadqiqot olib bordilar. Ular Chirchiq, Bo‘zsuv, Sirdaryo, Norin, Amudaryo suvidan energetika va sug‘orishda kompleks foydalanish masalalarini tadqiq qilishdi. O‘sha davrda M.Kostenko va yosh olim H.Fozilov o‘tkazgan ilmiy izlanishlar mavjud GESlardan olinadigan quvvatni 20%ga oshirish mumkinligini ko‘rsatdi.

Urushdan keyingi davrlarda elektr energetika fanining asosiy ilmiy yo‘nalishi N. Shchedrin va H.Fozilov tomonidan belgilandi va elektr stansiyalari elektr tarmoqlari va jihozlari ishlarini yaxshilash, puxtaligini oshirish, samaradorligini ko‘tarishga qaratildi.

Akademik H.Fozilov (1909—2003) rahbarligida (T.Nosirov, Q.Allayev, S.Solihov va b.) berilgan elektr sistemalarni optimal rejimlarini hisoblash sohasidagi ishlar katta ilmiy va amaliy ahamiyat kasb etdi.

Akademik G‘.Rahimov (1905—1972) ning tashabbusi bilan Markaziy

Osiyoda birinchi bo'lib «Elektrotexnikaning nazariy asoslari» kafedrasini (1934-y.) tashkil etildi. Bu olim elektrotexnika fanini rivojlantirish sohasida ilmiy maktab yaratdi. Bu maktab ko'plab fan doktorlari (A.Karimov, P.Hasanov, Z.Ismoilov, T.Qodirov, M.Ibodullayev, Y. Rashidov va b.) hamda fan nomzodlarini tayyorladi.

Zamonaviy eksperimental baza yaratish va yuqori malakali kadrlar tayyorlashda N.Shchedrin, H.Fozilov, M.Homidxonov va Z.Solihovning xizmatlari katta bo'ldi.

Elektroenergetika sohasini axborot va boshqarish sistemalarisiz tasavvur qilish mumkin emas. EHM yordamida energetika sistemalari rejimlarini operativ boshqarish bo'yicha ma'lumotlarni ishlab chiqish sistemasining matematik modelini akademik J. Abdullayev, elektr tarmoqlari optimal rejimini boshqarishni prof. E.Payziyev taklif etdi. Axborot va o'lchash texnikasiga doir yangi prinsipdagi birlamchi o'zgartirishlarni prof. M.Zaripov va b. ishlab chiqdilar.

Elektr energiyasidan samarali foydalanish yo'nalishida akademik M.Homidxonov va uning shogirdlari (N.Usmonxo'jayev, O.Hoshimov, S.Usmonov, M.Xusanov, A.Dadajanov va b.), B. Umarov hamda A.Dzevenskiy olib borgan ishlar ilmiy va amaliy ahamiyatga ega.

O'zbekiston elektroenergetikasini rivojlantirishda O'zbekiston energetika va elektrlashtirish Vazirligi va uning sobiq vaziri A.Hamidov xizmatlarini alohida qayd etish joiz.

No'an'anaviy energoresurslardan, xususan, quyosh energiyasidan samarali foydalanish yo'nalishida akademiklar G'.Umarov, R.Zohidov, P.Habibullayev, T.Risqiyev va b. izlanishlarini va ular rahbarligida yaratilgan jihoz va qurilmalarni ko'rsatish mumkin.

Sanoat, transport, qurilish, qishloq va suv xo'jaligi ishlab chiqarish jarayonlarida elektr energiyasidan samarali foydalanish yo'nalishida professorlar A.Radjabov, M.Mamedshaxov, N.Bozorov, A.Muxammadiyev, M. Muxammadiyev, T.Kamolov, X.Karimov, N.Xamidov, M.Ismoilov, A. Xoliqov, S.Amirov va X.Murodov tadqiqotlarini qayd etish mumkin.

«Kadrlar tayyorlash milliy dasturi»da belgilangan vazifalarni amalga oshirish o'zbek tilida «Elektrotexnika» va «Elektrotexnikaning nazariy asoslari» fanlari bo'yicha yangi darslik va o'quv qo'llanmalarni nashr etishni taqozo etmoqda. Bu sohada professorlar A.Karimov, S.Majidov, X.Mansurov, U.Ibrohimov va b. mehnatini alohida ta'kidlash zarur.

Birinchi bob

O'ZGARMAS TOK CHIZIQLI ELEKTR ZANJIRLARI VA ULARNI HISOBLASH USULLARI

1.1. ELEKTR ZANJIRLARNI TAVSIFLOVCHI ASOSIY KATTALIKLAR

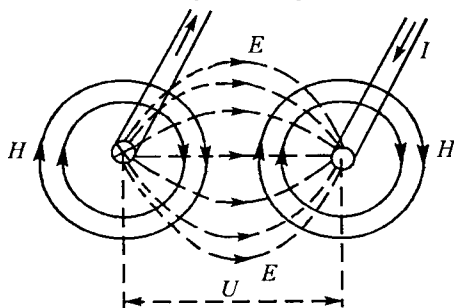
1.1.1. Elektr maydonining kuchlanganligi

Magnit maydonining o'zgarishi natijasida elektr maydoni va aksincha, elektr maydonining o'zgarishi natijasida magnit maydoni hosil bo'lishi bu ikki maydonning o'zaro bog'liqligini bildiradi. Buni elektr energiyani uzatish liniyasining ish faoliyati misolida ko'rish mumkin (1.1-rasm).

Liniya simlari orqali energiya uzatishda bir-biridan izolatsiya qilingan simlar U kuchlanish ta'sirida bo'ladi. Buning natijasida simlar orasida kuchlanganligi E bo'lgan elektr maydon hosil bo'ladi. Liniya simlaridan I tok o'tishi natijasida ularning ichida va atrofida kuchlanganligi H bo'lgan magnit maydon yuzaga keladi (1.1-rasmda elektr maydon uzuq chiziqlar, magnit maydon esa uzluksiz chiziqlar bilan ko'rsatilgan).

1.1-rasmdagi maydonlar manzarasidan ko'rinib turibdiki, *elektr maydon kuch chiziqlari berk emas — ular musbat zaryadlangan simdan boshlanib manfiy zaryadlangan simda tugaydi, magnit maydon kuch chiziqlari esa berk — ularning boshi ham, oxiri ham yo'q.*

Elektr maydonning eng oddiy ko'rinishi qo'zg'almas elektr zaryadlarning maydoni hisoblanadi va u elektrostatik maydon deb ataladi. Bu maydonning har bir nuqtasi kuchlanganlik vektori \vec{E} bilan tavsiflanadi.



Elektr maydonining kuchlanganligi unga kiritilgan nuqtali zaryadga maydon tom onidan ta'sir etayotgan kuchning shu zaryadga nisbatiga teng. Kuchlanganlik vektorining yo'nalishi nuqtali zaryadga ta'sir etayotgan kuch vektorining yo'nalishi bilan mos tushadi, binobarin:

$$\bar{E} = \frac{\bar{F}}{q_0} \left[\frac{N}{Kl} = \frac{Jl}{m \cdot Kl} = \frac{A \cdot V \cdot s}{m \cdot A \cdot s} = \frac{V}{m} \right].$$

Nuqtali zaryad deb, shunday jism zaryadiga aytiladiki, uning o'lchami juda kichik bo'lib, zaryadi tadqiq etilayotgan maydon ko'rinishiga ta'sir etmaydi.

Agar $q_0 = 1$ bo'lsa, u holda $\bar{E} = \bar{F}$ bo'lib, elektr maydonning kuchlanganligi son jihatdan birlik zaryadga maydon tomonidan ta'sir etadigan kuchga teng bo'ladi.

Kuchlanganligi barcha nuqtalarda bir xil bo'lgan maydon *bir jinsli maydon* deb ataladi.

1.1.2. Elektr potensial va kuchlanish

Zaryadlangan zarrachani elektr maydon tomonidan ta'sir etuvchi kuch yordamida ko'chirishda maydon energiyasining o'zgarishi hisobiga ma'lum bir ish bajariladi.

Aytaylik, musbat q_0 zaryadli zarracha elektr maydonida ma'lum bir yo'l bo'ylab a nuqtadan b nuqtaga ko'chirilmoqda (1.2-rasm).

Zarrachaga maydon tomonidan ta'sir etayotgan kuch $\bar{F} = q_0 \bar{E}$ maydonning har bir nuqtasida kuchlanganlik kuch chiziqlariga urinma bo'ylab yo'naladi. 1.2-rasmda α – kuch vektori \bar{F} va ab yo'l trayektoriyasiga o'tkazilgan urinma orasidagi burchak. ab yo'l trayektoriyasidan zarracha harakati yo'nalishi bo'ylab $d\bar{l}$ elementar vektor ajratsak, u holda $d\bar{E}$ va $d\bar{l}$ vektorlar orasidagi burchak α bo'ladi.

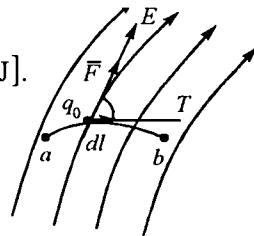
Zaryadlangan zarrachani l yo'l bo'ylab ko'chirishda maydon kuchlari ish bajaradi:

$$dA = F dl \cos \alpha = q_0 E dl \cos \alpha = q_0 \bar{E} d\bar{l}.$$

Butun ab yo'l bo'ylab bajarilgan ish:

$$A = \int_a^b F \cos \alpha dl = \int_a^b E q_0 \cos \alpha dl = q_0 \int_a^b \bar{E} d\bar{l} \quad [J].$$

Elektr maydon o'zining har bir nuqtasida potensial energiyaga yoki ish bajarish qobiliyatiga ega. Bu qobiliyat potensial funksiya yoki potensial φ bilan aniqlanadi va u skalyar kattalik hisoblanadi.



1.2-rasm

Elektr maydoni berilgan nuqtasi potensialining o'ldhovi sifatida birlik zaryadni maydonning shu nuqtasidan cheksizlikka ko'chirishda maydon tomonidan bajarilgan ish qabul qilingan:

$$\varphi_a = \frac{A_a}{q_0} = \int_a^{\infty} \bar{E} d\bar{l} \quad [\text{V}].$$

Elektrostatika masalalarida odatda Yer yuzasining potentsiali nolga teng deb qabul qilinadi. Fazoning cheklangan sohasida joylashgan va cheksiz dielektrik muhit bilan o'ralgan zaryadlangan jismlarga oid masalalarni yechishda bu jismdan cheksiz uzoqlikda joylashgan nuqtalar potentsiali odatda nolga teng deb olinadi.

q zaryaddan R masofada joylashgan nuqtaning potentsiali quyidagicha aniqlanadi:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi R\epsilon_a},$$

bu yerda ϵ_a — moddaning absolyut dielektrik singdiruvchanligi.

Nuqtali zaryadni elektr maydoni kuchlari yordamida a nuqtadan b nuqtaga ko'chirishda quyidagi tenglama bilan aniqlanadigan ish bajariladi:

$$A_{ab} = A_a - A_b = \varphi_a q_0 - \varphi_b q_0 = q_0(\varphi_a - \varphi_b).$$

Elektr maydonning ikki nuqtasi orasidagi potentsiallar ayirmasi elektr kuchlanish deb ataladi:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \frac{A_{ab}}{q_0} = \int_a^b \bar{E} d\bar{l} \quad [\text{V}].$$

Elektr kuchlanish qiymati jihatdan birlik zaryadni maydonning bir nuqtasidan ikkinchi nuqtasiga ko'chirishda sarflangan ishga teng.

Kuchlanish vektor kattalik bo'lib, uning musbat yo'nalishi potentsiali yuqori bo'lgan nuqtadan potentsiali past bo'lgan nuqtaga tomon olinadi, qiymati esa o'zi aniqlanayotgan nuqtalar holatiga bog'liq va zaryad ko'chayotgan yo'lga bog'liq emas.

1.1.3. Elektr tok. Tok zichligi

Elektr zaryadlari erkin tashuvchilarining elektr maydoni ta'sirida tartibli harakati elektr tok deyiladi. Elektr tok son jihatdan quyidagicha aniqlanadi:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt},$$

bu yerda Δq — elementar zaryad, Δt — shu zaryadni biror yuzadan o'tish vaqti.

Vaqt bo'yicha qiymati va yo'nalishi o'zgarmaydigan tok o'zgaras tok, vaqt bo'yicha o'zgaradigan tok o'zgaruvchan tok deb ataladi.

O'zgaras tokning qiymati o'tkazgich ko'ndalang kesimidan 1 s vaqt mobaynida o'tadigan elektr miqdori yoki zaryad bilan aniqlanadi:

$$I = \frac{Q}{t} \quad \left[\frac{\text{Kl}}{\text{s}} = \text{A} \right].$$

Amper — o'zgaras tokning shunday qiymatiki, u cheksiz uzun va ingichka hamda vakuumda o'zaro 1 m masofada joylashgan ikkita o'tkazgichdan o'tganda ular orasida qiymati $2 \cdot 10^{-7}$ N ga teng bo'lgan kuch yuzaga keladi.

Elektr tokning musbat yo'nalishi sifatida musbat zaryadlarning manbaning «+» qismasidan «-» qismasiga harakat yo'nalishi shartli ravishda qabul qilingan.

Elektr tokning uzluksiz o'tishi uchun potentsiallar farqini hosil qiluvchi manba va zaryadlar harakati uchun berk yo'l bo'lishi shart.

O'tkazgichlarni elektr tok bilan qanday darajada yuklanganligini baholash uchun tok zichligi tushunchasidan foydalaniladi.

Tok zichligi vektor kattalik bo'lib, Δs elementar yuzadan o'tayotgan Δi elementar tokning Δs yuzaga nisbati $\Delta s \rightarrow 0$ dagi limitiga teng:

$$\bar{\delta} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta i}{\Delta s} = \frac{di}{ds}$$

Masalan, elektr mashinalari chulg'amlarida ruxsat etilgan tok zichligi 3,7 A/mm² ga teng.

Agar tok o'tkazgich kesimi bo'ylab bir tekis taqsimlangan bo'lsa, u holda tok zichligi:

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

1.2. ELEKTR ZANJIR VA UNING ELEMENTLARI

Elektr zanjir elektr tokni hosil qilish va uning o'tishini ta'minlaydigan qurilma va obyektlarning majmui bo'lib, undagi elektromagnit jarayonlar elektr yurituvchi kuch (EYK), tok va kuchlanish tushunchalari bilan ifodalanadi.

Elektr zanjir tushunchasi elektrotexnika fanining tayanch tushunchasidir.

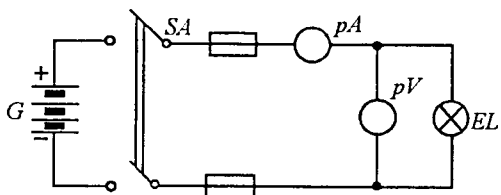
Elektr energiya manbai, iste'molchi va ularni o'zaro birlashtiruvchi o'tkazgichlar elektr zanjirning asosiy elementlari, o'lchash asboblari, ulab-uzgichlar va himoyalash qurilmalari esa uning yordamchi elementlari hisoblanadi. Demak, elektr zanjir elementi bu elektr zanjir tarkibiga kiruvchi alohida qurilma bo'lib, u zanjirda aniq vazifani bajaradi.

Elektr zanjirning elementlari shartli belgilar bilan tasvirlanadi.

Elektr zanjirning elementlari va ularni o'zaro ulanishining grafik tasviri elektr zanjirning sxemasi deyiladi.

1.3-rasmda oddiy elektr zanjirning sxemasi keltirilgan. Unda G — akkumulyator — elektr energiya manbai. U kimyoviy energiyani elektr energiyaga aylantiradi. EL — cho'g'lanma lampa — iste'molchi, unda elektr energiyasi yorug'lik va issiqlik energiyalariga aylantiriladi. SA — kalit, zanjirni ulab uzadi. pA — ampermetr, pV — voltmeter. To'g'ri chiziqlar — ulagich simlar — o'tkazgichlardir.

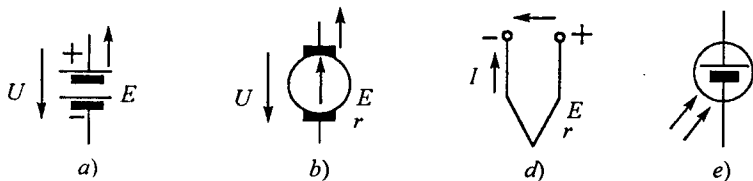
Elektr energiya manbalarining shartli belgilari-sxemalari 1.4-*a, b, d, e*, rasmlarda keltirgan.



1.3-rasm.

Elektr energiya manbalarida turli tabiatli energiya maxsus o'zgartgichlar vositasida elektr energiyaga aylantiriladi.

O'zgartiriladigan energiya-ning turiga ko'ra elektr ener-



1.4-rasm. *a* — galvanik element; *b* — doimiy magnitli o'zgarmas tok elektr generatori; *d* — termojuft; *e* — fotoelement.

giya manbalari kimyoviy va fizik manbalarga bo'linadi. Kimyoviy reagentlar orasida oksidlanish-qaytarilish jarayonlari hisobiga elektr energiya ishlab chiqaruvchi manbalar **kimyoviy manbalar** deyiladi. Kimyoviy manbalarga galvanik elementlar, akkumulyatorlar va batareyalar kiradi.

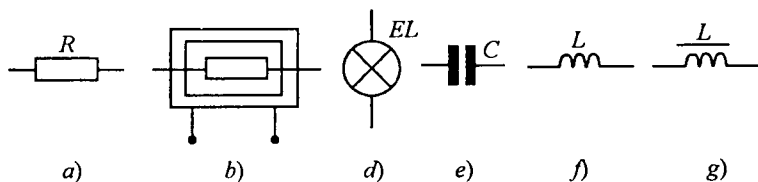
Mexanik, issiqlik, elektromagnit, yorug'lik, radiatsion nurlanish, yadroviy parchalanish energiyalarini elektr energiyaga aylantiradigan qurilmalar **fizik manbalar** deyiladi. Ularga elektr generatorlar, termoelektr generatorlar, termoemission o'zgartkichlar, magnitogidrodinamik (MGD) generatorlar va quyosh nurlanishi hamda atom parchalanish generatorlari kiradi.

Elektr energiyasi iste'molchilarining shartli belgilari-sxemalari 1.5-*a, b, d, e, f, g* rasmlarda keltirgan.

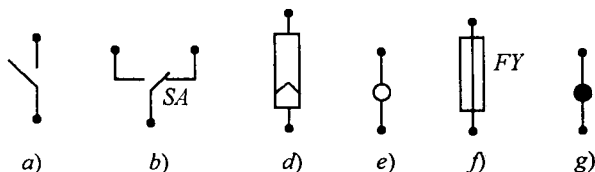
Elektr energiya iste'molchilari (elektr motorlar, elektr qo'ralar, issiqlik asboblari, cho'g'lanish lampalari, rezistorlar va b.) elektr energiyani boshqa tur energiyaga aylantirish uchun xizmat qiladi.

Elektr zanjir yordamchi elementlarining shartli belgilari-sxemalari 1.6-*a, b, d, e, f, g*-rasmlarda keltirilgan.

Manba bilan iste'molchilar o'zaro o'tkazgich simlar yordamida birlashtiriladi. Ular elektr energiyasini manbadan iste'molchiga kam isrof bilan uzatadi. Elektr zanjirlariga ko'pincha yordamchi va o'lchash



1.5-rasm. *a* — rezistor; *b* — elektr qizdirgich; *d* — cho'g'lanma lampa; *e* — kondensator; *f* — induktiv g'altak; *g* — o'zakli g'altak — drossel.



1.6-rasm. *a* — kalit (ulab-uzgich); *b* — qayta ulagich; *d* — shtepsel (raz'em); *e* — ajratish mumkin bo'lgan o'tkazgichning ulangan joyi-qisqich; *f* — eruvchan saqlagich; *g* — o'tkazgichlar kavsharlanib ulangan tugun.

qurilmalari ulanadi. Ular elektr zanjiri ish holatini (misol uchun saqlagichlar) boshqarish, o'ta kuchlanish va katta toklardan saqlash va h.k. uchun xizmat qiladi.

Demak, har qanday elektr zanjirning asosiy vazifasi elektr energiyani manbadan iste'molchiga uzatishdan iboratdir.

Elektr zanjirdagi elektromagnit jarayonlar EYK, tok, kuchlanish, qarshilik (o'tkazuvchanlik), induktivlik, sig'im tushunchalari bilan ifodalanadi.

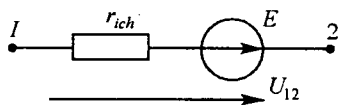
Har qanday tur energiyani elektr energiyaga aylantirishda EYK hosil bo'ladi.

O'zgarmas tok zanjirlarida EYK skalyar kattalik bo'lib, tashqi maydon va induksiyalangan elektr maydonning elektr tok hosil qilish xususiyatini tavsiflaydi.

Manba ichida zaryadlangan zarrachani siljitish uchun tashqi kuchlar tomonidan bajariladigan A ishni shu zarracha q zaryadiga bo'lgan nisbati EYuKning qiymatini aniqlaydi:

$$E = \frac{A}{q}$$

Agar $q = 1 \text{ Kl}$ bo'lsa, unda $E = A$ bo'ladi.



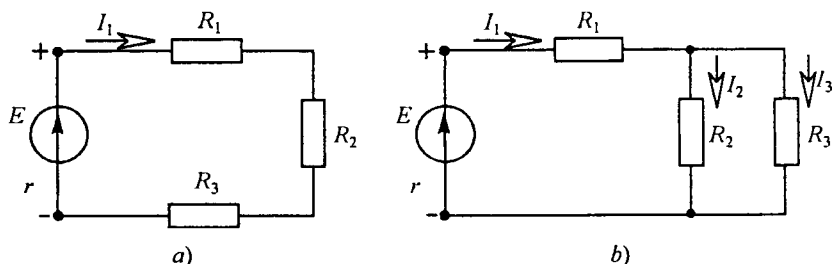
1.7-rasm.

Binobarin, EYK manbaining ichida potentsiali pastroq qismdan potentsial yuqoriroq bo'lgan qismga birlamchi zaryadlarni ko'chirish uchun bajarilgan ish EYuKga teng. Agar manbaining ichki qarshiligi nolga teng, yani $r_{ich} = 0$ bo'lsa, u holda EYK qiymat jihatdan energiya manбайдan tok o'tayotgan holatda musbat va manfiy qisqichlar orasidagi kuchlanishga teng bo'ladi (1.7-rasm):

$$E = \varphi_1 - \varphi_2 = U_{12}$$

Berk zanjirda EYK ta'sirida I tok hosil bo'ladi. Elektr zanjirlar *tarmoqlanmagan* va *tarmoqlangan* bo'ladi. Agar berk zanjirning barcha qismlaridan bitta tok o'tsa, u holda bunday zanjir tarmoqlanmagan bo'ladi (1.8-rasm, a).

Tarmoqlangan zanjirning har bir shoxobchasida o'zining toki bo'ladi (1.8-rasm, b). Elektr sxemada shoxobcha, tugun va kontur tushunchalaridan foydalaniladi.



1.8-rasm.

Shoxobcha — elektr zanjirning bir xil qiymatli tok o'tuvchi qismi. Bunda elektr zanjirning elementlari ketma-ket ulangan qismi tushuniladi.

Tugun — elektr zanjirning uchtadan kam bo'lmagan shoxobchalari ulangan o'rni.

Kontur — elektr zanjirning shoxobchalaridan hosil bo'lgan berk yo'l.

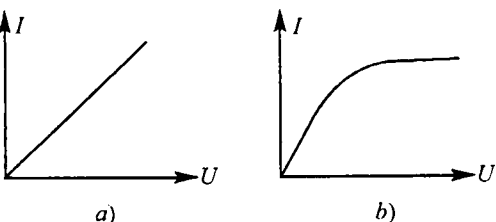
O'zgarmas tok I harfi bilan, qarshilik R va o'tkazuvchanlik G harflari bilan belgilanadi.

Elektr zanjir elementi qismalaridagi kuchlanishning undan o'tuvchi tokka bog'liqligi elementning voltamper xarakteristikasi (VAX) deb ataladi (1.9-rasm). Masalan, rezistordan o'tuvchi tok bilan shu rezistordagi kuchlanish orasidagi bog'lanish rezistorning VAX bo'ladi.

Amalda absissa o'qiga kuchlanish qiymatini, ordinata o'qiga esa tok qiymatini tanlangan masshtabda belgilab, elementning VAX quriladi. Agar rezistor VAX to'g'ri chiziq bo'lsa, u holda bunday rezistor *chiziqli rezistor*, chiziqli elementlardan tuzilgan zanjir esa *chiziqli zanjir* deb ataladi (1.9-rasm, a). Agar rezistorning VAX egri chiziq bo'lsa (1.9-rasm, b), u holda bunday rezistor *chiziqli bo'lmagan rezistor*, bunday rezistorlardan iborat elektr zanjir esa, *chiziqli bo'lmagan elektr zanjir* deb ataladi.

Chiziqli passiv element — rezistor R qarshilikka ega. Undan o'tuvchi tok va rezistorning qismalaridagi kuchlanish U ning o'zaro bog'lanishini *Om qonuni* ifodalaydi: $I = U/R$.

Qarshilikka teskari bo'lgan kattalik *o'tkazuvchanlik* deb ataladi. O'lchov birligi Simens [Sm].



1.9-rasm.

Chiziqli aktiv element — elektromagnit energiya manbai bo‘lib, shartli ravishda ikki turga bo‘linadi: EYK manbai va tok manbai. Bu manbalar amalda ideal va real manbalar ko‘rinishida bo‘lishi mumkin.

Ideal EYK manbai. Bunday manba qismlaridagi kuchlanish U u hosil qilgan tok qiymati I ga bog‘liq bo‘lmaydi. Ideal EYK manbai uchun manbaning ichki qarshiligi $r_{ich} = 0$ (1.10-rasm, a). Shuning uchun $U = E = \text{const}$ bo‘ladi. Ideal EYK manbai VAX absissa o‘qiga parallel to‘g‘ri chiziqdan iborat (1.10-rasm, a) dagi 1 to‘g‘ri chiziq).

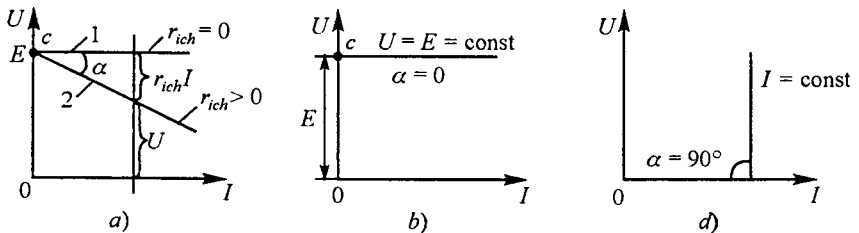
Real EYK manbai. Bunday EYK manbaining ichki qarshiligi noldan farq qiladi. Shuning uchun manba qismlaridagi kuchlanish $U_a = E - r_{ich} I$, ya‘ni U tok qiymati I ga bog‘liq bo‘ladi. Real EYK manbai VAX 1.10-rasm, a da keltirilgan (2 to‘g‘ri chiziq). Real EYK manbaiga misol tariqasida akkumulyator batareyasi, o‘zgarmas tok generatorini keltirish mumkin.

Real manbaning EYKi miqdor jihatidan uning salt ish rejimida (tok nolga teng), qismlaridagi potentsiallar ayirmasi — kuchlanishga teng (1.10-rasm, b) bo‘ladi. Bu manbaga tashqi zanjir ulanganda uning EYuKi avvalgi qiymatini saqlab qola olmaydi, chunki manba qisman ichki qarshilikka ega. Tok ortib borishi bilan $I r_{ich}$ ko‘payadi, kuchlanish $U = E - r_{ich} I$ esa, kamayadi (1.10-rasm, a).

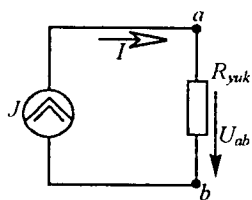
Ideal tok manbai. Agar manbaning toki u ta‘minlab turgan zanjirning qarshiligiga bog‘liq bo‘lmasa, u holda bunday manba ideal tok manbai deyiladi (1.11-rasm).

Agar manbaning EYK E va ichki qarshiligi r_{ich} ni cheksiz oshirib borsak, unda c nuqta ordinata o‘qi bo‘yicha cheksizlikka, α burchagi esa 90° ga intiladi. Bunday manba ideal tok manbai deb ataladi (1.10-rasm, d).

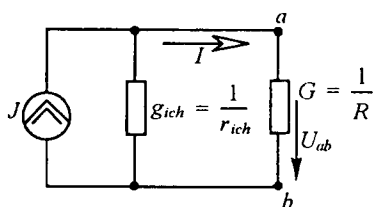
Demak, tok manbai elektromagnit energiya manbai bo‘lib, manba toki va ichki o‘tkazuvchanligi bilan tavsiflanadi. Demak, ideal tok manbaining ichki o‘tkazuvchanligi $g_{ich} = 0$.



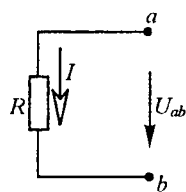
1.10-rasm.



1.11-rasm.



1.12-ras.



1.13-rasm.

Real tok manbai. Haqiqiy tok manbai ma'lum bir qiymatli ichki o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi. Bunda $I = E/r_{ich}$ $g_{ich} = 1/r_{ich}$ $E = I/g_{ich}$ (1.12-rasm).

Tok manbaiga misol qilib elektrostatik generatorni ko'rsatish mumkin.

1.3. OM QONUNI

Agar zanjirning biror qismida EYK manbai bo'lmasa (1.13-rasm), u holda undagi tok bilan kuchlanish orasidagi bog'liqlik quyidagicha aniqlanadi:

$$U_{ab} = RI \text{ yoki } I = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}.$$

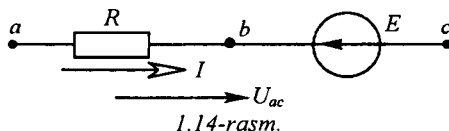
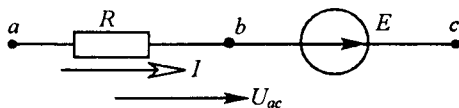
1.3.1. Zanjirning EYK manbali qismi uchun Om qonuni

Agar zanjirning biror qismida EYK manbai bo'lsa, u holda bu zanjir uchun potentsiallar ayirmasi EYKning yo'nalishini e'tiborga olgan holda aniqlanadi. Om qonuni esa quyidagicha ifodalanadi (1.14-rasm, a):

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c + E}{R} = \frac{U_{ac} + E}{R}.$$

1.14-rasm, b uchun:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c - E}{R} = \frac{U_{ac} - E}{R}.$$



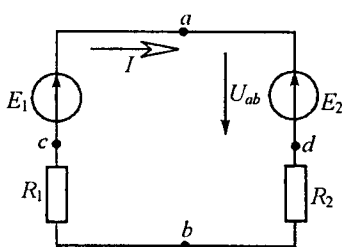
Umumiy holda, ya'ni elektr zanjir tarkibida bir nechta EYK manbai va rezistorlar bo'lsa,

tok $I = \frac{\varphi_a - \varphi_c + \Sigma E}{\Sigma R_{ac}}$ ifodadan aniqlanadi. Bu formula *umumlashgan Om qonunini* ifodalaydi.

Bir konturli elektr zanjiri uchun Om qonuni quyidagicha yoziladi:

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

bunda ΣR — ichki va tashqi qarshiliklarning zanjir bo'yicha arifmetik yig'indisi, ΣE — zanjirdagi EYuKlarning algebraik yig'indisi. Agar tok yo'nalishi EYK yo'nalishi bilan bir xil bo'lsa, u holda EYK E musbat, qarama-qarshi yo'nalishda bo'lsa, manfiy ishora bilan olinadi.



1.15-rasm.

Masala. Tarmoqlanmagan zanjirda (1.15-rasm) EYK $E_1 = 110$ V, $E_2 = 48$ V, rezistor $R_1 = 18 \Omega$, $R_2 = 13 \Omega$. a va b nuqtalar orasidagi kuchlanishni aniqlang.

Tokning musbat yo'nalishini soat mili harakati yo'nalishi bo'yicha qabul qilamiz. Om qonuniga asosan:

$$I = \frac{\Sigma E}{\Sigma R} = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{110 - 48}{18 + 13} = 2 \text{ A.}$$

EYK E_1 ning yo'nalishi tok I yo'nalishi bilan bir xil bo'lgani uchun E_1 musbat ishorada, E_2 yo'nalishi esa tok I yo'nalishiga teskari bo'lgani uchun manfiy ishorada olindi. Tok yo'nalishi ixtiyoriy qabul qilinadi. Agar topilgan tokning qiymati manfiy ishora bilan chiqsa, u holda tokning haqiqiy yo'nalishi dastlab qabul qilingan tok yo'nalishiga teskari yo'nalgan bo'ladi.

a va b nuqtalar orasidagi potentsiallar ayirmasi U_{ab} ni aniqlash uchun zanjirning adb qismini olib, unga zanjirning EYK manbali qismi uchun Om qonuni qo'llaniladi:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b - E_2}{R_2} = \frac{U_{ab} - E_2}{R_2},$$

bundan

$$U_{ab} = E_2 + R_2 I = 48 + 13 \cdot 2 = 74 \text{ V.}$$

Zanjirning acb qismi uchun esa

$$I = \frac{\varphi_b - \varphi_a + E_1}{R_1} = \frac{U_{ba} + E_1}{R_1},$$

bundan
$$U_{ba} = -E_1 + R_1 I_1 = 48 + 13 \cdot 2 = 74 \text{ V.}$$

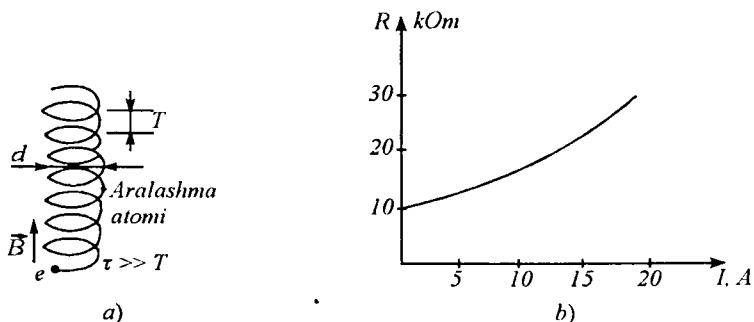
Demak, $U_{ab} = 74 \text{ B}$ yoki $U_{ba} = -74 \text{ V.}$

1.3.2. Katta toklarda Om qonunining buzilishi

Shu paytgacha biz elektronlarning faqat elektr maydon ta'siridagi harakatini o'rganib keldik. Lekin ma'lumki, o'tkazgichdan o'tayotgan tok magnit maydonining manbaidir. Magnit maydoni esa o'tkazgichning nafaqat tashqarisida, balki ichkarisida ham mavjuddir.

Misol uchun $I = 10 \text{ A}$ tok o'tayotgan va diametri $d = 1 \text{ mm}$ bo'lgan o'tkazgich atrofidagi magnit maydonning induksiyasi $B = 4\mu_0 I/d \approx 0,012 \text{ Tl}$ ($\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s/A} \cdot \text{m}$ — magnit doimiysi). Tokning magnit maydoni Om qonunining buzilishiga olib kelishi mumkin.

Haqiqatan ham, magnit maydonida harakatlanayotgan elektronga uning trayektoriyasini buzuvchi Lorens kuchi ta'sir qiladi. Agar maydon induksiyasi B elektron tezligi v ga perpendikulyar bo'lsa, u xolda elektron trayektoriyasi $r = mv/eB$ radiusli aylana ko'rinishiga ega bo'ladi (m, e — elektron massasi va zaryadi). Agar B va v vektorlar orasidagi burchak α bo'lsa, u holda elektron diametri $d = 2 (mv/eB) \sin \alpha$ li spiral bo'yicha harakat qiladi. Bunda elektron spiralning bir o'ramini $T = 2\pi m/eB$ vaqt davomida bosib o'tadi. Agar elektronning erkin harakatlanish vaqti $\tau \gg T$ bo'lsa, u spiral bo'ylab harakatlanadi (1.16-rasm, a). Bu holda spiralning diametri $d < vT$ τ vaqt davomida magnit maydoni yo'qligida elektronning siljish masofasi $l = v\tau$ dan ancha kam bo'ladi. Shuning uchun τ vaqt davomida elektron diametri d bo'lgan quvurda «qamalib» qolganday bo'ladi.



1.16-rasm.

Natijada o'tkazgichning qarshiligi magnit maydon bo'lmagan holga nisbatan kattaroq bo'ladi. Binobarin, o'z tokining magnit maydoni ta'sirida bo'lgan o'tkazgichning R qarshiligining o'zgarishi katta toklarda Om qonunining buzilishiga olib keladi.

Agar $\tau \ll T$ bo'lsa, u holda ikkita ketma-ket keladigan to'qnashuvlar orasidagi elektronlar harakati to'g'ri chiziqdan juda kam farq qiladi. Bu holda magnit maydon o'tkazgich qarshiligiga amalda ta'sir qilmaydi.

Magnit maydon induksiyasi B_0 ta'sir qiladigan qiymatni elektronning aylanma orbita bo'ylab harakat davrining $T = 2\pi m/eB$ erkin harakat vaqti τ ga tengligidan keltirib chiqariladi: $B_0 = 2\pi m/e\tau$.

Metall o'tkazgichlarda mazkur qiymat taxminan 0,01 Tl ga teng. Bunday maydon diametri $d = 1 \text{ mm}$ bo'lgan simdan $I = 10 \text{ A}$ tok o'tganda paydo bo'ladi.

Metall o'tkazgich qarshiligini undan o'tayotgan tokka bog'liqligining eksperimental grafigi 1.16-rasm, b da keltirilgan. Grafikdan ko'rinib turibdiki, tok oshishi bilan qarshilik bir necha barobar ko'payadi. Shunday qilib, tok magnit maydonining u o'tayotgan o'tkazgich qarshiligiga ta'sir qilishi Om qonunining buzilishiga olib keladi.

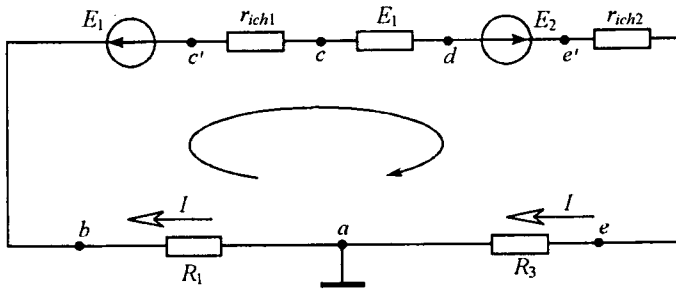
Biz o'tkazgichlarda Om qonunining katta toklarda buzilishining fizik sabablarini ko'rib chiqdik. Bundan tashqari texnikada keng qo'llaniladigan chiziqli bo'lmagan elementlar — diod va tranzistorlarda hamda turli metallarning kontaktlashgan joylarida Om qonunining buzilishi kuzatiladi.

O'zgaruvchan elektr va magnit maydonlari ta'siridagi o'tkazgichlarda ham Om qonuni buzilishi ro'y beradi.

1.4. POTENSIAL DIAGRAMMA

Zanjirning biror qismi yoki berk zanjir (kontur) uchun belgilangan nuqtalardagi potentsiallar qiymatini shu zanjir qarshiliklarining qiymatiga qarab o'zgarish grafigiga *potensial diagramma* deb ataladi. Potensial diagrammani qurish uchun to'g'ri burchakli koordinatalar tekisligining absissa o'qiga kontur bo'yicha olingan rezistorlar qarshiliklari qiymati, ordinata o'qiga esa tegishli potentsiallar qiymati qo'yiladi. Diagrammadan zanjirning yoki konturning biror qismiga tegishli potentsiallarni aniqlash mumkin bo'ladi.

1-masala. Bir konturli elektr zanjir uchun potentsiallar diagrammasini quring (1.17-rasm).



1.17-rasm.

Berilgan: $E_1 = 24 \text{ V}$; $E_2 = 110 \text{ V}$; $R_1 = 4 \Omega$; $R_2 = 3 \Omega$; $R_3 = 7 \Omega$; $r_{ich2} = 1 \Omega$.

Yechish. EYK $E_2 > E_1$ bo'lganligi uchun tokning haqiqiy yo'nalishi E_2 EYKning yo'nalishi bilan bir xil bo'ladi.

Berk zanjir uchun Om qonuniga ko'ra tokni topamiz:

$$I = \frac{E_2 - E_1}{R_1 + r_{ich1} + R_2 + r_{ich2} + R_3} = \frac{110 - 24}{4 + 1 + 3 + 1 + 7} = 5,375 \text{ A.}$$

Potensial diagrammani qurish uchun zanjirning barcha nuqtalari potentsiallarini bilish zarur. a nuqtani yerga ulangan deb qabul qilamiz. Shuning uchun uning potentsiali $\varphi_a = 0$ bo'ladi. Elektr zanjirda a nuqtadan b nuqtaga o'tishda R_1 qarshilikli rezistor mavjud. Bu rezistorda $R_1 I$ kuchlanish tushuvi hosil bo'ladi, ya'ni u va b nuqtalar potentsiallari ayirmasiga teng:

$$\varphi_a - \varphi_b = R_1 I, \text{ bundan } \varphi_b = \varphi_a - R_1 I = -21,5 \text{ V.}$$

b va c' nuqtalar orasida E_1 EYK manbai ulangani uchun c' nuqta potentsiali b nuqta potentsialidan E_1 kattalikka pasayadi, ya'ni:

$$\varphi_{c'} = \varphi_b - E_1 = -21,5 - 24 = -45,5 \text{ V.}$$

c' nuqtadan c nuqtaga o'tishda r_{ich1} rezistor bor. Shuning uchun:

$$\varphi_c = \varphi_{c'} - r_{ich1} I = -45,5 - 5,375 = -50,875 \text{ V.}$$

Endi boshqa nuqtalarning potentsiallarini topamiz:

$$\varphi_c - \varphi_d = R_2 I,$$

$$\varphi_d = \varphi_c - R_2 I = -50,875 - 16,12 = -66,995 \text{ V.}$$

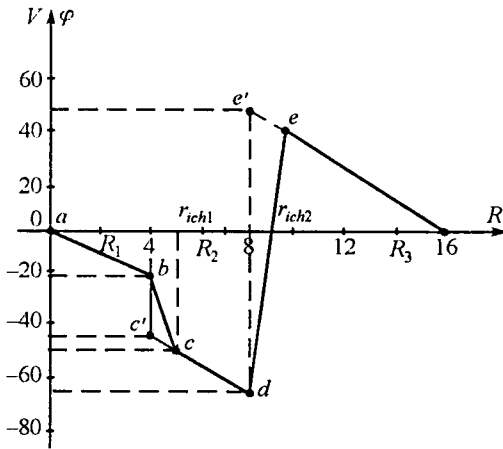
$$\varphi_e - \varphi_d = E_2,$$

$$\varphi_e = \varphi_d + E_2 = -66,995 + 110 \approx 43,01 \text{ V.}$$

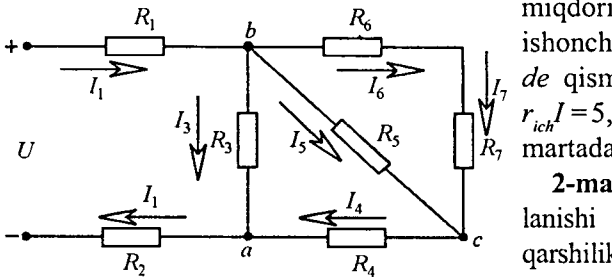
$$\varphi_e = \varphi_e - r_{ich2} I = 43 - 5,375 = 37,625 \text{ V.}$$

$$\varphi_e - \varphi_a = R_3 I,$$

$$\varphi_a = \varphi_e - R_3 I = 37,625 - 37,625 = 0 \text{ V.}$$



1.18-rasm.



1.19-rasm.

Potensial diagrammani koordinatalar tekisligida qurish uchun berilgan konturning ekvivalent qarshiligini hisoblaymiz:

$$R_{ekv} = R_1 + r_{ich1} + R_2 + r_{ich2} + R_3 = 16 \Omega.$$

Qarshilik va potensial uchun masshtab tanlaymiz:

$$m_R = 0,2 \Omega/\text{mm}, m_U = 2 \text{ V}/\text{mm}.$$

Potensial diagrammadan berilgan kesmaning og'ish burchagining tangensi tok miqdoriga teng bo'lishiga ishonch hosil qilish mumkin. *de* qismida $E_2 = 110 \text{ V}$, ya'ni $r_{ich} I = 5,37 \text{ V}$ potensialidan 20 martadan ko'proq.

2-masala. Manba kuchlanishi $U = 110 \text{ V}$, elementlar qarshiliklari $R_1 = R_2 = 0,5 \Omega$, $R_3 = R_5 = 10 \Omega$, $R_4 = R_6 = R_7 = 5 \Omega$ bo'lgan elektr zanjiridagi toklar

va elementlardagi kuchlanishlar tushuvi qiymatlarini aniqlang. Elektr zanjir sxemasi 1.19-rasmida keltirilgan.

Yechish. Toklar qiymatini to'g'ridan-to'g'ri aniqlash mumkin emas, chunki elementlardagi kuchlanish qiymatlari noma'lum. Shuning uchun elektr zanjir sxemasini o'zgartirish usulini qo'llab, uning ekvivalent qarshiligini hisoblaymiz:

$$R_{bc} = \frac{(R_6 + R_7)R_5}{R_6 + R_7 + R_5} = \frac{(5+5) \cdot 10}{5+5+10} = 5 \Omega,$$

$$R_{ab} = \frac{(R_{bc} + R_4)R_3}{R_{bc} + R_4 + R_3} = \frac{(5+5) \cdot 10}{5+5+10} = 5 \Omega,$$

$$R_{ekv} = R_{ab} + R_1 + R_2 = 5 + 0,5 + 0,5 = 6 \Omega.$$

Zanjirdagi umumiy tok Om qonuniga binoan aniqlanadi:

$$I_1 = \frac{U}{R_{ekv}} = \frac{110}{6} = 18,33 \text{ A.}$$

Kuchlanish $U_{ab} = R_{ab} I_1 = 5 \cdot 18,33 = 91,65 \text{ V}$

yoki $U_{ab} = U - (R_1 + R_2) I_1 = 110 - (0,5 + 0,5) \cdot 18,33 = 91,67 \text{ V.}$

Shoxobchalardan o'tuvchi toklar

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3} = \frac{91,65}{10} = 9,16 \text{ A,}$$

$$I_4 = I_1 - I_3 = 18,33 - 9,16 = 9,17 \text{ A.}$$

$I_5 = I_6$ bo'lgani uchun R_5 va R_6 rezistorlardan o'tuvchi toklar

$$I_5 = I_6 = I_4 / 2 = 4,58 \text{ A.}$$

Tegishli kuchlanishlarning qiymatlari esa:

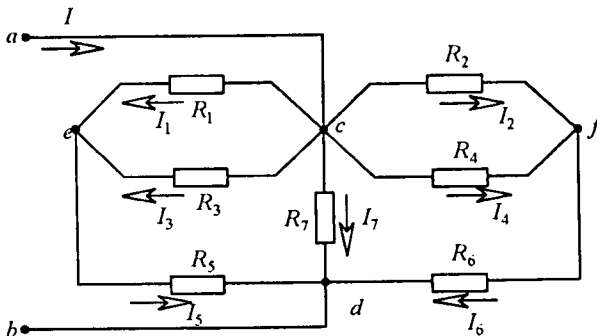
$$U_{bc} = R_5 I_5 = 10 \cdot 4,58 = 45,8 \text{ V,}$$

$$U_{ac} = R_4 I_4 = 5 \cdot 9,17 = 45,85 \text{ V.}$$

3-masala. 1.20-rasmda keltirilgan elektr zanjirini hisoblang. Berilgan: $I_5 = 20 \text{ A}$, $R_1 = R_3 = 8 \Omega$, $R_2 = R_4 = 4 \Omega$, $R_5 = R_6 = 1,5 \Omega$, $R_7 = 3 \Omega$.

Yechish. E'tibor bering, manba kuchlanishining qiymati berilmagan. Shuning uchun dastlab rezistor va shoxobcha toklari bo'yicha kuchlanishlarni hisoblaymiz:

$$U_{ed} = R_5 I_5 = 1,5 \cdot 20 = 30 \text{ V.}$$



1.20-rasm.

$$U_{ec} = R_1 I_1 = R_3 I_3 = I_5 \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = 80 \text{ V},$$

$$U_{cd} = U_{ed} + U_{ec} = 110 \text{ V}.$$

Zanjirning shoxobchalanmagan qismidagi toklar

$$I_6 = \frac{U_{cd}}{R_{246}} = \frac{U_{cd}}{R_6 + R_2 \frac{R_4}{R_2 + R_4}} = \frac{110}{1,5 + 4 \frac{4}{4+4}} = \frac{110}{3,5} = 31,4 \text{ A},$$

chunki $R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$ bo'lgani uchun $I_2 = I_4$ bo'ladi, ya'ni:

$$I_2 = I_4 = \frac{I_6}{2} = \frac{31,4}{2} = 15,7 \text{ A}.$$

U_{cf} kuchlanish: $U_{cf} = R_2 I_2 = 4 \cdot 15,7 = 62,8 \text{ V}$.

R_7 rezistordan o'tuvchi tok: $I_7 = \frac{U_{cd}}{R_7} = \frac{110}{3} = 36,6 \text{ A}$.

Sxemaning shoxobchalanmagan qismidan o'tuvchi umumiy tok

$$I = \frac{U_{cd}}{R_{um}} = \frac{R_7 R_{246} R_{135} U_{cd}}{R_{246} R_{135} + R_7 R_{135} + R_7 R_{246}} = \frac{110}{1,25} = 88 \text{ A}.$$

1.5. ELEKTR ENERGIYA VA ELEKTR QUUVAT. QUUVATLAR BALANSI

1.5.1. Elektr energiya

Oddiy elektr zanjiri uchun tok Om qonuniga ko'ra quyidagicha aniqlanadi:

$$I = \frac{E}{R + r_{ich}}, \text{ bundan } E = IR + I r_{ich}.$$

$IR = U$ ekanligini hisobga olib, $E = U + I r_{ich}$ ifodani hosil qilamiz. Oxirgi tenglamaning ikkala tomonini It ga ko'paytiramiz:

$$EIt = UIt + I^2 r_{ich} t,$$

bu yerda $EIt = W_G$ — manba energiyasi yoki u bajargan ish. $U = A/q = W/q$, $q = It$, $\Delta W = I^2 r_{ich} t$ tengliklardan $W_G = W + \Delta W$ ni hosil qilamiz. Bunda ΔW — manba ichki qarshiligida isrof bo'lgan energiya. $W - R$ qarshilikli iste'molchida sarf bo'lgan energiya.

Shuni ta'kidlash kerakki, ish va energiya teng kuchli tushunchalardir. Energiyani o'lchash uchun jism shu energiyani sarflab bajargan ishini o'lchash kerak bo'ladi.

Energiyaning o'lchov birligi $[W] = [UI] = V \cdot A \cdot s = J$.

1 kW·soat = 3600000 J.

1.5.2. Elektr quvvat

Elektr quvvat — elektr energiyani uzatish va boshqa tur energiyaga aylantirish tezligini ifodalovchi fizik kattalikdir:

$$P_G = \frac{W_G}{t} = E_G I,$$

bu yerda P_G — manbaning quvvati.

Quvvatning o'lchov birligi *vatt*. 1 vatt — 1 sekund davomida 1 J ish bajarishga teng quvvat.

Energiya manbaining iste'molchiga berayotgan quvvati:

$$P = UI = I^2 R = U^2 G. \quad (1.1)$$

Manba ichki qarshiligida isrof bo'lgan quvvat: $\Delta P_G = I^2 r_{ich}$.

1.5.3. Energiya manbaining FIK

Iste'molchi quvvati (foydali quvvat)ning energiya manbai quvvatiga nisbati uning foydali ish koeffitsiyenti (FIK) deb ataladi:

$$\eta = \frac{P}{P_G} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E} = \frac{IR}{IR + I r_{ich}} = \frac{R}{R + r_{ich}}.$$

Tenglamadan ko'rinib turibdiki, manba ichki qarshiligi qancha kichik bo'lsa, uning FIK shuncha katta bo'ladi.

Endi qanday shart bajarilganda energiya manbai maksimal foydali quvvat uzatishini aniqlaymiz. Buning uchun (1.1) tenglamani $I = E / (R + r_{ich})$ ifodani hisobga olgan holda quyidagicha o'zgartiramiz:

$$P = \frac{E^2}{R + 2r_{ich} + \frac{r_{ich}^2}{R}} = f(R).$$

$P=f(R)$ funksiyani maksimumga tekshiramiz:

$$\frac{df(R)}{dR} = \frac{d\left(R + 2r_{ich} + \frac{r_{ich}^2}{R}\right)}{dR} = 1 - \frac{r_{ich}^2}{R^2} = 0 \quad \text{yoki} \quad R = r_{ich}. \quad \text{Bu shartni}$$

$P=f(R)$ ga qo'yib, $P_{\max} = \frac{E^2}{4r_{ich}}$ ni hosil qilamiz.

Shunday qilib, EYK manbai maksimal foydali quvvatda ishlashi uchun tashqi zanjirning qarshiligi R manba ichki qarshiligi r_{ich} ga teng bo'lishi shart. *Bu rejim moslangan iste'molchi rejimi deb ataladi.*

Shu bilan birga bu rejimda manba quvvatining 50% ichki qarshilikda isrof bo'ladi va bunda $\eta = \frac{R}{R + r_{ich}} = \frac{R}{2R} = 0,5$ ga teng.

Bu rejim avtomatika, telemexanika va aloqa texnikasida kichik quvvatli signallarni uzatishda ishlatiladi. Katta quvvatli signallarni uzatishda bu rejimda ishlashga ruxsat etilmaydi. Katta quvvatli manbalar, odatda $R=(10\dots 20)r_{ich}$ rejimda ishlab FIK 95% gacha yetadi.

1.5.4. Elektr zanjirlarida quvvatlar balansi

Energiya saqlanish qonuniga ko'ra o'zgarmas tok zanjiriga ulangan manbalar quvvatlarining algebraik yig'indisi zanjirning barcha iste'molchilaridagi quvvatlarning arifmetik yig'indisiga tengdir:

$$\sum EI = \sum I^2 R.$$

Bu ifoda energetik balans (muvozanat) tenglamasi deyiladi, ya'ni manbalarning ishlab chiqargan elektr energiyasi (quvvati) iste'molchilarda, uzatish liniyasida va manbalarning o'zida sarf bo'lgan energiya (quvvat)ga tengdir.

Agar elektr zanjirda tok yo'nalishi EYK yo'nalishi bilan bir xil bo'lsa, u holda manba vaqt birligi ichida zanjirga energiya uzatuvchi manba hisoblanadi. Agar tok yo'nalishi EYK yo'nalishiga qarama-qarshi bo'lsa, u holda EYK manbai zanjirga energiya bermaydi, aksincha energiyani qabul qiladi, ya'ni iste'molchi vazifasini bajaradi. Misol tariqasida akkumulyatorning zaryadlanishini keltirish mumkin. Bu holda EI ko'paytma quvvatlar muvozanati tenglamasiga manfiy ishora bilan kiradi.

1.21-rasmda keltirilgan zanjir uchun energetik balans tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$E_1 I - E_2 I = R_1 I^2 + R_2 I^2 + R_3 I^2 + R_4 I^2 + r_{ich1} I^2 + r_{ich2} I^2$$

Agar elektr zanjiriga EYK va tok manbalari ulangan bo'lsa, ya'ni zanjirning ayrim tugunlariga EYK manбайдan tashqari tok manbai ham ulangan bo'lsa, u holda bir tugundan ikkinchi tugun tomon yo'nalgan tok

manбайдan hosil bo'lgan quvvat sarfini hisobga olish kerak bo'ladi. Masalan, zanjirning a tuguniga I_k tok kirib b tugundan chiqsa, u holda tok manbai sarflayotgan quvvat $P = U_{ab} I_k$ bo'ladi. Bunday holda energetik muvozanat tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$\sum_{i=1}^n R_i I_i^2 = \sum_{k=1}^m E I_k + \sum_{k=1}^m U_{ab} I_k.$$

Bu tenglama quvvatlar muvozanatining umumiy tenglamasi deyiladi.

1.6. KIRXGOF QONUNLARI

Har qanday elektr zanjiridagi jarayonlar Kirxgofning 1- va 2-qonunlari bilan ifodalanadi.

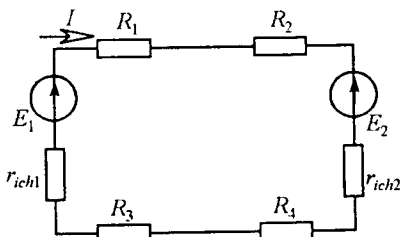
1-qonun. Kirxgofning 1-qonuni zanjirning tugunlariga tegishli bo'lib, unga ko'ra zanjirning istalgan tugunida toklarning algebraik yig'indisi nolga teng bo'ladi, ya'ni:

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

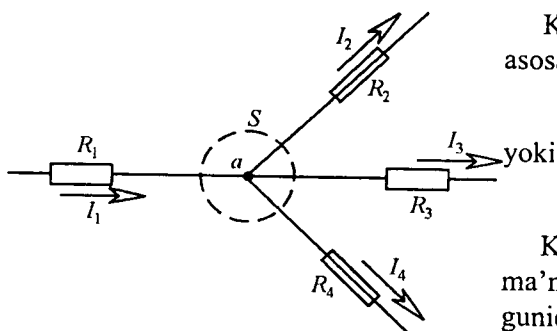
yoki elektr zanjirning istalgan tuguniga kiruvchi toklarning arifmetik yig'indisi shu tugundan chiquvchi toklarning arifmetik yig'indisiga tengdir, ya'ni:

$$\sum_{i=1}^m I_i = \sum_{j=1}^q I_j.$$

1.22-rasmda elektr zanjirning a tuguni ko'rsatilgan. Agar a tugunga kiruvchi toklar musbat ishora bilan olinsa, tugundan chiquvchi toklar ishorasi manfiy olinadi (yoki aksincha).



1.21-rasm.



1.22-rasm.

Kirxgofning 1-qonuniga asosan:

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

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

Kirxgof 1-qonunining fizik ma'nosi: elektr zanjirining tugunida zaryadlarning harakati uzluksizdir va unda zaryadlar to'planib qolmaydi.

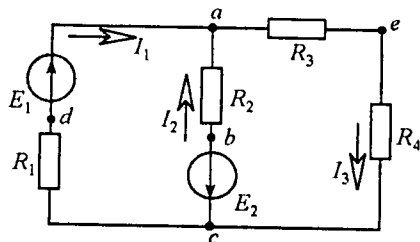
2-qonun. Kirxgofning 2-qonuni zanjirning berk konturlariga tegishli bo'lib, unga ko'ra elektr zanjirining istalgan berk konturida kuchlanishlar tushuvining algebraik yig'indisi shu konturdagi EYuKlarning algebraik yig'indisiga teng, ya'ni:

$$\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{i=1}^m E_i.$$

Agar konturni aylanib chiqish yo'nalishi bilan tok yoki EYK yo'nalishi bir xil bo'lsa, u holda yig'indiga tegishli tashkil etuvchilar «musbat» ishora bilan, aks holda esa «manfiy» ishora bilan kiradi.

Kirxgofning 2-qonunini boshqa ko'rinishda yozish ham mumkin: zanjirning ixtiyoriy konturida kuchlanishlarning algebraik yig'indisi nolga teng:

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0.$$



1.23-rasm.

1.23-rasmdagi $abcda$ kontur uchun $U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} + U_{da} = 0$ yoki $R_1 I_1 - R_2 I_2 = E_1 + E_2$. Kirxgof qonunlarini chiziqli va chiziqli bo'lmagan elektr zanjirlarni hisoblash uchun qo'llash mumkin.

1.7. KIRXGOF QONUNLARI ASOSIDA MURAKKAB ELEKTR ZANJIRLARINING TOPOLOGIK TENGLAMALARINI TUZISH

Har qanday zanjir shoxobchalaridagi toklarni aniqlash uchun Kirxgof qonunlaridan foydalaniladi. Zanjirdagi tugunlar soni T , shoxobchalar soni Sh va tok manbalari soni Sh_{TM} deb belgilansa, har bir shoxobchadan o'tuvchi tokni hisoblashda ma'lum tartibdagi ketma-ketlikni tavsiya etish mumkin. Bunda tok manbai ulangan shoxobchalardan o'tuvchi tok qiymati ma'lum bo'lganligi uchun ularni umumiy toklar sonidan ayriladi, ya'ni $Sh - Sh_{TM}$. Zanjirning qolgan shoxobchalaridagi noma'lum toklarni hisoblashdan oldin quyidagilarni bajarish kerak:

a) har bir shoxobchadagi toklar yo'nalishlarini ixtiyoriy tanlab, ularni sxemada belgilaymiz;

b) Kirxgofning 2-qonuni bo'yicha tenglamalar tuzish uchun konturlarni aylanib chiqish yo'nalishini ixtiyoriy (soat mili harakati yo'nalishida yoki unga teskari) belgilaymiz.

Kirxgofning 1-qonuniga asoslangan va o'zaro bog'liq bo'lmagan tenglamalar sistemasini tuzish uchun tugunlar sonidan bitta kam tenglama tuzish kerak.

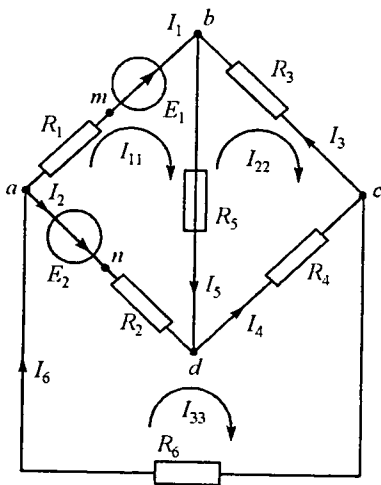
Kirxgofning 2-qonuniga asoslanib tuzilgan tenglamalar soni umumiy shoxobchalar sonidan tok manbalari ulangan shoxobchalar soni Sh_{TM} va Kirxgofning 1-qonuni bo'yicha tuzilgan tenglamalar sonini ayirib topiladi, ya'ni konturlar uchun tuzilgan tenglamalar soni:

$$K = (Sh - Sh_{\phi_M}) - (T - 1) = Sh - Sh_{\phi_M} - T + 1.$$

Kirxgofning 2-qonuni bo'yicha tenglamalarni o'zaro bog'liq bo'lmagan (mustaqil) konturlar uchun tuzish lozim. *O'zaro bog'liq bo'lmagan kontur deb shunday konturga aytiladiki, u oldingi konturlardan kamida bitta yangi shoxobcha bilan farq qiladi.*

Chiziqli algebraik tenglamalar sistemasi-o'zgarmas tok zanjirlarining matematik modeli hisoblanadi.

Elektr zanjirlar nazariyasida ikki turdagi masalalar uchraydi. *Birinchi turdagi masalalarda* sxemasi va elementlari ma'lum bo'lgan zanjirning shoxobchalardagi toklar va ayrim qismlaridagi kuchlanish va quvvatlarni hisoblash kerak bo'ladi. Bu turdagi masalalar zanjirlarning analiz masalalari deb ataladi. *Ikkinchi turdagi masalalarda* teskari masala-



1.24-rasm.

zanjirning ba'zi bir qismlaridagi tok va kuchlanish berilgan bo'lib, zanjir sxemasi va uning elementlarini aniqlash kerak bo'ladi. Bunday masalalar elektr zanjirlarining sintez masalalari deyiladi. Ikkala turdagi masalalarni yechish uchun ko'pincha zanjirning matematik modeli tuziladi.

Quyida nazariy elektrotexnikada ko'p uchraydigan zanjirlarning Kirxgof qonunlari asosida matematik modelini tuzishni 1.24-rasmdagi zanjir misolida ko'rib chiqamiz.

1. Har bir shoxobchadagi toklar yo'nalishi ixtiyoriy tanlab olinadi.

2. Kirxgofning birinchi qonuniga

asosan tenglamalar tuzamiz.

Ularning soni zanjir tugunlaridan bitta kam bo'ladi:

$I_6 - I_1 - I_2 = 0$ a tugun uchun, $I_1 + I_3 - I_5 = 0$ b tugun uchun, $-I_3 + I_4 - I_6 = 0$ c tugun uchun.

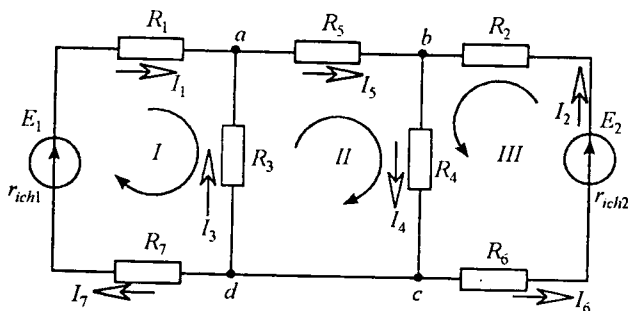
3. Zanjir konturlarini aylanib chiqish yo'nalishi tanlanadi. Bunda tanlangan yo'nalish bo'yicha tuzilgan tenglamalar o'zaro bog'liq bo'lmasligi lozim. Kirxgofning ikkinchi qonuniga ko'ra mustaqil konturlar uchun tenglamalar tuziladi:

$$R_1 I_1 + R_5 I_5 - R_2 I_2 = E_1 - E_2 \text{ abda kontur uchun,}$$

$$-R_5 I_5 - R_3 I_3 - R_4 I_4 = 0 \text{ dbcd kontur uchun,}$$

$$R_2 I_2 + R_4 I_4 + R_6 I_6 = E_2 \text{ adca kontur uchun.}$$

Bu tenglamalarda konturlarni aylanib chiqish yo'nalishi bilan mos keladigan EYK va toklar ishorasi musbat, aylanib chiqish yo'nalishiga qarama-qarshi bo'lgan EYK va toklar ishorasi esa manfiy ishora bilan yoziladi. Bu misoldan ko'rinib turibdiki, tuzilgan tenglamalar soni zanjirdagi noma'lum toklar yoki toklari aniqlanishi kerak bo'lgan shaxobchalar soniga tengdir. Olti noma'lum tokli oltita tenglamalardan iborat sistema yuqorida ko'rilayotgan zanjirning matematik modelidir. Agar hisoblash natijasida qandaydir tokning ishorasi manfiy chiqsa, u holda bu tokning haqiqiy yo'nalishi dastlab tanlangan yo'nalishga nisbatan qarama-qarshi bo'ladi.



1.25-rasm.

Masala. Kirxgof qonunlaridan foydalanib 1.25-rasmda keltirilgan elektr zanjir shoxobchalaridan o'tuvchi toklarni aniqlang. $R_1=0,3 \Omega$; $R_7=0,3 \Omega$; $R_2=R_6=0,4 \Omega$; $R_3=R_4=0,4 \Omega$; $R_5=6 \Omega$; $E_1=110 \text{ V}$; $E_2=48 \text{ V}$. EYK manbalarining ichki qarshiligi $r_{ich1}=0,1 \Omega$, $r_{ich2}=0,2 \Omega$.

Yechish. Berilgan sxemada tugunlar soni $T=3$ (c va d nuqtalar potentsiallari bir xil). Noma'lum toklar yo'nalishlarini ixtiyoriy tanlaymiz. Sxemada beshta shoxobcha bo'lgani uchun shuncha tokni hisoblash zarur. Demak, beshta tenglama tuzib, ularni birgalikda yechish kerak.

Kirxgofning birinchi qonuni bo'yicha tenglamalar soni $T-1=3-1=2$.

a tugun uchun:

$$I_1 + I_3 - I_5 = 0$$

b tugun uchun:

$$I_2 + I_5 - I_4 = 0$$

I, II va III konturlar uchun Kirxgofning ikkinchi qonuni asosida qolgan 3 ta tenglamani tuzamiz. Ma'lumki, konturlarni aylanib chiqish yo'nalishi ixtiyoriy tarzda tanlanadi.

I kontur uchun:

$$E_1 = (r_{ich1} + R_1 + R_7)I_1 - R_3I_3,$$

III kontur uchun:

$$E_2 = (r_{ich2} + R_2 + R_6)I_2 + R_4I_4,$$

nihoyat II kontur uchun:

$$0 = R_3I_3 + R_5I_5 + R_4I_4,$$

Chunki II kontur passiv kontur, u faqat passiv elementlar — R_3 , R_4 va R_5 rezistorlardan tarkib topgan. Unda EYK manbai yo'q.

Tenglamalar sistemasini yechish natijasida $I_3 = -45\text{A}$ aniqlanadi. Manfiy ishora I_3 tokning haqiqiy yoʻnalishi dastlabki tanlangan yoʻnalishiga qarama-qarshi yoʻnalganligini koʻrsatadi.

$$I_4 = 30\text{A}, I_1 = 50\text{A}, I_2 = 25\text{A}, I_5 = 5\text{A}.$$

Zanjirning cd qismi uchun tokning yoʻnalishini ixtiyoriy ravishda c tugundan d tugunga yoʻnalgan deb qabul qilaylik. Bu qism uchun $R_{cd} = 0$. Kirxgofning 1-qonuniga binoan:

$$I_4 = I_{cd} + I_6.$$

$$I_{cd} = I_4 - I_6 = 25 - 30 = -5\text{A}.$$

Manfiy ishora I_{cd} tokning haqiqiy yoʻnalishi dastlabki qabul qilingan yoʻnalishiga qarama-qarshi ekanligini bildiradi.

1.8. CHIZIQLI ELEKTR ZANJIR SXEMALARINI EKVIVALENT OʻZGARTIRISH

Elektr zanjirlarni tahlil qilishda koʻp hollarda uni soddalashtirish zarur boʻladi. Buning uchun sxemaning ayrim qismlarini yanada sodda ekvivalent zanjir bilan almashtirish lozim boʻladi. Agar elektr zanjir sxemasini oʻzaro almashtirganda zanjir elementlaridagi tok va kuchlanishlarning qiymatlari oʻzgarmasa, u holda ular oʻzaro ekvivalent boʻladi.

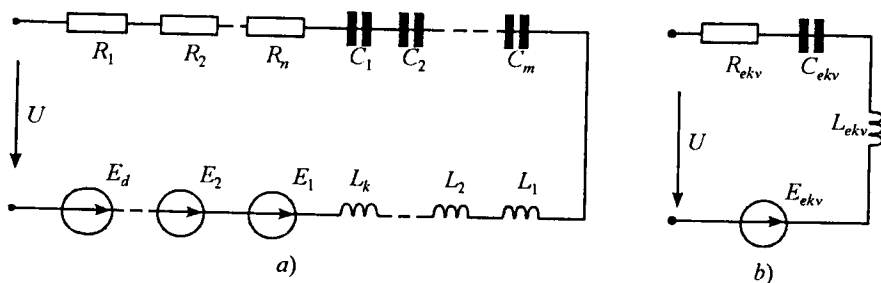
Elektr zanjirning ayrim qismlarini unga ekvivalent boʻlgan qismlar bilan almashtirish ekvivalent oʻzgartirish deb ataladi.

Agar elektr zanjirining ikkita qismi har qanday tashqi taʼsirda ham ekvivalentlik xususiyatini saqlab qolsa, u holda zanjirning bunday qismlari mutlaq ekvivalent qismlar deyiladi.

Elektr zanjirlarini ekvivalent oʻzgartirish tegishli elektr muvozanat tenglamalari sistemasini ekvivalent oʻzgartirishga asoslangan. Amalda esa elektr zanjirlarini oʻzgartirish elektr muvozanat tenglamalarini tuzmasdan aniq qoidalar asosida bevosita sxemalar yordamida bajariladi.

1.8.1. Ketma-ket ulangan elementlardan iborat zanjirni ekvivalent oʻzgartirish

1.26-rasm, a da keltirilgan sxemada n ta rezistor, m ta kondensator, k ta induktivlik va d ta EYK manbalari oʻzaro ketma-ket tutashgan va U kuchlanishli manbaga ulangan.



1.26-rasm.

Zanjirning barcha elementlaridan bir xil tok o'tganligi sababli shu berk kontur uchun Kirxgofning 2-qonuniga asosan quyidagi elektr muvozanat tenglamasini yozish mumkin:

$$(R_1 + \dots + R_n) i + \frac{1}{C_1} \int_0^t idt + \dots + \frac{1}{C_m} \int_0^t idt + L_1 \left(\frac{di}{dt} \right) + \dots + L_k \left(\frac{di}{dt} \right) = U - (E_1 + \dots + E_d). \quad (1.2)$$

Bir xil hadlarni umumlashtirib, (1.2) tenglamani quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$R_{ekv} i + \left(\frac{1}{C_{ekv}} \right) \int_0^t idt + L_{ekv} \left(\frac{di}{dt} \right) = U - E_{ekv}, \quad (1.3)$$

bunda $R_{ekv} = \sum_{i=1}^n R_i$; $\frac{1}{C_{ekv}} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{C_i}$; $L_{ekv} = \sum_{i=1}^k L_i$; $E_{ekv} = \sum_{i=1}^d E_i$.

(1.3) tenglama o'zgartirilgan sxema (1.26-rasm, b) ning tenglamasidir. Shunday qilib, zanjirning bir xil elementli qismlarini ekvivalent yagona mos elementlar, ya'ni ekvivalent rezistiv R_{ekv} , induktiv L_{ekv} , sig'im C_{ekv} va E_{ekv} elementlari bilan almashtirsak, uning bir xil turdagi elementlardan tarkib topgan qismlaridagi tok va kuchlanish o'zgar olmaydi. Bunda EYK manbalari va kuchlanishlarning algebraik yig'indisi olinadi. Konturni tanlangan aylanib chiqish yo'nalishiga qarab EYK larning ishoralari manfiy yoki musbat bo'ladi. Kondensatorlar o'zaro ketma-ket ulangananda umumiy C_{ekv} ning teskari qiymati ketma-ket ulangan kondensatorlar sig'imlarining teskari qiymatlari yig'indisiga teng va C_{ekv} hamma vaqt har bir ketma-ket ulangan sig'im qiymatidan ham kichik bo'ladi. Agar bir xil sig'imli m ta kondensator ketma-ket ulangan bo'lsa, C_{ekv} har bir kondensator sig'imidan m marta kam bo'ladi.

1.8.2. Parallel ulangan elementlardan iborat zanjirlarni ekvivalent o'zgartirish

1.27-rasm, *a* da keltirilgan elektr zanjir sxemasida *n* ta rezistor, *m* ta kondensator, *k* ta induktivlik va *d* ta tok manbalari o'zaro parallel ulangan. Bu zanjir umumlashgan ikki tugunli zanjir deyiladi.

Zanjirning barcha elementlari bir xil kuchlanishga ega. Shuning uchun zanjirning elektr muvozanat tenglamasi Kirxgofning 1- qonuniga asosan tuziladi:

$$i = \frac{1}{R_1}u + \frac{1}{R_2}u + \dots + \frac{1}{R_n}u + C_1 \frac{du}{dt} + C_2 \frac{du}{dt} + \dots + C_m \frac{du}{dt} + \frac{1}{L_1} \int_{-\infty}^t u dt + \frac{1}{L_2} \int_{-\infty}^t u dt + \dots + \frac{1}{L_k} \int_{-\infty}^t u dt - (J_1 + J_2 + \dots + J_d).$$

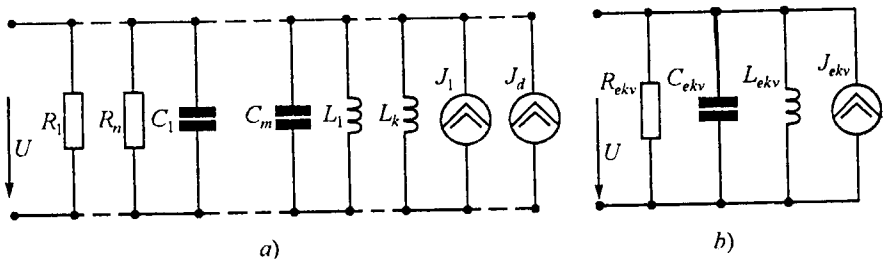
Bir xil hadlarni ixchamlab, quyidagicha yozish mumkin:

$$i = \frac{1}{R_{ekv}}u + C_{ekv} \frac{du}{dt} + \frac{1}{L_{ekv}} \int_{-\infty}^t u dt - J_{ekv}, \quad (1.4)$$

bu yerda

$$\frac{1}{R_{ekv}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}; \quad C_{ekv} = \sum_{i=1}^m C_i; \quad \frac{1}{L_{ekv}} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{L_i}; \quad J_{ekv} = \sum_{i=1}^d J_i.$$

(1.4) tenglamaga 1.27-rasm, *b* dagi o'zgartirilgan ekvivalent sxema mos keladi. Har bir guruhda parallel ulangan bir xil turdagi elementlarni ekvivalent element bilan almashtirsak, ularning parametrlari R_{ekv} , C_{ekv} , L_{ekv} , J_{ekv} bo'ladi va ular (1.4) ifodalar yordamida aniqlanadi. Umumlashgan ikki tugunli zanjirda (1.27-rasm) kirish kuchlanishi va tok qiymatlari o'z-



1.27-rasm.

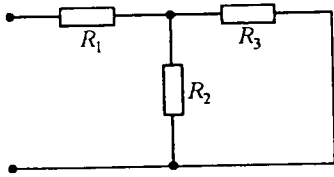
garmay qoladi. O‘zaro parallel ulangan kondensatorlar sig‘imlari uchun C_{ekv} va tok manbalarining ekvivalent qiymati J_{ekv} o‘zaro parallel ulangan elementlar parametrlarining yig‘indisiga teng. Bu yerda tok manbalari toklarining yig‘indisi algebraik yig‘indi bo‘lib, undagi qo‘shiluvchilarning ishoralari toklarning yo‘nalishiga qarab olinadi, ya’ni tenglama qaysi tugunga nisbatan tuzilgan bo‘lsa, o‘sha tugunga nisbatan tok manbalarining yo‘nalishi e‘tiborga olinadi. Agar bir xil sig‘imli kondensatorlar o‘zaro parallel ulangan bo‘lsa, u holda $C_{\text{экв}} = mC$ bo‘ladi. Parallel ulangan rezistorlar va induktivliklar ekvivalent qiymatlarining teskari qiymati alohida har bir element uchun teskari olingan qiymatlarining yig‘indisiga teng. R_{ekv} va L_{ekv} qiymatlari har bir elementning qiymatlaridan ham kam bo‘ladi. Bir xil qarshilik va induktivlikka ega bo‘lgan elementlar o‘zaro parallel ulanganda, ularning ekvivalent parametrlari $R_{ekv} = R/n$ va $L_{ekv} = L/k$ bo‘ladi.

1.8.3. Aralash ulangan elementlardan iborat zanjirlarni ekvivalent o‘zgartirish

Aralash ulangan zanjirda parallel yoki ketma-ket ulangan elementlar bitta ekvivalent ikki qutblik bilan almashtiriladi. Bunda ekvivalent o‘tkazuvchanlik parallel ulangan elementlar o‘tkazuvchanliklarining yig‘indisiga teng bo‘ladi.

Bir xil turdagi ketma-ket ulangan elementlarni bitta ekvivalent ikki qutblik bilan almashtirib, uning umumiy qarshiligi ketma-ket ulangan qarshiliklarning yig‘indisiga teng deb olinadi. Elementlari aralash ulangan sxemalarga zanjirsimon yoki narvonsimon zanjirlar kiradi. Ularning kirish qarshiligi yoki kirish o‘tkazuvchanligi uzluksiz zanjirsimon kasr bilan ifodalanishi mumkin:

$$a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{a_3 + \frac{1}{\vdots + \frac{1}{a_{n-1} + \frac{1}{a_n}}}}},$$



1.28-rasm.

bu yerda $a_1, a_2, a_3, a_4, \dots, a_n$ koeffitsiyentlar zanjirsimon kasrning elementlari deb ataladi. Kasr elementlarining soni n chegarali zanjirsimon kasr bo'lishi mumkin. Oddiy narvonsimon zanjir (1.28-rasm) umumiy qarshiligini aniqlaymiz:

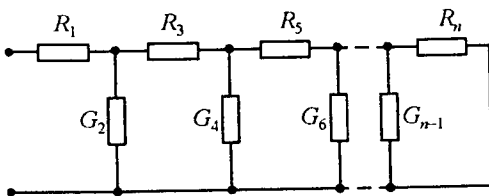
$$R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = R_1 + \frac{1}{\left(\frac{1}{R_2}\right) + \left(\frac{1}{R_3}\right)}.$$

Bu formuladagi R_2 qarshilikni $G_2 = 1/R_2$ o'tkazuvchanlik bilan almashtiramiz va quyidagi ifodani hosil qilamiz:

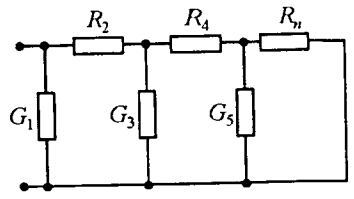
$$R = R_1 + \frac{1}{G_2 + \left(\frac{1}{R_3}\right)}.$$

Shunday qilib, ko'rilayotgan zanjirning kirish qarshiligi zanjirsimon kasr bilan tasvirlanadi, bunda a_1, a_2, a_3 lar tegishli R_1, R_2, R_3 lardir. Xuddi shunday o'zgartirishlar ishlatib narvonsimon zanjirning kirish qarshiligini zanjirsimon kasr ko'rinishda ifodalaymiz (1.29-rasm, a):

$$R = R_1 + \frac{1}{G_2 + \frac{1}{R_3 + \frac{1}{G_4 + \frac{1}{R_5 + \frac{1}{G_6 + \frac{1}{R_6 + \frac{1}{G_{n-1} + \frac{1}{R_{n+2} + \frac{1}{G_{2n+2} + \frac{1}{R_{2n-1} + \frac{1}{G_{2n}}}}}}}}}}}}}}.$$



a)



b)

1.29-rasm.

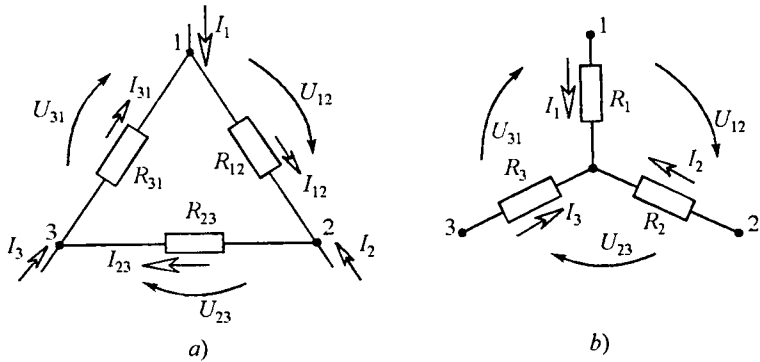
Narvonsimon zanjir shaxobchalarining tashkil etuvchilari ($R_1, R_3 \dots R_n$) va ikki qutblik ko'ndalang shaxobchalariga kiruvchi ($G_2, G_4, G_6, \dots, G_{n-1}$) lardir. Agar narvonsimon zanjirlarning ko'ndalang shaxobchasi to'g'ridan-to'g'ri tashqi qismlarga ulansa (1.29-rasm, b), unda zanjirsimon kasr kirish o'tkazuvchanlik ko'rinishida yoziladi:

$$G = G_1 + \frac{1}{R_2 + \frac{1}{G_3 + \frac{1}{\vdots + \frac{1}{R_{2n-2} + \frac{1}{G_{2n-1} + \frac{1}{R_{2n}}}}}}}$$

1.8.4. Qarshiliklar uchburchagini qarshiliklar yulduziga va aksincha ekvivalent o'zgartirish

Uchburchakni ekvivalent yulduzga o'zgartirish zanjirning uchburchak sxemasi bo'yicha ulangan qismini yulduz sxemada ulangan qism bilan almashtirish bo'lib, bu holda zanjirning qolgan qismlarida tok va kuchlanish o'zgarmay qoladi. 1.30-rasmda passiv ideal ikki qutbliklarning uchburchak va yulduz ulangan sxemalari keltirilgan. Bu ikkita elektr zanjiri bo'laklarining o'zaro ekvivalentlik shartlarini aniqlaymiz. Ta'rifga asosan, agar sxemalarni almashtirganda tugunlardagi I_1, I_2, I_3 toklar va shu tugunlararo U_{12}, U_{23}, U_{31} kuchlanishlar o'zgarmay qolsa, u holda bu zanjirning bo'laklari o'zaro ekvivalent bo'ladi. Uchta kuchlanishlardan faqat ikkitasi o'zaro bog'liq bo'lgani uchun uchinchisini kuchlanishlarning muvozanat tenglamasiga ko'ra aniqlash mumkin.

Uchburchak sxema qarshiliklarini yulduz sxema qarshiliklariga ekvivalentlash uchun birinchi zanjir qismalari orasidagi uchta kuchlanishdan har qanday ikkitasi ikkinchi zanjir mos qismalari orasidagi kuchlanishga teng deb olinadi (bu holda tashqi qismlarga keluvchi toklar qiymati bir xil qoladi). Uchburchak tomonlari R_{12}, R_{23}, R_{31} qarshiliklaridagi toklarni tugunga keluvchi I_1, I_2, I_3 toklar orqali aniqlaymiz. Kirxgof qonunlariga asosan zanjirga tegishli quyidagi elektr muvozanat tenglamalari sistemasini tuzamiz:



1.30-rasm.

$$I_1 + I_{31} - I_{12} = 0, I_2 + I_{12} - I_{23} = 0, R_{12}I_{12} + R_{23}I_{23} + R_{31}I_{31} = 0.$$

Bu tenglamalarni I_{12} , I_{23} , I_{31} toklarga nisbatan yechamiz:

$$\begin{aligned} I_{12} &= (R_{31}I_1 - R_{23}I_2) / (R_{12} + R_{23} + R_{31}), \\ I_{23} &= (R_{12}I_2 - R_{31}I_3) / (R_{12} + R_{23} + R_{31}), \\ I_{31} &= (R_{23}I_3 - R_{12}I_1) / (R_{12} + R_{23} + R_{31}). \end{aligned} \quad (1.5)$$

(1.5) tenglamalardan foydalanib, uchburchak sxema kuchlanishlarini topamiz:

$$\begin{aligned} U_{12} &= R_{12}I_{12} = R_{12}(R_{31}I_1 - R_{23}I_2) / (R_{12} + R_{23} + R_{31}), \\ U_{23} &= R_{23}I_{23} = R_{23}(R_{12}I_2 - R_{31}I_3) / (R_{12} + R_{23} + R_{31}) \end{aligned}$$

Yulduz sxemasiga (1.30, b-rasm) tegishli kuchlanishlar $U_{12} = R_1I_1 - R_2I_2$, $U_{23} = R_2I_2 - R_3I_3$ bo'ladi.

Endi U_{12} va U_{23} kuchlanishlarni o'zaro tenglashtirib, tashqi o'tkazgich simlar orasidagi munosabatlarni aniqlaymiz.

$$\begin{aligned} \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} I_1 - \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} I_2 &= R_1 I_1 - R_2 I_2, \\ \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} I_2 - \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} I_3 &= R_2 I_2 - R_3 I_3. \end{aligned} \quad (1.6)$$

(1.6) tenglamalar tashqi o'tkazgich simlardagi har qanday toklarda bajarilishi shart. Bu tenglamalarda avval $I_2=0$, keyin esa $I_3=0$ deb olib, qarshiliklar orasidagi bog'lanish formulasini topamiz. Bu holda zanjirning bo'laklari o'zaro ekvivalent bo'ladi:

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad R_2 = \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (1.7)$$

Berilgan R_{12} , R_{23} , R_{31} qarshiliklar bo'yicha yulduz sxema uchun R_1 , R_2 , R_3 qarshiliklarni hisoblaymiz. Buning uchun qarshiliklar uchburchagini unga ekvivalent qarshiliklar yulduziga o'zgartiramiz. 1.30-rasmdan ko'rinib turibdiki, bunday o'zgartirishda zanjirdagi R_{12} , R_{23} , R_{31} qarshiliklardan iborat kontur o'rniga yangi yulduz sxema qarshiliklari R_1 , R_2 , R_3 lar birlashtirilgan tugun paydo bo'ladi.

(1.7) tenglamalar sistemasini R_{12} , R_{23} , R_{31} qarshiliklariga nisbatan yechib, yulduz sxema qarshiliklarini ekvivalent uchburchak sxema qarshiliklari orqali ifodalarni aniqlaymiz:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}, \quad R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1}, \quad R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 R_1}{R_2}. \quad (1.8)$$

Yulduzni uchburchakka o'zgartirish sxemasida tugunlar soni kamayadi, ammo zanjirda yangi R_{12} , R_{23} , R_{31} qarshiliklardan tuzilgan kontur paydo bo'ladi. (1.8) tenglamalardagi qarshiliklarni o'tkazuvchanliklar bilan almastiramiz. O'zgartirishlarni bajarib, uchburchak tomonlarini belgilovchi elementlar o'tkazuvchanliklarini aniqlaymiz:

$$G_{12} = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2 + G_3}, \quad G_{23} = \frac{G_2 G_3}{G_1 + G_2 + G_3}, \quad G_{31} = \frac{G_3 G_1}{G_1 + G_2 + G_3}. \quad (1.9)$$

O'tkazuvchanliklarni aniqlash formulalari (1.9) yulduz sxema qarshiliklarini aniqlash formulalarining (1.7) strukturasi bilan bir xildir. Xuddi shunday yulduz sxema nurlarining o'tkazuvchanliklari (G_1 , G_2 , G_3) ni aniqlash struktura jihatidan (1.8) tenglamalarga o'xshaydi. (1.9) tenglamalarga asoslanib n nurli yulduzni n tomonli ko'pburchakka o'zgartirish tenglamasini yozamiz:

$$G_{kl} = G_k G_l / G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

G_{kl} — n tomonli ko'pburchak bir tomonining o'tkazuvchanligi, ya'ni k va l tugunlarni birlashtiruvchi tomonning o'tkazuvchanligi, G_1, G_2, \dots, G_n — yulduz nurlarini tashkil etuvchi elementlarning o'tkazuvchanligi.

n tomonli ko'pburchakni n nurli yulduzga aylantirish umumiy holda mumkin emas.

Yuqorida keltirilgan o'zgartirishlar ko'p hollarda zanjir tahlilini ancha soddalashtiradi, xususiyl hollarda esa bu o'zgartirishlar murakkab zanjir bo'laklarini soddalashtirishga olib keladi.

1.8.5. EYK va tok manbaiga ega bo'lgan parallel shoxobchalarni ekvivalent o'zgartirish

Murakkab elektr zanjirlarini hisoblashda EYK, tok manbai va qarshiliklari bo'lgan bir nechta parallel ulangan shoxobchalarni bitta ekvivalent shoxobcha bilan almashtirish jiddiy yengilliklarga olib keladi. Agar tok I ning har qanday qiymatida a, b qisimalardagi kuchlanish U_{ab} ikkala sxemada bir xilda qolsa, u holda 1.31-rasm, b da keltirilgan zanjir 1.31-rasm a da tasvirlangan zanjirga ekvivalent bo'ladi. R_{ekv} va E_{ekv} qanday qiymatlarga teng bo'lishini bilish uchun ikkala sxema uchun tenglamalar tuzamiz:

$$\begin{aligned}
 I_1 + I_2 + I_3 + J_r + J_s &= I_{ekv}, \\
 I_1 &= (E_1 - U_{ab})/R_1 = (E_1 - U_{ab})G_1, \\
 I_2 &= (E_2 - U_{ab})/R_2 = (E_2 - U_{ab})G_2 \\
 &\dots\dots\dots \\
 I_n &= (E_n - U_{ab})G_n.
 \end{aligned}$$

Demak,

$$I = \sum_{k=1}^m I_k = \sum_{k=1}^n G_k \cdot U_{ab} + \sum_{k=1}^q I_k - U_{ab} \sum_{k=1}^n G_k, \quad (1.10)$$

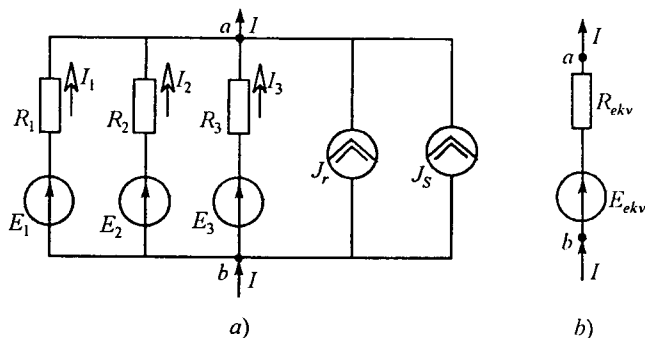
bu yerda m -zanjirdagi parallel shoxobchalarning umumiy soni, n — EYK manbali shoxobchalar soni, q —tok manbai ulangan shoxobchalar soni.

1.31-rasm, b uchun quyidagi tenglamalarni yozamiz:

$$I = E_{ekv} G_{ekv} - U_{ab} G_{ekv}. \quad (1.11)$$

1.31-rasm, a va b lardagi toklarning tengligi I tok va U_{ab} kuchlanishning har qanday qiymatlarida bajarilishi kerak, bu faqat (1.10) tenglamadagi U_{ab} ning koeffitsiyenti (1.11) tenglamadagi U_{ab} ning koeffitsiyentiga teng bo'lsa bajariladi, ya'ni,

$$G_{ekv} = \sum_{k=1}^n G_k. \quad (1.12)$$



1.31-rasm.

Agar (1.10) va (1.11) tenglamalardagi U_{ab} ga tegishli hadlar va toklar mos ravishda o'zaro teng bo'lsa, unda ekvivalentlik shartidan:

$$\sum_{k=1}^n G_k E_k + \sum_{k=1}^q J_{TM} = G_{ekv} E_{ekv} \quad (1.13)$$

(1.13) ifodadan E_{ekv} hisoblanadi:

$$E_{ekv} = \frac{\sum_{k=1}^n G_k E_k + \sum_{k=1}^q J_{TM}}{\sum_{k=1}^n G_k} \quad (1.14)$$

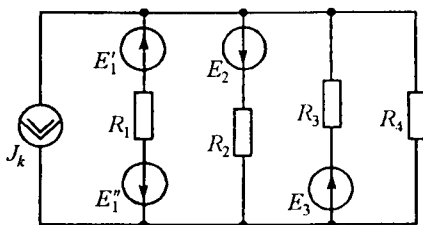
(1.12) formula orqali ekvivalent o'tkazuvchanlik G_{ekv} ni aniqlash va u orqali R_{ekv} ni (1.31-rasm, b) hisoblash mumkin.

(1.14) formuladan quyidagilar kelib chiqadi: agar qaysi bir shoxobchada EYK bo'lmasa, u holda bu shoxobchanning o'tkazuvchanligi (1.14) formulaning maxrajida bo'ladi, agar biror shoxobchada EYK manbaining yo'nalishi 1.31-rasm, a da ko'rsatilgandan teskari bo'lsa, u holda shu EYK ga tegishli had (1.14) formula suratiga manfiy ishora bilan kiradi.

1.31-rasm, a va b dagi shaxobchalar o'zaro ekvivalentdir.

Masala. 1.32-rasmda keltirilgan zanjirni ekvivalent shoxobcha bilan almashtiring.

Berilgan: $E_1 = 12 \text{ V}$; $E_1' = 24 \text{ V}$;
 $E_2 = 36 \text{ V}$; $E_3 = 48 \text{ V}$; $R_1 = 2 \Omega$;
 $R_2 = 4 \Omega$; $R_3 = 10 \Omega$; $R_4 = 5 \Omega$; $J_k = 6 \text{ A}$.



1.32-rasm.

Yechish. 1. O‘tkazuvchanliklarni aniqlaymiz:

$$G_1=0,5 \text{ Sm}; G_2=0,25 \text{ Sm}; G_3=0,1 \text{ Sm}; G_4=0,2 \text{ Sm}.$$

2. Ekvivalent rezistor qarshiligi:

$$R_{ekv} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n G_k} = \frac{1}{0,5 + 0,25 + 0,1 + 0,2} = 0,95 \Omega.$$

3. Ekvivalent EYK esa:

$$E_{ekv} = \frac{\sum_{k=1}^n G_k E_k - J_{TM}}{\sum G_k} = \frac{(12-24) \cdot 0,5 - 36 \cdot 0,25 + 48 \cdot 1 - 6}{1,05} = \frac{27}{1,05} = 25,7 \text{ V}.$$

Javob: $R_{ekv} = 0,95 \Omega; E_{ekv} = 25,7 \text{ V}.$

1.9. PROPORSIONAL KATTALIKLAR USULI

Proporsional kattaliklar usulini bitta manbadan ta’minlanayotgan va qarshiliklari o‘zaro aralash ulangan zanjirni hisoblashda qo‘llash maqsadga muvofiq.

Hisoblash ketma-ketligi quyidagicha:

1) manbadan eng uzoqda joylashgan shoxobchadagi tokka ixtiyoriy, masalan 1 A qiymat beramiz;

2) tanlangan shoxobchadagi tok qiymatidan foydalanib qolgan barcha shoxobchalardagi tok va kuchlanishlarni hisoblab topamiz;

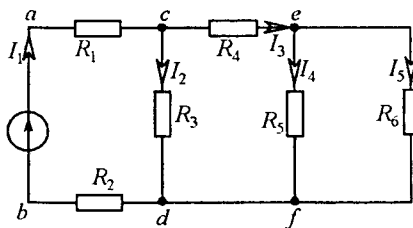
3) qayta hisoblash koeffitsiyentini topamiz. U manba EYK ini uning qismalaridagi hisoblab topilgan kuchlanishga nisbatiga teng;

4) barcha shoxobchalardagi hisoblab topilgan toklar va kuchlanishlarni qayta hisoblash koeffitsiyentiga ko‘paytirib, tok va kuchlanishlarning

haqiqiy qiymatlarini topamiz.

Masala. 1.33-rasmda keltirilgan zanjir shoxobchalaridagi toklar proporsional kattaliklar usuli yordamida topilsin. $R_1=R_2=3 \Omega; R_3=26 \Omega; R_4=6 \Omega; R_5=4 \Omega; R_6=8 \Omega; E=200 \text{ V}.$

Yechish. $I'_5=1 \text{ A}$ deb qabul qilamiz. Shunga ko‘ra boshqa shoxob-



1.33-rasm.

chalaridagi toklar va kuchlanishlarni hisoblaymiz.

$$U_{cd} = R_6 I_5 = 1 \cdot 8 = 8 \text{ V}, I_4 = U_{cd} / R_5 = 8 / 4 = 2 \text{ A}, I_3 = I_5 + I_4 = 1 + 2 = 3 \text{ A},$$

$$U_{cd} = U_{cd} + R_4 I_3 = 8 + 3 \cdot 6 = 26 \text{ V}, I_2 = U_{cd} / R_3 = 26 / 26 = 1 \text{ A},$$

$$I_1 = I_2 + I_3 = 1 + 3 = 4 \text{ A}, U_{ab} = U_{cd} + I_1 (R_1 + R_2) = 26 + 4(3 + 3) = 50 \text{ V}.$$

Qayta hisoblash koeffitsiyenti:

$$k = E / U_{ab} = 200 / 50 = 4.$$

Demak, haqiqiy toklarning qiymatlari:

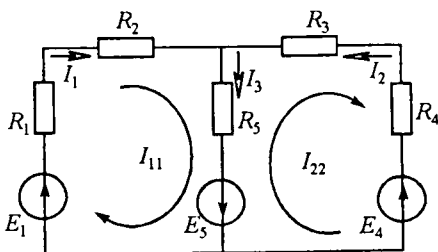
$$I_1 = k I_1 = 4 \cdot 1 = 4 \text{ A}, I_2 = 4 \cdot 1 = 4 \text{ A}, I_3 = 4 \cdot 3 = 12 \text{ A},$$

$$I_4 = 4 \cdot 2 = 8 \text{ A}, I_5 = 4 \cdot 1 = 4 \text{ A}.$$

1.10. KONTUR TOKLAR USULI

Bu usulda o'zaro bog'liq bo'lmagan (mustaqil) konturdan yagona kontur toki o'tadi deb faraz qilinadi va shoxobchalar toki shu kontur toklari orqali aniqlanadi. Kontur toklar usuli Kirxgofning 2-qonuniga asoslanadi. Tenglamalar shu kontur toklariga nisbatan tuziladi. Tenglamalar sistemasi yechilib, noma'lum kontur toklar, ular orqali esa shoxobchalardagi haqiqiy toklar aniqlanadi. Shunday qilib, kontur toklar usuli asosida tuzilgan tenglamalarda noma'lumlar soni o'zaro bog'liq bo'lmagan konturlar soniga teng va zanjir bu usulda hisoblanganda Kirxgof tenglamalari usuliga nisbatan tenglamalar soni va ularni yechishga sarf bo'ladigan vaqt kam bo'ladi. Kontur toklar usuli ko'pincha murakkab zanjirdagi mustaqil konturlar soni tugunlar sonidan kam bo'lganda qo'llaniladi.

1.34-rasmda keltirilgan sxema uchun tenglamalarni tuzamiz. Bu sxemada ikkita bog'liq bo'lmagan kontur mavjud. Bu konturlardan o'tadigan kontur toklar orqali shoxobchalardagi toklarni aniqlash mumkin.



1.34-rasm.

Faraz qilaylik, sxemaning chap konturida soat mili harakati yoʻnalishida I_{11} , oʻngdagi konturda esa shu yoʻnalishda I_{22} kontur toklari oʻtmoqda. Har bir kontur uchun Kirxgofning 2-qonuniga asoslanib tenglamalar tuzamiz. Bunda R_5 qarshilikli shoxobchadan ikkala kontur toklarning ayirmasi (yoki yigʻindisi) oʻtishi mumkin. Bunday shoxobcha yondosh shoxobcha deyiladi.

Yondosh shoxobchalardagi haqiqiy toklarni aniqlash uchun kontur toklar yoʻnalishi albatta eʼtiborga olinishi kerak. Konturlarni aylanib chiqish yoʻnalishini ham soat mili boʻyicha olamiz. 1-kontur uchun:

$$\begin{aligned} \text{yoki} \quad & (R_1 + R_2)I_{11} + R_5(I_{11} - I_{22}) = E_1 + E_5, \\ & (R_1 + R_2 + R_5)I_{11} - R_5I_{22} = E_1 + E_5. \end{aligned} \quad (1.15)$$

2-kontur uchun:

$$\begin{aligned} \text{yoki} \quad & R_5(I_{22} - I_{11}) + (R_3 + R_4)I_{22} = -E_4 - E_5, \\ & -R_5I_{11} + (R_3 + R_4 + R_5)I_{22} = -E_4 - E_5. \end{aligned} \quad (1.16)$$

(1.15) tenglamada I_{11} oldidagi koeffitsiyent birinchi konturga tegishli xususiy qarshiliklar yigʻindisidir, uni R_{11} bilan belgilaymiz, I_{22} oldidagi koeffitsiyent esa konturlar orasidagi oʻzaro qarshilik, uni R_{12} bilan belgilaymiz. (1.16) tenglamada esa I_{11} oldidagi koeffitsiyentni R_{21} , I_{22} oldidagi koeffitsiyentni esa R_{22} bilan belgilaymiz. R_{11} , R_{22} — tegishli konturlarning xususiy qarshiliklari, $R_{12} = R_{21}$ esa — konturlararo oʻzaro qarshiliklar deyiladi. (1.15) va (1.16) tenglamalar oʻng tomonini mos ravishda E_{11} va E_{22} bilan belgilaymiz, bunda E_{11} , E_{22} — mos ravishda birinchi va ikkinchi konturdagi EYK larning algebraik yigʻindisi. Bunda EYK yoʻnalishi konturni aylanib chiqish yoʻnalishi bilan bir xil boʻlsa, *musbat* ishora bilan, aks holda esa *manfiy* ishora bilan olinadi. Bu holda yuqoridagi tenglamalarni quyidagi shaklda yozish mumkin:

$$\begin{aligned} & R_{11}I_{11} + R_{12}I_{22} = E_{11}, \quad R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} = E_{22}, \\ \text{bu yerda} \quad & R_{11} = R_1 + R_2 + R_5, \quad R_{22} = R_3 + R_4 + R_5, \quad R_{12} = R_{21} = -R_5, \\ & E_{11} = E_1 + E_5, \quad E_{22} = -E_4 - E_5. \end{aligned}$$

Agar sxemada mustaqil konturlar soni ikkitadan koʻp, masalan uchta boʻlsa, u holda tenglamalar sistemasi quyidagi shaklda yoziladi:

$$R_{11}I_{11} + R_{12}I_{22} + R_{13}I_{33} = E_{11},$$

$$R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} + R_{23}I_{33} = E_{22},$$

$$R_{31}I_{11} + R_{32}I_{22} + R_{33}I_{33} = E_{33},$$

yoki matritsa ko‘rinishida $[R][I]=[E]$, bunda

$$[R] = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix}; \quad [I] = \begin{vmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{vmatrix}; \quad [E] = \begin{vmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \end{vmatrix}$$

Har xil belgili qarshiliklar ishoralari bir xil bo‘lishi uchun kontur toklarning yo‘nalishi bir xil yo‘nalishda: faqat soat mili harakati yoki unga teskari yo‘nalishda qabul qilinishi lozim. Tenglamalar sistemasi yechimida qaysi bir kontur toki manfiy ishorali chiqsa, shu kontur tokining haqiqiy yo‘nalishi dastlab qabul qilinganiga teskari bo‘ladi. Konturlararo qarshilikdan ikkita yondosh kontur toklari o‘tadi.

Shoxobchadagi tok qiymati shu shoxobchadan o‘tadigan kontur toklar bilan aniqlanadi. Masalan, R_5 shoxobchasidan $I_{11} - I_{22}$ ayirma toki o‘tadi, bu ayirma tok shoxobchadagi haqiqiy tokdir. Agar elektr zanjirida n o‘zaro bog‘liq bo‘lmagan konturlar bo‘lsa, unda n ta mustaqil tenglamalar sistemasi tuziladi. Bunda n ta tenglamalar sistemasining umumiy yechimi quyidagicha bo‘ladi:

$$I_{kk} = \frac{\Delta_{k1}}{\Delta} E_{11} + \frac{\Delta_{k2}}{\Delta} E_{22} + \frac{\Delta_{k3}}{\Delta} E_{33} + \dots + \frac{\Delta_{kn}}{\Delta} E_{nn}.$$

bu tenglamada

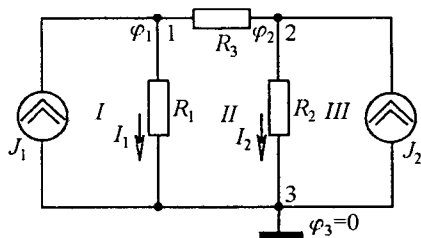
$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{vmatrix} \text{ — sistemaning bosh determinanti,}$$

Δ_{km} — algebraik to‘ldiruvchi bo‘lib, uni hisoblashda Δ determinantdan k -ustun va m -qatorni o‘chirib, $(-1)^{k+m}$ ga ko‘paytirib olinadi.

Agar bosh aniqlovchining chap burchagi yuqorisidan o‘ng burchagi pastiga diagonal o‘tkazsak, u determinantni ikki qismga bo‘ladi. Bu determinantning bosh diagonalga nisbatan *simmetriklilik xususiyatidir*. Shu simmetriyaga asoslanib, $\Delta_{km} = \Delta_{mk}$ tenglikni yozish mumkin.

1.11. TUGUN POTENSIALLAR USULI

Bu usulga ko'ra Kirxgofning 1-qonuniga asoslanib elektr zanjir tugunlaridagi potentsiallar zanjirning *tayanch* tuguniga nisbatan aniqlanadi. Bunda *tayanch tugun potentsiali nolga teng* deb qabul qilinadi. Ma'lumki, har qanday shaxobchadagi kuchlanish shu shaxobcha ulangan tugunlar potentsiallarining ayirmasiga teng bo'lib, bu kuchlanishning shu shaxobcha o'tkazuvchanligiga ko'paytmasi esa shaxobcha tokiga teng bo'ladi. Shunday qilib, tugun potentsiallarini aniqlab har bir shaxobchadagi tok qiymatini topishimiz mumkin.



1.35-rasm.

Ushbu usul noma'lum toklarni topishda tugun potentsiallarini aniqlashga asoslanganligi uchun *tugun potentsiallar usuli* deb ataladi. 1.35-rasmda keltirilgan elektr sxemada ikkita J_1 va J_2 tok manbai, 3 ta — 1, 2, 3 tugun va 3 ta — I, II, III konturlar mavjud. Bu sxemada 3-tugunni

tayanch tugun deb qabul qilamiz va uni shartli ravishda yerga ulaymiz.

Demak, $\varphi_3 = 0$. Tegishli shoxobchalar o'tkazuvchanliklari:

$$G_1 = 1/R_1; \quad G_2 = 1/R_2; \quad G_3 = 1/R_3.$$

Ushbu berilgan zanjirning 3 ta tugun uchun Kirxgofning 1-qonuniga asosan $T - 1 = 3 - 1 = 2$ ta tenglama tuzish lozim.

1-tugun uchun:

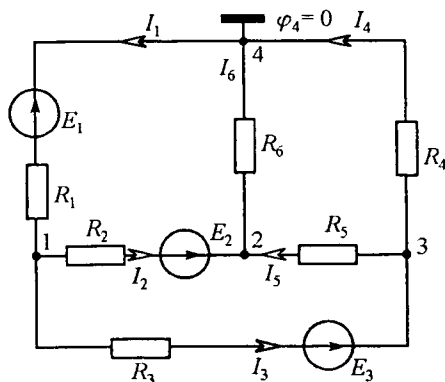
$$I_{1T} = (\varphi_1 - \varphi_3)G_1 + (\varphi_1 - \varphi_2)G_3 = (G_1 + G_3)\varphi_1 - G_3\varphi_2,$$

2-tugun uchun:

$$I_{2T} = (\varphi_2 - \varphi_3)G_2 + (\varphi_2 - \varphi_1)G_3 = -G_3\varphi_1 + (G_2 + G_3)\varphi_2,$$

bunda $G_{11} = G_1 + G_3$, $G_{22} = G_2 + G_3$ — mos ravishda 1- va 2-tugunlarning xususiy o'tkazuvchanliklari, $G_{12} = G_{21} = G_3$ — 1 va 2-tugunlar orasidagi o'zaro o'tkazuvchanlik. I_{1T} , I_{2T} — mos ravishda 1- va 2-tugunlarning tugun toklari.

Umumiy holda, agar elektr sxema q ta tugunga ega bo'lsa, Kirxgofning 1-qonuniga asosan o'zaro bog'liq bo'lmagan $T = q - 1$ ta tenglama tuzish mumkin, bunda q ta tugundan ixtiyoriy bittasi tayanch tugun deb qabul qilinadi, ya'ni:



1.36-rasm.

Zanjirni tugun potentsiallar usuli yordamida hisoblash tartibi quyidagicha:

1) shoxobchalardagi toklarga ixtiyoriy yo'nalish beriladi;

2) istalgan bitta tugunning potentsiali nolga teng deb qabul qilinadi;

3) zanjirning qolgan tugunlari potentsiallari uchun tenglamalar sistemasi tuziladi;

4) tenglamalar sistemasini yechib

tugunlar potentsiallari topiladi;

5) Om qonuni yordamida shoxobchalardagi noma'lum toklar topiladi.

Masala. 1.36-rasmda keltirilgan zanjir shoxobchalaridagi toklar tugun potentsiallar usuli yordamida topilsin:

$$E_1 = 6 \text{ V}, E_2 = 12 \text{ V}, E_3 = 18 \text{ V}, R_1 = R_2 = R_3 = 2 \Omega, R_4 = R_5 = R_6 = 2 \Omega.$$

Yechish. Shoxobchalardagi toklar yo'nalishini ixtiyoriy tanlab olamiz va 4-tugun potentsialini nolga tenglaymiz. Keyin boshqa tugunlar potentsiallari uchun quyidagi tenglamalar sistemasini tuzamiz:

$$\varphi_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - \varphi_2 \frac{1}{R_2} - \varphi_3 \frac{1}{R_3} = -E_1 \frac{1}{R_1} - E_2 \frac{1}{R_2} - E_3 \frac{1}{R_3},$$

$$-\varphi_1 \left(\frac{1}{R_2} \right) + \varphi_2 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right) - \varphi_3 \frac{1}{R_5} = E_2 \frac{1}{R_2},$$

$$-\varphi_1 \frac{1}{R_3} - \varphi_2 \frac{1}{R_5} + \varphi_3 \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) = E_3 \frac{1}{R_3}.$$

Hosil bo'lgan sistemani shoxobchalarning qarshiligi va ulardagi EYK qiymatlarini hisobga olgan holda yechib, tugunlar potentsiallarini topamiz:

$$\varphi_1 = -9 \text{ V}; \varphi_2 = 3 \text{ V}; \varphi_3 = 6 \text{ V}.$$

Shoxobchalardagi toklarni Om qonuni asosida aniqlaymiz:

$$I_1 = (\varphi_4 - \varphi_1 - E_1) \frac{1}{R_1} = (-\varphi_1 - E_1) \frac{1}{R_1} = (9 - 6) \cdot \frac{1}{2} = 1,5 \text{ A},$$

$$I_2 = (\varphi_1 - \varphi_2 + E_2) \frac{1}{R_2} = (-9 - 3 + 12) \cdot \frac{1}{2} = 0,$$

$$I_3 = (\varphi_1 - \varphi_3 + E_3) \frac{1}{R_3} = (-9 - 6 + 18) \cdot \frac{1}{2} = 1,5 \text{ A},$$

$$I_4 = (\varphi_3 - \varphi_4) \frac{1}{R_4} = (6 - 0) \frac{1}{6} = 1 \text{ A},$$

$$I_5 = (\varphi_3 - \varphi_2) \frac{1}{R_5} = (6 - 3) \frac{1}{6} = 0,5 \text{ A},$$

$$I_6 = (\varphi_2 - \varphi_4) \frac{1}{R_6} = (3 - 0) \frac{1}{6} = 0,5 \text{ A}.$$

1.12. IKKI TUGUN USULI

Ba'zi hollarda zanjirda faqat ikkita tugun bo'lib, konturlar soni ko'p bo'ladi (1.37-rasm). Bunday zanjirlarni hisoblash uchun eng qulay bo'lgan usul-tugun potentsiallar usulining xususiy holi — ikki tugun usulidan foydalaniladi. Bunda tenglamalar soni $T-1=2-1=1$ tani tashkil etadi.

« b » nuqtani tayanch tugun deb olib, uni shartli yerga ulaymiz. Bunda faqat « a » nuqtaning potensialini aniqlasak, masalani yechish uchun yetarli bo'ladi. Buning uchun parallel ulangan shoxobchalarni bitta ekvivalent manba bilan almashtiramiz. Berilgan sxema uchun a va b tugunlar orasidagi kuchlanish:

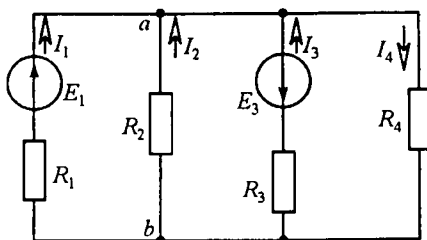
$$U_{ab} = \frac{JE_k G_k + \sum I_k}{JG_n}.$$

U_{ab} kuchlanishni hisoblaganimizdan keyin har bir shoxobchadagi tokni Om qonuniga binoan topamiz:

$$I_n = G_n(E - U_{ab}),$$

bunda n -parallel shoxobchalar soni.

Masala. 1.37-rasmda berilgan elektr zanjiridagi toklarni ikki tugun usuli yordamida aniqlang va quvvatlar balansini tekshiring. $E_1=110 \text{ V}$, $E_2=48 \text{ V}$, $R_1=2 \Omega$, $R_2=4 \Omega$, $R_3=2 \Omega$, $R_4=10 \Omega$.



1.37-rasm.

Yechish.

$$U_{0b} = \frac{G_1 E_1 - G_3 E_3}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4} = \frac{0,5 \cdot 110 - 0,5 \cdot 48}{0,5 + 0,25 + 0,5 + 0,1} = \frac{31}{1,35} = 22,96 \text{ V},$$

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1} = \frac{110 - 22,96}{2} = \frac{87,04}{2} = 43,52 \text{ A},$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U_{ab}}{R_2} = \frac{0 - 22,96}{4} = -5,74 \text{ A},$$

$$I_3 = \frac{-E_3 - U_{ab}}{R_3} = \frac{-48 - 22,96}{2} = \frac{-70,96}{2} = -35,48 \text{ A},$$

$$I_4 = \frac{E_4 + U_{ab}}{R_4} = \frac{0 + 22,96}{10} = 2,3 \text{ A}.$$

Quvvatlar balansini tekshirish uchun iste'molchi va manba quvvatlarini hisoblaymiz:

$$P_{ist} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 = 2 \cdot (43,52)^2 + 4 \cdot (-5,74)^2 + 2 \cdot (-35,48)^2 + 10 \cdot (-2,29)^2 = 6489,87 \approx 6490 \text{ W},$$

$$P_M = E_1 I_1 - E_3 I_3 = 110 \cdot 43,52 - 48(-35,48) = 6490,2 \text{ W}.$$

Demak, $P_{manba} \approx P_{ist}$.

1.13. USTMA-USTLASH PRINSIPI VA UNI ELEKTR ZANJIRLARINI HISOBLASHDA QO'LLASH

Ustma-ustlash teoremasi. Chiziqli elektr zanjirlarida o'zaro bog'liq bo'lmagan bir nechta manbalarning umumiy ta'siri alohida olingan har bir manba ta'siri natijalarining algebraik yig'indisiga teng.

Ma'lumki, kontur toklar usuliga binoan elektr zanjirida EYK manbai ta'sirida shoxobchalardan o'tuvchi kontur toklar kontur EYK larining chiziqli funksiyasidir. Matematik ko'rinishda bu quyidagi tenglik bilan ifodalanadi:

$$I_k = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^n \Delta_{ik} E_{ji} \quad (1.17)$$

(1.17) tenglamaning fizik ma'nosi shundan iboratki, murakkab chiziqli elektr zanjirining har bir shoxobchasidagi tok alohida olingan har bir EYK manbaining ta'siridan hosil bo'lgan toklarning algebraik yig'indisiga teng.

Bu prinsip *superpozitsiya* (ustma-ustlash) prinsipi deyiladi. Ushbu prinsipga asosan kontur yoki shoxobchadagi toklarni aniqlash usuli *ustma-ustlash usuli* deb ataladi.

Murakkab elektr zanjirini ustma-ustlash usulida hisoblash quyidagi ketma-ketlikda bajariladi:

a) har bir EYK manbai ta'siridan shoxobchalarda hosil bo'lgan xususiy toklar aniqlanadi, bunda fikran sxemada yagona EYK manbai qoldirilib, boshqa EYK lar olib tashlanadi va ularning ichki qarshiliklari zanjirga EYK lar o'rniga ulangan deb qabul qilinadi;

b) shoxobchalardagi haqiqiy toklar esa alohida hisoblangan xususiy toklarning algebraik yig'indisiga teng bo'ladi.

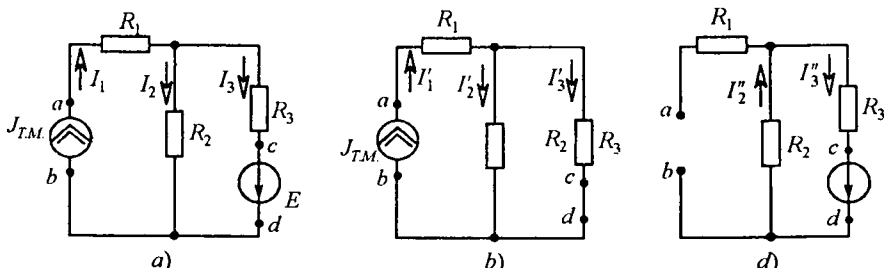
Agar chiziqli zanjirda tok manbalari ulangan bo'lsa, tugunlardagi potentsiallar yoki shoxobchalardagi kuchlanishlar har bir tok manbai toklarining chiziqli funksiyasi bo'ladi. Ular matematik ko'rinishda quyidagi formula bilan ifodalandi:

$$\varphi_k(U_k) = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^{q-1} I_i \Delta_{ik}. \quad (1.18)$$

(1.18) formulaning fizik ma'nosi: chiziqli elektr zanjirda har bir tugunning potentsiali shu tugunda alohida har bir tok manbaining ta'siridan hosil bo'lgan potentsiallarning algebraik yig'indisiga tengdir. Ustma-ustlash usuliga binoan har bir tugun potentsialini aniqlashda fikran bitta tok manbai qoldirilib, qolganlari sxemadan chiqariladi, ularning o'rniga esa tok manbalarining ichki o'tkazuvchanliklari ulangan deb qaraladi (ideal tok manbaida $G_{ich} = 0$ bo'lganligi sababli shoxobcha uzuq qoldiriladi).

Agar murakkab zanjirga bir vaqtda EYK va tok manbalari ulangan bo'lsa, bunda ham ustma-ustlash usulini qo'llash mumkin.

Masala. 1.38-rasmdagi sxema uchun ustma-ustlash usuli yordamida shoxobchalardagi toklarni aniqlang va quvvatlar balansini tekshiring.



1.38-rasm.

Berilgan: $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 4 \Omega$, $R_3 = 6 \Omega$, $I_{TM} = 5 \text{ A}$, $E = 24 \text{ V}$.

Yechish. a) shoxobchalardagi toklar yo'nalishini ixtiyoriy belgilaymiz, EYK manbaini sxemadan chiqarib tashlab, c va d nuqtalarni birlashtiramiz. EYK manbaining ichki qarshiligi $r_{ich} = 0$ (1.38-rasm, b). Shu sxema uchun shoxobchalarda tok manbai ta'siridan hosil bo'lgan xususiy toklarni aniqlaymiz:

$$I_1' = J_{TM} = 5 \text{ A}, \quad I_2' = I_1' \frac{R_2 R_3}{(R_2 + R_3) R_2} = 3 \text{ A}, \quad I_3' = I_1' \frac{R_2 R_3}{(R_2 + R_3) R_3} = 2 \text{ A}.$$

Endi EYK manbai ta'siridan zanjir shoxobchalaridagi xususiy toklarni aniqlaymiz. Bunda tok manbai sxemadan olib tashlangan hamda a va b nuqtalar orasi uzilgan, chunki tok manbaining ichki o'tkazuvchanligi $G_{ich} = 0$ ga teng (1.38-rasm, d). Demak, 1.38-rasm, d uchun:

$$I_1'' = 0; \quad I_2'' = I_3'' = E / (R_2 + R_3) = \frac{24}{10} = 2,4 \text{ A}.$$

b) ustma-ustlash prinsipidan foydalanib har bir shoxobchadagi haqiqiy toklarni aniqlaymiz:

$$I_1 = I_1' + I_1'' = 5 + 0 = 5 \text{ A}, \quad I_2 = I_2' - I_2'' = 3 - 2,4 = 0,6 \text{ A},$$

$$I_3 = I_3' + I_3'' = 2 + 2,4 = 4,4 \text{ A}.$$

a nuqtaning potentsiali:

$$\varphi_a = \varphi_b + R_2 I_2 + R_1 I_1, \quad U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = R_2 I_2 + R_1 I_1 = 4 \cdot 0,6 + 2 \cdot 5 = 12,4 \text{ V}.$$

Tok manbai quvvati:

$$P_{ab} = U_{ab} J_{TM} = 12,4 \cdot 5 = 62,0 \text{ W}.$$

EYK manbai quvvati esa

$$EI_3 = 20 \cdot 4,4 = 88 \text{ W}.$$

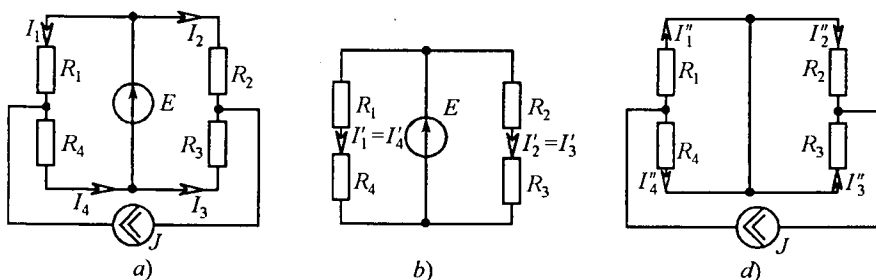
Quvvatlar balansi:

$$P_{ist} = P_{manba} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 = U_{ab} J_{TM} + EI_3.$$

yoki

$$P_{ist} = 2 \cdot 25 + 4 \cdot 0,36 + 6 \cdot 19,36 = 50 + 1,44 + 116,16 = 167,6 \text{ W},$$

$$P_{manba} = U_{ab} J_{TM} + EI_3 = 12,4 \cdot 5 + 24,4 \cdot 4,4 = 62 + 105,6 = 167,6 \text{ W}.$$



1.39-rasm.

Masala. 1.39-rasmda keltirilgan zanjir shoxobchalaridagi toklar ustma-ustlash usulida aniqlansin. $E=5\text{ V}$, $J=1\text{ A}$, $R_1=R_2=2\ \Omega$, $R_3=R_4=3\ \Omega$.

Yechish. Toklarni aniqlash uchun ikkita alohida zanjir toklarini hisoblash kerak (1.39-b va d rasmlar).

$$I'_1=I'_4=E/(R_1+R_4)=5/(2+3)=1\text{ A},$$

$$I'_2=I'_3=E/(R_2+R_3)=5/(2+3)=1\text{ A}.$$

EYK manbai tufayli R_1 va R_4 , R_2 va R_3 qarshiliklar parallel ulangan, shu sababli J tok manбайдan shoxobchalarda hosil bo'lgan qisman toklar R_1 va R_4 yoki R_2 va R_3 lar orqali hisoblanadi:

$$I''_1=J\frac{R_4}{R_1+R_4}=1\cdot\frac{3}{3+2}=0,6\text{ A}, I''_4=J\frac{R_1}{R_1+R_4}=1\cdot\frac{2}{5}=0,4\text{ A},$$

$$I''_2=J\frac{R_3}{R_2+R_3}=1\cdot\frac{2}{2+3}=0,4\text{ A}, I''_3=J\frac{R_2}{R_2+R_3}=1\cdot\frac{3}{2+3}=0,6\text{ A}.$$

Berilgan sxema shoxobchalaridagi toklar alohida ajratilgan sxemalar mos shoxobchalaridagi toklarning algebraik yig'indisiga teng:

$$I_1=I'_1-I''_1=1-0,6=0,4\text{ A}; \quad I_4=I'_4+I''_4=1+0,4=1,4\text{ A};$$

$$I_2=I'_2+I''_2=1+0,4=1,4\text{ A}; \quad I_3=-I'_3+I''_3=-1+0,6=-0,4\text{ A}.$$

1.14. O'ZAROLIK XUSUSIYATI VA UNI TARMOQLANGAN ELEKTR ZANJIRLARINI HISOBLASHDA QO'LLASH

1.40-rasmда passiv elektr zanjirning sxemasi keltirilgan. Sxemada rezistor bor ikkita shoxobchani ajratib, birinchi shoxobchani m , ikkinchisini esa k deb belgilaymiz (1.40-rasm, a). Endi m shoxobchasiga EYK E_m ni kiritamiz (sxemada boshqa EYK lar yo'q).

Konturlarni shunday belgilaymizki, unda k shoxobcha faqat k konturda, m shoxobcha esa m konturda bo'lsin. U holda EYK E_m ta'sirida k va m shoxobchalardan o'tuvchi toklar quyidagicha aniqlanadi:

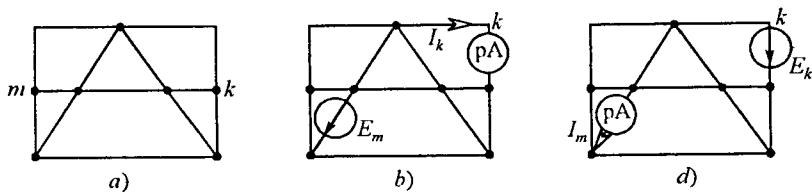
$$I_m = E_m G_{mm}, \quad I_k = E_m G_{km}.$$

G_{mm} – m shoxobchaning kirish o'tkazuvchanligi. Agar EYK $E_m = 1$ V (birlik EYK) bo'lsa, u holda G_{mm} ning qiymati m shoxobchadagi tokka teng bo'ladi. G_{km} – k va m shoxobchalarning o'zaro o'tkazuvchanligi. Agar m shoxobchaga $E_m = 1$ V birlik EYK manbai ulansa, G_{km} ning qiymati k shoxobchadagi tokka teng bo'ladi. Kirish va o'zaro o'tkazuvchanliklar chiziqli elektr zanjirlarining umumiy xususiyatlarini aniqlash va zanjirni ustma-ustlash usuli yordamida hisoblashda foydalaniladi. Kirish va o'zaro o'tkazuvchanliklarni hisoblash yoki tajriba orqali aniqlash mumkin. Berilgan sxema uchun kontur toklar usulidan foydalanib tenglamalar tuziladi. Bunda m va k shoxobchalarning har biri o'z konturiga kiradi. Shu konturlarning kirish va o'zaro o'tkazuvchanliklari bosh aniqlovchi va unga tegishli algebraik to'ldiruvchilar yordamida hisoblanadi:

$$G_{mm} = \Delta_{mm} / \Delta, \quad G_{km} = \Delta_{km} / \Delta. \quad (1.19)$$

(1.19) formulada G_{km} -musbat yoki manfiy bo'lishi mumkin. Agar EYK E_m m konturga ulanganda k shoxobchada hosil bo'lgan tok yo'nalishi k konturda dastlab ixtiyoriy qabul qilingan I_k kontur tokning yo'nalishi bilan bir xil bo'lsa, u holda E_m musbat ishora, aks holda esa *manfiy* ishora bilan olinadi.

G_{mm} va G_{km} larni tajriba yo'li bilan aniqlashda sxemaning m shoxobchadagi EYK ta'sirida k shoxobchadagi tokni o'lchash uchun ampermetr ulanadi (1.40-rasm, *b*). k shoxobchadagi tokni EYK E_m ga nisbati G_{km} o'tkazuvchanlikka teng bo'ladi. Kirish o'tkazuvchanlik G_{mm} ni aniqlash uchun m shoxobchadagi I_m tokni o'lchash kerak va uni shoxobchaga ulangan EYK E_m ga bo'lish kerak (1.40-rasm, *d*):

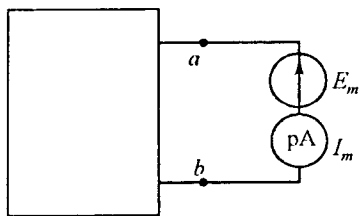


1.40-rasm.

$$G_{mm} = I_m / E_m.$$

m shoxobchani ajratib, sxemaning qolgan qismini (ya'ni EYuKi yo'q qismini) to'rtburchak ichiga joylashtiramiz (1.41-rasm).

To'rtburchak ichiga olingan sxema ab qismlariga nisbatan ma'lum qarshilikka ega va u sxemaning kirish qarshiligi deb ataladi. Ko'rilayotgan misolda m shoxobchani ab qismlariga nisbatan kirish qarshiligi



1.41-rasm.

$$R_{kir} = \frac{E_m}{I_m} = \frac{1}{G_{mm}}.$$

Shunday qilib, m shoxobchani kirish qarshiligi shu shoxobcha o'tkazuvchanligining teskari qiymatidir. Bu qarshilikni m konturning umumiy qarshiligi bilan, masalan kontur toklar usulidagi konturning xususiy qarshiligi bilan almashtirish mumkin emas.

Teorema: har qanday chiziqli elektr zanjirida m shoxobchadagi EYK E_m ta'siridan k shoxobchada hosil bo'ladigan tok $I_k = G_{mk} E_m$ ifoda bilan aniqlanadi va bu tok m shoxobchadagi I_m tokka teng bo'ladi. Agar shu tokning sababchisi EYK E_k qiymati jihatidan EYK E_m ga teng va k shoxobchada bo'lsa, u holda $I_m = G_{mk} E_k$.

O'zarolik teoremasini isbot qilish uchun 1.40-rasm, a ga e'tibor beramiz. Sxemadan k va m shoxobchalarni ajratamiz. m shoxobchaga EYK E_m ni, k shoxobchaga esa ampermetr pA ni ulab, tok I_k ni o'lchaymiz (1.40-rasm, b). k va m shoxobchalar faqat mos ravishda tegishli k va m konturlarga kiradi, deb qaraymiz. U holda kontur toklar usuliga ko'ra $I_k = E_m (\Delta_{km} / \Delta)$ bo'ladi.

Keyin EYK bilan ampermetr o'rnini almashtiramiz, ya'ni EYKni m shoxobchaga o'tkazamiz va uni endi E_k deb olamiz, ampermetrni esa, k shoxobchadan m shoxobchaga ko'chiramiz (1.40-rasm, d). Bu holda tok

$$I_{mm} = E_k (\Delta_{mk} / \Delta), E_k = E_m, \Delta_{mk} = \Delta_{km}$$

bo'lganligi uchun sistema determinanti Δ asosiy diagonaliga nisbatan simmetrik bo'ladi. Shuning uchun 1.40-rasm, b dagi tok I_k 1.40-rasm, d dagi I_m tokka teng bo'ladi. O'zarolik teoremasi amalda ishlatilganda

asosiy e'tiborni EYK va tok yo'nalishlarining o'zaro to'g'ri kelishiga qaratish zarur, ya'ni k shoxobchadagi EYK E_k (1.40-rasm, d) va kontur tok I_k (1.40-rasm, b) bir xil yo'nalishda bo'lishi lozim.

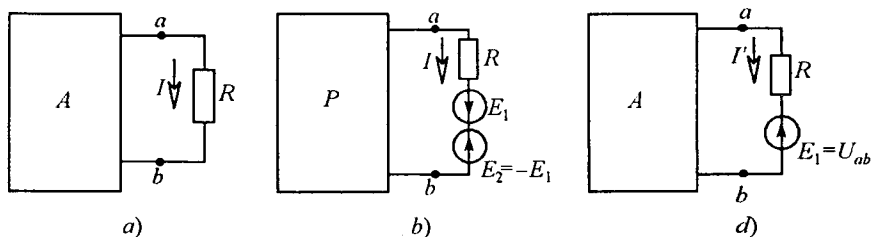
1.15. AKTIV IKKI QUTBLIK HAQIDA TEOREMA VA UNI MURAKKAB ELEKTR ZANJIRLARNI HISOBLASHDA QO'LLASH. EKVIVALENT GENERATOR USULI

Elektr zanjirlar nazariyasida ikki qutblik tushunchasi keng qo'llaniladi. Har qanday elektr sxemada fikran biror shoxobchani ajratib olib sxemaning qolgan elementlarini tartibli ravishda to'rtburchak ichiga joylashtirish mumkin. To'rtburchak ichiga olingan sxema ajratilgan shoxobchaga nisbatan *ekvivalent ikki qutblik* deb ataladi. Demak, ikki qutblik — bu elektr zanjir sxemasining umumiy nomi bo'lib, u o'zining ikki qismalari (qutblari) bilan ajratilgan shoxobchaga ulanadi.

Agar ikki qutblikda EYK yoki tok manbai bo'lsa, u holda bunday ikki qutblik *aktiv ikki qutblik* deb ataladi va to'rtburchak ichiga A harfi yoziladi (1.42-rasm, a).

Agar ikki qutblikda EYK yoki tok manbalari bo'lmasa yoki ular o'zaro kompensatsiyalangan bo'lsa, u holda bunday ikki qutblik *passiv ikki qutblik* deb ataladi va to'rtburchak ichiga P harfi yoziladi.

Ajratilgan shoxobchaga nisbatan ikki qutblikli elektr zanjimi hisoblashda ikki qutblikni ekvivalent generator bilan almashtirib, uning EYKi ajratilgan shoxobchanning qismalaridagi salt rejimdagi kuchlanishga, ichki qarshiligi esa ikki qutblikning kirish qarshiligiga teng qilib olinadi. Masalan, berilgan zanjirning ab shoxobchasidagi tok aniqlanishi kerak bo'lsin (1.42-rasm, a). Buning uchun zanjirning qolgan qismini fikran to'rtburchak ichiga olib hamda sxemadagi EYK va qarshiliklarni



1.42-rasm.

ekvivalent parametrlar bilan almashtiramiz. Agar ab shoxobchaga ikkita qiymati bir xil va o'zaro teskari yo'nalgan E_1 va E_2 EYK manbalarini ulasak, u holda shu shoxobchadan o'tayotgan tok qiymati o'zgarmaydi (1.42-rasm, b). Superpozitsiya prinsipiga asosan shoxobcha tokini ikkita I' va I'' toklar yig'indisidan iborat deb qaraymiz. Tok I' EYK E_1 manbai orqali o'tadi. Shu sababdan I' va I'' toklarni aniqlashda 1.42-rasm d va 1.43-rasm a dan foydalanamiz.

Passiv ikki qutblik sxemasida barcha EYK manbalari olib tashlanadi, ammo bu manbalar ichki qarshiliklari sxemada qoldiriladi. EYK E_1 kuchlanish U_{ab} ga teskari yo'nalgan. Zanjirning EYK manbai bo'lgan shoxobchasi uchun Om qonuniga asosan:

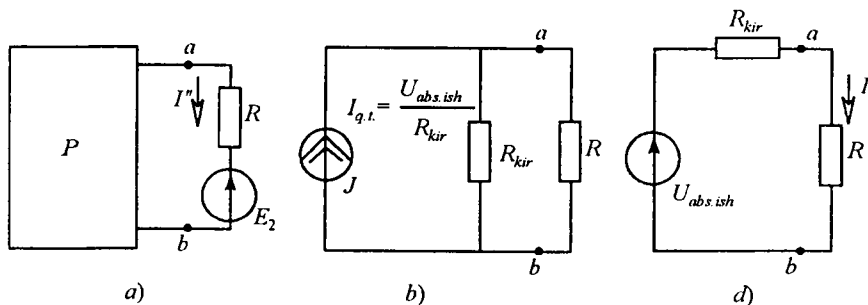
$$I' = U_{ab} - E_1 / R.$$

Endi E_1 EYK qiymatini o'zgartirib tok I' ifodasini nolga tenglab olamiz. Zanjir ab shoxobchasida tokni nolga tenglash, shu shoxobchani uzish bilan ekvivalent. Passiv ikki qutblikning bunday rejimi *salt ish rejimi* deyiladi. Salt ish rejimida ab qismlardagi kuchlanishni $U_{ab.s.ish}$ deb belgilaymiz. Agar E_1 EYKni $U_{ab.s.ish}$ ga teng qilib olsak, unda $I' = 0$ bo'ladi. Umumiy tok $I = I' + I''$, bizda esa $I' = 0$, shuning uchun $I = I''$. Tok I'' sxemaga asosan (1.43-rasm, d) quyidagicha aniqlanadi:

$$I'' = \frac{U_{ab.s.ish}}{R + R_{kir}} = I. \quad (1.20)$$

Bu ifodada R_{kir} ikki qutblikning ab qismlariga nisbatan kirish qarshiligidir.

(1.20) tenglamaga 1.43-rasm, v dagi ekvivalent sxema mos keladi. Bunday EYK li ikki qutblikni $E = U_{ab.s.ish}$ va qarshiligi R_{kir} ga teng bo'lgan



1.43-rasm.

ekvivalent generator bilan almashtirish mumkin. Shuning uchun bu usul *ekvivalent generator usuli* deb ataladi. Ba'zi adabiyotlarda bu usul aktiv ikki qutblik yoki salt ish va qisqa tutashish usuli deb ham nomlangan.

Bu usulda tokni aniqlash quyidagi ketma-ketlikda bajariladi:

- elektr zanjir sxemasidan ab shoxobchasini fikran uzib, uning ab qismalaridagi kuchlanish aniqlanadi;
- ab qismalariga nisbatan ichki EYK manbalari qisqa tutashtirilgan holda kirish qarshiligi R_{kir} hisoblanadi;
- shoxobchadan o'tayotgan tok quyidagi formula yordamida topiladi:

$$I = U_{ab.s.ish} / (R + R_{kir}). \quad (1.21)$$

Agar ab shoxobchadagi qarshilikni nolga tenglasak ($R_{ab} = 0$), u holda sxemada qisqa tutashish rejimi bo'ladi va shoxobchadan o'tuvchi tok qisqa tutashish toki bo'ladi ($I_{q.t}$). (1.21) formulada $R = 0$ bo'lganida

$$I_{q.t} = U_{ab.s.ish} / R_{kir} \quad \text{yoki} \quad R_{kir} = U_{ab.s.ish} / I_{q.t} \quad (1.22)$$

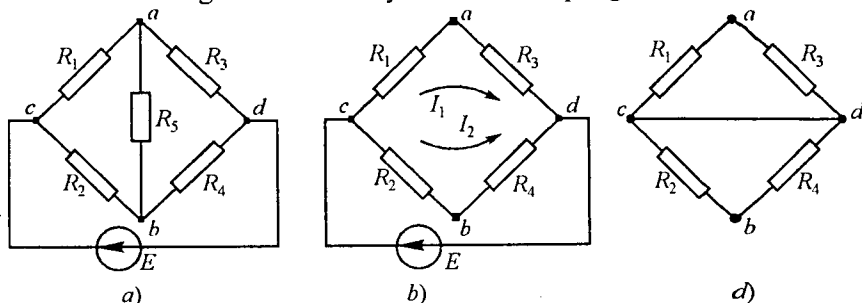
topiladi.

(1.22) formuladan ko'rinib turibdiki, $U_{ab.s.ish}$ va R_{kir} larni aniqlash uchun oddiy tajriba usulidan foydalanish mumkin.

Buning uchun ab qismalaridagi salt ish rejimidagi kuchlanish $U_{ab.s.ish}$ o'lchanadi va zanjir qisqa tutashish rejimiga o'tkazilib, shoxobchadagi qisqa tutashish toki $I_{q.t}$ aniqlanadi, keyin R_{kir} hisoblanadi:

$$R_{kir} = U_{ab.s.ish} / I_{q.t}$$

Masala. 1.44-rasm, a da keltirilgan ko'priksxemaning ab diagonalidagi tokni ekvivalent generator usuli yordamida aniqlang.



1.44-rasm.

Berilgan: $R_1 = R_4 = 1 \Omega$, $R_2 = 4 \Omega$, $R_3 = 2 \Omega$, $R_5 = 2 \Omega$, $E_1 = 10 \text{ V}$.

Yechish. ab shoxobchani uzamiz (1.44-rasm, b) va salt ish rejimi uchun U_{ab} kuchlanishni aniqlaymiz:

$$\varphi_a = \varphi_b + R_2 I_2 - R_1 I_1 = \varphi_b + \frac{R_2 E}{R_2 + R_4} - \frac{R_1 E}{R_1 + R_3}$$

$$U_{Ob.s.ish} = \varphi_a - \varphi_b = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_3} \right) E = \left(\frac{4}{4+1} - \frac{1}{1+2} \right) 10 \approx 4,67 \text{ V}.$$

ab qismlariga nisbatan EYK manbai qisqa tutashtirilgan holdagi kirish qarshiligini aniqlaymiz (1.44-rasm, d). Bu holda sxemadagi c va d nuqtalar o‘zaro qisqa tutashtirilgan. Shuni hisobga olsak:

$$R_{kir} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} = \frac{1 \cdot 2}{1+2} + \frac{4 \cdot 1}{4+1} \approx 1,47 \Omega.$$

ab shoxobchadagi tok esa

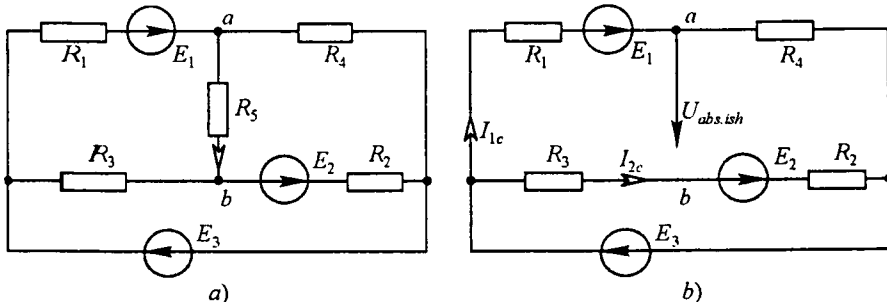
$$I = \frac{U_{ab.s.ish}}{R_5 + R_{kir}} = \frac{4,67}{2+1,47} = \frac{4,67}{3,47} = 1,39 \text{ A}.$$

Masala. Berilgan zanjirdagi (1.45-rasm, a) I_5 tok ekvivalent generator usulida aniqlansin.

$$E_1 = 50 \text{ V}; E_2 = 80 \text{ V}; E_3 = 100 \text{ V}; R_4 = 20 \Omega; R_1 = 10 \Omega;$$

$$R_2 = 20 \Omega; R_3 = 40 \Omega; R_5 = 20 \Omega.$$

Yechish. Tokni aniqlash kerak bo‘lgan shoxobchani uzamiz va uzilish nuqtalari ab orasidagi $U_{ab.s.ish}$ kuchlanishni aniqlaymiz. Hosil bo‘lgan sxema 1.45-rasm b da keltirilgan.



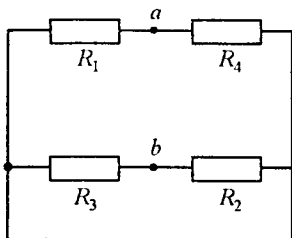
1.45-rasm.

Kirxgofning ikkinchi qonunidan:

$$E_3 + E_1 = (R_4 + R_1)I_{1s.ish}, \quad E_3 + E_2 = (R_3 + R_2)I_{2s.ish}$$

1.45-rasm, *b* dagi zanjir shoxobchalaridagi toklarni aniqlaymiz:

$$I_{1s.ish} = \frac{(E_3 + E_1)}{(R_4 + R_1)} = \frac{100 + 50}{20 + 10} = 5 \text{ A}, \quad I_{2s.ish} = \frac{(E_3 + E_2)}{(R_3 + R_2)} = \frac{(100 + 80)}{(40 + 20)} = 3 \text{ A}.$$



1.46-rasm.

2. Salt ish kuchlanishi:

$$U_{ab.s.ish} = j_a - j_b = E_1 - R_1 I_{1s.ish} + R_3 I_{2s.ish} = 50 - 10 \cdot 5 + 40 \cdot 3 = 120 \text{ V}.$$

Uzilgan nuqtalarga nisbatan butun zanjirning kirish qarshiligini aniqlaymiz. Bunda uchala EYK manbalarini fikran qisqa tutashtiramiz (1.46-rasm):

$$R_{kir} = \frac{R_1 R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{10 \cdot 20}{10 + 20} + \frac{20 \cdot 40}{20 + 40} = 20 \Omega.$$

3. Izlanayotgan tokni hisoblaymiz:

$$I_5 = \frac{U_{ab.s.ish}}{R_{kir} + R_5} = \frac{120}{20 + 20} = 3 \text{ A}.$$

1.16. ASOSIY TOPOLOGIK TUSHUNCHALAR VA ULARNI ELEKTR ZANJIRLARNI HISOBLASHDA QO'LLASH

Elektr zanjirlarini hisoblashda izlanayotgan elektr kattaliklar va ularning nisbatlarini aniqlash uchun umumiy holda Kirxgof qonunlari asosida tuzilgan tenglamalar sistemasini yechish zarurligi avvalgi paragraflarda ko'rsatilgan edi.

Agar elektr sxemasi *Sh* ta shoxobcha va *T* ta tugunga ega bo'lib, shoxobchalardagi qarshiliklar qiymatlari, kuchlanish va tok manbalari qiymatlari hamda yo'nalishlari berilgan bo'lsa, shoxobchalardagi toklarni hisoblash uchun dastlab Kirxgofning 1-qonuniga asoslanib $y = T - 1$ ta tugunlar uchun tenglamalar tuziladi, so'ngra Kirxgofning 2-qonuni bo'yicha o'zaro bog'liq bo'lmagan konturlar uchun tenglamalar soni $K = Sh - Sh_{T.M} - (T - 1)$ asosida aniqlanadi va tenglamalar tuziladi.

Demak, tenglamalar soni shoxobchalar soni *Sh* ga teng bo'ladi. O'zaro bog'liq bo'lmagan konturlar soni *K* ni aniqlashda va tenglamalar

tuzishda elektr zanjiri sxemasini *grafshaklida* ifodalash elektr zanjirlarini hisoblashda ma'lum qulayliklar yaratadi.

Elektr zanjiri shoxobchalarini o'zaro birlashtirishni chizmada ifodalovchi geometrik struktura *sxema grafi* deb ataladi. *Graf* — elektr zanjiri sxemasidagi barcha axborotni o'zida mujassamlashtiruvchi geometrik tuzilmadan iborat chizmadir. Bu chizmada elektr zanjiri shoxobchalari kesma bilan, tugunlar esa nuqta bilan, kuchlanish manbai qisqa tutashgan shoxobcha, tok manbai uzilgan shoxobcha yordamida ko'rsatiladi. Shunday qilib graf bu ikki xil elementlar tizimidir. Bunday tizimda tugunlar — graf cho'qqisi — nuqta bilan belgilanadi. Shoxobcha — graf qirrası — kesma bilan ko'rsatiladi. Bu kesma ikkita tugunni o'zaro birlashtiradi. Elektr zanjiri grafi har xil ko'rinishda bo'lishi mumkin:

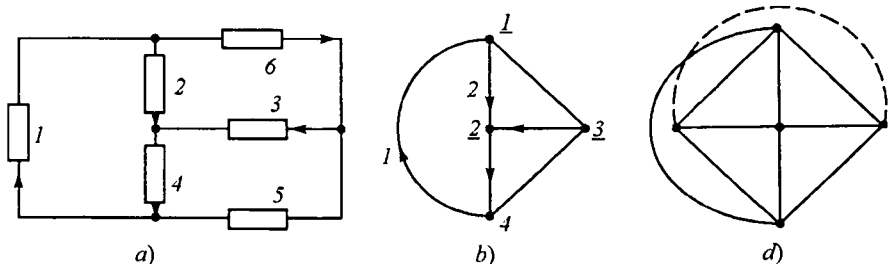
- a) planar-yassi graf,
- b) noplanar-fazoviy graf.

Planar graf chizma tekislikligida o'zaro kesishmagan shoxobchalar — kesmalar bilan tasvirlanadi (1.47-rasm, a, b).

Noplanar grafni chizma tekisligida o'zaro kesishmagan shoxobchalar bilan tasvirlab bo'lmaydi. Unda o'zaro kesishgan kesmalar ham bo'ladi (1.47-rasm, d).

Agar grafning har qanday qismi tayanch (asosiy) graf elementlaridan tashkil topgan bo'lsa, uning bu qismi-*qismaniy graf (podgraf)* deyiladi. Qismaniy graf asosiy grafning ba'zi shoxobchalarini (kesmalarini) olib tashlash natijasida hosil bo'ladi. Qismaniy grafning muhim qismi graf yo'li deb ataladi. U uzluksiz shoxobchalar ketma-ketligidan iborat bo'lib, ikkita tanlangan tugunning bog'lovchisi sifatida oraliqdagi tugunlardan faqat bir marta o'tadi.

Agar berilgan grafda ikki tugun orasida kamida bitta — yagona graf yo'li bo'lsa, bunday graf *bog'langan graf* deb ataladi. Elektr zanjirlarida



1.44-rasm.

bog‘langan graf elementlari o‘zaro ulangan zanjirni tasvirlaydi. Kirxgof qonunlari asosida berilgan zanjirning elektr holati tenglamalarini tuzishda zanjir shoxobchalaridagi tok yo‘nalishi graf kesmalarida belgilanadi. Natijada zanjir shoxobchalari yo‘naltirilgan grafi hosil bo‘lib, bunday graf *yo‘naltirilgan graf* deyiladi.

Demak, grafdagi yo‘nalishlar elektr zanjiri shoxobchalaridagi toklar yo‘nalishlarini ko‘rsatadi.

Barcha tugunlarni o‘z ichiga olgan grafning qismi berk kontursiz bo‘lsa, uni *graf daraxti* deb ataladi.

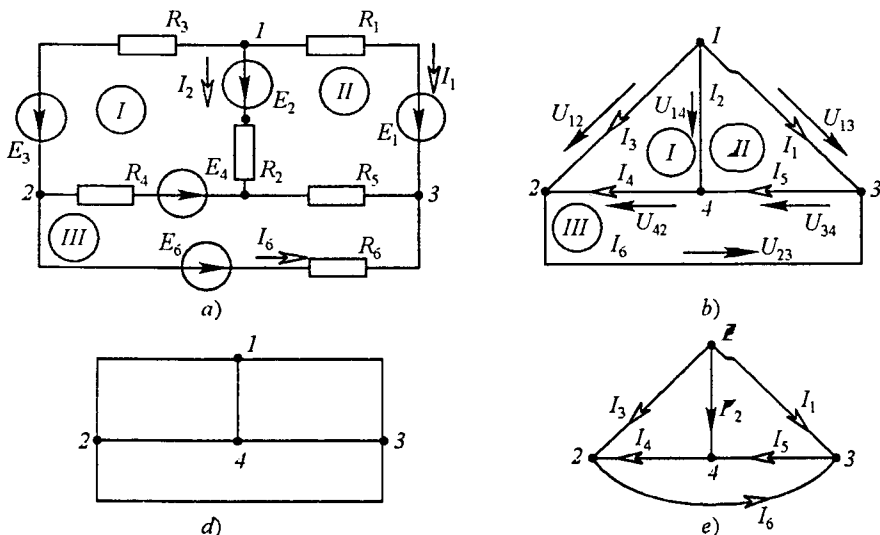
Graf daraxtining shoxobchalari — kesmalari elektr zanjiri sxemasidagi tugunlar sonidan bittaga kam bo‘ladi, ya‘ni $(T-1)$ ga teng.

Graf daraxtining tarkibiga kirmagan shoxobchalar vatarlar yoki *graf daraxtining asosiy shoxobchalari* deyiladi.

Graf daraxti asosiy shoxobchalarining yig‘indisi *daraxt to‘ldiruvchisi* deb ataladi.

Shunday qilib, elektr zanjirining grafi Sh ta shoxobchaga, graf daraxti $(T-1)$ shoxobchaga ega bo‘lib, daraxtning asosiy shoxobchalari soni $[Sh - (T-1)]$ ga teng. Bu esa o‘zaro bog‘liq bo‘lmagan konturlar soniga tengdir.

Endi misol tariqasida quyidagi elektr zanjiri sxemasi (1.48-rasm, a) va uning grafini keltiramiz.



1.48-rasm.

1.48-rasm, *a* dagi sxema grafini har xil ko‘rinishda tasvirlash mumkin (1.48-rasm, *b* da yo‘naltirilmagan graf va 1.48-rasm, *d*, *e*, larda yo‘naltirilgan graflar keltirilgan).

Yo‘naltirilgan graf (1.48-rasm, *d*) uchun Kirxgof qonunlari bo‘yicha quyidagi tenglamalarni yozish mumkin:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0, \quad I_6 - I_3 - I_4 = 0, \quad I_5 - I_1 - I_6 = 0.$$

$$U_{14} + U_{42} - U_{12} = 0, \quad U_{13} - U_{23} - U_{12} = 0, \quad U_{23} + U_{34} + U_{42} = 0.$$

So‘nggi tenglamalardagi kuchlanishlar quyidagicha aniqlanadi:

$$U_{12} = -E_3 + R_3 I_3, \quad U_{23} = -E_6 + R_6 I_6,$$

$$U_{13} = -E_1 + R_1 I_1, \quad U_{34} = R_5 I_5,$$

$$U_{14} = -E_2 + R_2 I_2, \quad U_{42} = E_2 + R_4 I_4.$$

MUSTAQIL TAYYORLANISHGA DOIR REFERAT MAVZULARI

1. O‘zbekistonni elektrlashtirish tarixi va istiqboli. Mustaqil O‘zbekistonning energetik dasturi.
2. Kirxgof qonunlari va ularni elektr zanjirlarni hisoblashda qo‘llanilishi.
3. Elektr zanjirlarida ekvivalent o‘zgartirishlar.
4. Murakkab zanjirlarni hisoblash usullari va ularni qiyosiy taqqoslash.
5. Elektr zanjirlarda energiya va quvvat. Quvvatlar balansi.

O‘Z-O‘ZINI SINASH SAVOLLARI

1. «Elektrotexnikaning nazariy asoslari» fanining maxsus fanlarni o‘zlashtirishdagi o‘rni haqida so‘zlab bering.
2. Elektrotexnikaning rivojlanishiga chet el olimlarining qo‘shgan hissasi nimalardan iborat?
3. O‘zbekistonda energetika va elektrotexnikaning rivojlanish bosqichlari haqida gapirib bering.
4. Elektrotexnikaning rivojlanishiga o‘zbekistonlik olimlarning qo‘shgan hissalar haqida so‘zlab bering.
5. Elektr zanjirlarni tavsiflovchi asosiy kattaliklarga nimalar kiradi?
6. Elektr zanjirining asosiy elementlari haqida ma’lumot bering.
7. EYK va tok manbalari nima?
8. Om qonunining mohiyatini tushuntirib bering.
9. Katta toklarda Om qonunining buzilishini izohlang.

10. Potensial diagramma nima va u qanday quriladi?
11. Elektr zanjirlarida quvvatlar balansi nimadan iborat?
12. Kirxgof qonunlarini ta'riflang va mohiyatini tushuntiring.
13. Kirxgof tenglamalari yordamida murakkab zanjirlarni hisoblash ketma-ketligini ayting.
14. Elektr zanjiri sxemalarini ekvivalent o'zgartirishlar deganda nimani tushunasiz?
15. Qarshiliklar uchburchagini qarshiliklar yulduziga ekvivalent o'zgartirish qanday amalga oshiriladi?
16. Qarshiliklar yulduzini qarshiliklar uchburchagiga ekvivalent o'zgartirish qanday amalga oshiriladi?
17. EYK va tok manbaiga ega bo'lgan parallel shoxobchalarni ekvivalent o'zgartirishning o'ziga xos xususiyatlarini aytib bering.
18. Proporsional kattaliklar usulining mohiyati nimadan iborat?
19. Elektr zanjirlarni kontur toklar usuli yordamida hisoblash tartibini ayting.
20. Tugun potentsiallar usulining mohiyati nimadan iborat va u qanday zanjirlarni hisoblashda qulay usul hisoblanadi?
21. Ikki tugun usulining afzalliklarini ayting.
22. Ustma-ustlash prinsipi nima va u qanday zanjirlarni hisoblashda qo'llaniladi?
23. O'zarolik prinsipining mohiyati nima?
24. Aktiv va passiv ikkiqutbliklar xossalarini ayting.
25. Elektr zanjirning kirish va shoxobchalararo o'tkazuvchanligi nima?
26. Ekvivalent generator usuli yordamida zanjirlarni hisoblash tartibini aytib bering.
27. Chiziqli elektr zanjirlarni hisoblash usullarini qiyosiy taqqoslang.

Ikkinchi bob

BIR FAZALI SINUSOIDAL TOK CHIZIQLI ELEKTR ZANJIRLARI

2.1. UMUMIY MA'LUMOTLAR

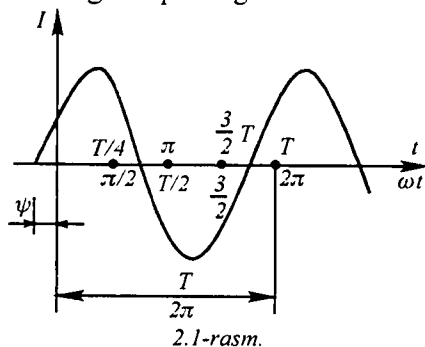
Amaliy elektrotexnikada asosiy rolni o'zgaruvchan tok o'ynaydi. Hozirgi vaqtda kelib deyarli barcha elektr energiya o'zgaruvchan tok elektr energiyasi ko'rinishida ishlab chiqariladi. O'zgaruvchan tokni o'zgarimas tokka nisbatan asosiy avzalligi — uni uzatishda kuchlanishni oson va kam isrof bilan o'zgartirish imkoniyatidir. Bundan tashqari, o'zgaruvchan tok generatorlari va motorlari o'zgarimas tok mashinalariga nisbatan tuzilishi sodda, ishlashda ishonchli va narxi arzon.

2.2. SINUSOIDAL TOK VA KUCHLANISHLARNING AMPLITUDASI, CHASTOTASI VA FAZASI

Yo'nalishi va kattaligi davriy ravishda o'zgarib turuvchi EYK, tok va kuchlanish *o'zgaruvchan EYK, tok va kuchlanish* deyiladi. Vaqt bo'yicha sinusoidal qonunga ko'ra o'zgaruvchan EYK, tok va kuchlanish *sinusoidal EYK, tok va kuchlanish* deb ataladi. Sinusoidal tok quyidagicha ifodalanadi:

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

bunda i — tokning oniy qiymati, [A], I_m — tokning maksimal (amplituda) qiymati, [A], ω — burchak chastota, [rad/s], ψ_i — boshlang'ich faza — faza ($\omega t + \psi_i$) ning $t=0$ vaqtdagi qiymati, [grad], 2.1-rasmda sinusoidal tokning to'liqin diagrammasi keltirilgan.



Davr T — bu muayyan vaqt oralig'i bo'lib, tokning o'zgarishi takrorlanadi, ya'ni to'liq bitta to'liqin o'zgarishi kuzatiladi. Bir sekunddagi davrlar soni *chastota* f deb ataladi: $f = 1/T$, [Gs]. $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ — o'zgaruvchan tokning burchak chastotasi.

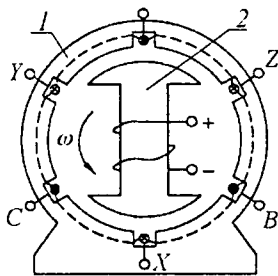
Sinusning argumenti, ya'ni ($\omega t + \psi_i$) kattalik *faza* deb ataladi. Faza tebranishning oniy t vaqtdagi holatini

tasvirlaydi. Elektrotexnik qurilmalar uchun kuchlanishning chastotasi standartlashtirilgan. Yevropada va mustaqil davlatlar hamdo'stligi hududlarida 50 Gs, AQSh va Yaponiyada esa 60 Gs qilib olingan. Sanoatda maxsus maqsadlar uchun turli xil chastotali o'zgaruvchan toklardan keng foydalaniladi. Masalan, tezyurar yuritmalarda chastotasi 200—400 Gs, elektron qurilmalarda — 500 Gs — 50 MGs va h.k. Radiotexnika, televideniya $3 \cdot 10^{10}$ Gs gacha va sanoat elektronikasining ko'p qurilmalarida nisbatan kichik miqdordagi energiyani elektromagnit to'lqinlar vositasida simsiz uzatish uchun yuqori chastotali o'zgaruvchan toklar zarur. *Har qanday sinusoidal o'zgaruvchan funksiya uchta kattalik bilan aniqlanadi: amplituda qiymati, burchak chastotasi va boshlang'ich fazasi.* Past chastotali sinusoidal EYK va toklar sinxron generatorlar yordamida hosil qilinadi. Yuqori chastotali sinusoidal EYK va toklar esa yarim o'tkazgichli generatorlar yordamida olinadi.

2.3. SINUSOIDAL EYKni HOSIL QILISH

O'zgaruvchan tokning eng ko'p tarqalgan manbalaridan biri mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantirib beruvchi sinxron generatordir. Sinxron generatorda sinusoidal EYK olish uchun doimiy magnit maydonida ramka ko'rinishdagi chulg'am o'zgarmas burchak tezligida aylantiriladi. O'zgaruvchan tok generatorlari ikki asosiy qismdan iborat (2.2-rasm). Qo'zg'almas qism — stator 1 va aylanuvchi qism-rotor 2 dir. Ularning birida (ko'pincha rotorda) doimiy elektromagnit joylashtiriladi va uning chulg'amlari o'zgarmas tok manbaidan ta'minlanadi.

Silindrsimon statorning ichki yuzasidagi pazlarda joylashgan chulg'amlarda rotorning aylanishi natijasida $e = Blv$ EYK paydo bo'ladi, bu yerda B -o'tkazgich simga ta'sir etuvchi magnit maydon induksiyasi, l -o'tkazgich simning uzunligi, v -aylanuvchi magnit maydonning chiziqli tezligi. Agar l va v kattaliklarni o'zgarmas deb olsak, u holda chulg'amlardagi EYK $e(t)$ ning o'zgarish qonuni magnit induksiyasi B ning vaqt bo'yicha o'zgarish qonuni bilan aniqlanadi.



EYK egri chizig'ining shakli sinusoidaga yaqin bo'lishi uchun generatorning rotorida joylashtirilgan qutb boshmog'i chetidagi havo

oralig‘i uning markaziga nisbatan 1,5...2 marta kattalashtiriladi. Shu sababdan, magnit induksiyaning o‘zgarish qonuni stator bilan rotor oralig‘ida sinusoidal bo‘ladi, qutb boshmoqlarining o‘rtasida magnit induksiya maksimal bo‘lib, qutb boshmoqlarining chetiga qarab kamayib boradi. Agar juft magnit qutblari soni p va rotorning bir minutdagi aylani shlar soni n bo‘lsa, u holda o‘zgaruvchan EYK ning chastotasi:

$$f = \frac{pn}{60}.$$

Elektrotexnikada o‘zgaruvchan tokning keng qo‘llanishi elektr energiyani markazlashgan holda ishlab chiqarish va uni uzoq masofalarga uzatish masalasi yechilganidan keyin boshlandi.

Energiyani uzatish va taqsimlash iqtisodiy tarafdin hamda xavfsizlik nuqtai nazaridan uzatish uchun yuqori kuchlanishni va taqsimlash uchun esa nisbatan past kuchlanishni talab etadi. O‘zgaruvchan tok kuchlanishini o‘zgartirish nihoyatda sodda statik apparat — transformator yordamida bajariladi.

Agar bir xil chastotali bir necha sinusoidal funksiyalar (masalan, EYK va tok) sinusoidalarning boshlanishlari mos kelmasa, u holda bu sinusoidal faza jihatidan bir biriga nisbatan siljigan deyiladi. Faza siljishi tok va EYK boshlang‘ich fazalarining ayirmasi bilan o‘lchanadi, ya‘ni $\varphi = \psi_i - \psi_e$.

Agar bir xil chastotali sinusoidal funksiyalar boshlang‘ich fazalari bir xil bo‘lsa, u holda sinusoidal faza jihatidan mos tushadi. Agar fazalar ayirmasi $\pm\pi/2$ ga teng bo‘lsa, u holda sinusoidal bir biriga nisbatan kvadratura deyiladi.

2.4. SINUSOIDAL TOK, EYK VA KUCHLANISH TA‘SIR ETUVCHI (EFFEKTIV) VA O‘RTACHA QIYMATLARI

Sinusoidal o‘zgaruvchan kattalikning juda keng ishlatiladigan qiymati bu uning ta‘sir etuvchi qiymatidir. U effektiv yoki o‘rtacha kvadratik qiymat deb ham ataladi. Tokning ta‘sir etuvchi qiymati quyidagicha aniqlanadi:

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \psi_i) dt} = \\ &= \sqrt{\frac{I_m^2}{2 \cdot T} \int_0^T [1 - \cos(2\omega t + 2\psi_i)] dt} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2T} (T - 0)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m. \end{aligned}$$

Demak, sinusoidal tokning ta'sir etuvchi qiymati davr mobaynidagi o'rtacha kvadratik qiymatiga teng va u tok maksimal qiymatining 70,7 foizini tashkil etadi.

EYK va kuchlanishning ta'sir etuvchi qiymatlari mos ravishda $E = E_m/\sqrt{2}$, $U = U_m/\sqrt{2}$ ga teng. Rezistordan bir xil vaqtda o'tgan sinusoidal va o'zgarmas toklar energiyasining issiqlik energiyasiga aylanish natijasini taqqoslab ko'ramiz. Rezistordan sinusoidal tok o'tganda bir davr ichida ajralayotgan issiqlik miqdori:

$$Q = \int_0^T ri^2 dt = rI_m^2 \frac{T}{2}.$$

Shu vaqt ichida o'zgarmas tok ta'sirida ajralib chiqqan issiqlik miqdori:

$$Q = rI^2T.$$

Ularni o'zaro tenglab, quyidagini hosil qilamiz:

$$rI_m^2 (T/2) = rI^2T \text{ yoki } I = I_m/\sqrt{2}.$$

Shunday qilib, sinusoidal tokning ta'sir etuvchi qiymati miqdor jihatdan o'zgarmas tokning shunday qiymatiga tengki, unda sinusoidal va o'zgarmas toklar teng vaqt mobaynida rezistordan o'tganda undan ajralib chiqqan issiqlik miqdorlari o'zaro teng bo'ladi. Ko'pchilik (elektromagnit, ferrodinamik, elektrodinamik, issiqlik va h.k. sistemali) o'lchash asboblari sinusoidal kattalikning ta'sir etuvchi (effektiv) qiymatini o'lchaydi.

Sinusoidal kattalikning amplituda qiymatini ossillograflarda o'lchash yoki ta'sir etuvchi qiymat orqali hisoblab topish mumkin.

Sinusoidal o'zgaruvchan kattaliklarning o'rtacha qiymati deb, uning yarim davr ichidagi o'rtacha qiymati tushuniladi. Demak, sinusoidal tokning o'rtacha qiymati:

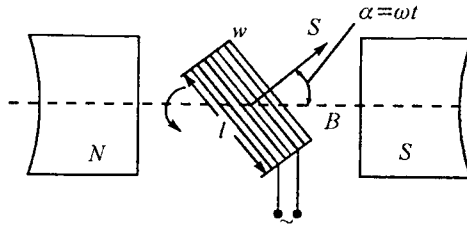
$$I_{o'rtacha} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m,$$

ya'ni sinusoidal tokning o'rtacha qiymati amplituda qiymatining $2/\pi = 0,63$ qismini tashkil qiladi. Sinusoidal EYK va kuchlanishlar uchun ham xuddi shunday tengliklar o'rinli:

$$E_{o'rtacha} = \frac{2}{\pi} E_m, \quad U_{o'rtacha} = \frac{2}{\pi} U_m.$$

Sinusoidal tokning o'rtacha qiymatini magnitoelektrik asbobga ketma-ket yarim o'tkazgichli diod ulab o'lish mumkin.

1-masala. Magnit induksiyasi $B=0,8$ T/bo'lgan birjinsli magnit maydonida uzunligi $l=0,25$ m eni $d=0,2$ m mis simdan yasalgan



2.3-rasm.

ramka $\omega=314$ 1/s burchak tezlik bilan aylanmoqda (2.3-rasm).

Ramkadagi mis sim o'ramlar soni $w=25$. Ramkada induksiyalangan EYK ni ramkaning burchak tezligiga bog'liqligini aniqlang.

Yechish. Ko'rilayotgan ramka bir xil sharoitda turgan 25 ta kvadratsimon konturlardan iborat. Binobarin, bitta konturda induksiyalanayotgan EYK ni aniqlab, keyin uni w ga ko'paytirish kifoya.

Ramka konturida induksiyalanadigan EYK ni $e_k = -d\Phi/dt$ formula asosida aniqlaymiz. Buning uchun vaqt bo'yicha magnit oqim o'zgarishini bilish lozim. Ramkaning boshlang'ich holatida (2.3-rasm) konturni maksimal magnit oqim Φ kesib o'tadi, ixtiyoriy boshqa holatda esa $\Phi = \Phi_m \cos \alpha = \Phi_m \cos \omega t$.

Binobarin, bir o'ramdagi EYK:

$$e_k = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(\Phi_m \cos \omega t)}{dt} = -\Phi_m \omega (-\sin \omega t) = \Phi_m \omega \sin \omega t.$$

Ramkadagi w o'ramlar uchun esa

$$e = w e_k = -w \frac{d\Phi}{dt} = w \Phi_m \omega \sin \alpha.$$

Bu teng lamaga qiymatlarni qo'yib, $e=f(\omega)$ ni topamiz

$$e = w \omega B_m l d \sin \omega t = 314 \cdot 25 \cdot 0,8 \cdot 0,2 = 310,8 \sin \omega t \text{ V.}$$

Sinusoidal tok zanjirlarining tahlilida amplituda va shakl koeffitsiyentlaridan keng foydalaniladi.

Amplituda koeffitsiyenti davriy o'zgaruvchi funksiyaning amplitudasini uning ta'sir etuvchi qiymatiga nisbati bilan aniqlanadi. Sinusoidal tok uchun:

$$k_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2}.$$

Shakl koeffitsiyenti davriy o'zgaruvchan funksiyaning ta'sir etuvchi qiymatini uning o'rtacha qiymatiga nisbati bilan aniqlanadi. Sinusoidal tok uchun:

$$k_{Sh} = \frac{I}{I_{o'rtu}} = \frac{I_m \sqrt{2}}{(2/\pi)I_m} = \frac{A}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

Shunday qilib, agar soʻz davriy oʻzgaruvchan kuchlanish va toklar toʻgʻrisida ketsa, u holda odatda ularning taʼsir etuvchi qiymatlari tushuniladi.

Elektrotexnika qurilmalarida juda kichik va katta tok va kuchlanishlar uchraydi. Radiopriyomnik kirishidagi kuchlanish bir necha mikrovolt atrofida boʻladi. Elektr uzatish liniya simlari orasidagi kuchlanish 500, 750 va 1150 kV larga yetadi. Tranzistorlardagi toklar 1 mA dan ancha kichik, metallurgiyadagi elektr pechlarda esa tok bir necha yuz kA larga yetadi.

2-masala. $i = 310 \sin(314t + \psi_i)$ A tokning $t=0$ dagi oʻniy qiymati $i(0) = 269$ A ga teng, ψ_i ning qiymatini toping. Agar shu tok elektromagnit ampermetr bilan oʻlchansa, u holda asbob nechani koʻrsatadi?

Yechish. $t=0$ da tokning ifodasi $i(0) = 310 \sin \psi_i = 269,0$ A. Bundan,

$$\psi_i = \arcsin \frac{269}{310} = 60^\circ.$$

Elektromagnit sistemali ampermetr tokning taʼsir etuvchi qiymatini koʻrsatadi, yaʼni: $I = I_m / \sqrt{2} = 310 / \sqrt{2} = 220$ A.

3-masala. Ikki juft qutbga ega generator $n = 1500$ ayl/min tezlik bilan aylanmoqda. Oʻzgaruvchan tok chastotasini aniqlang.

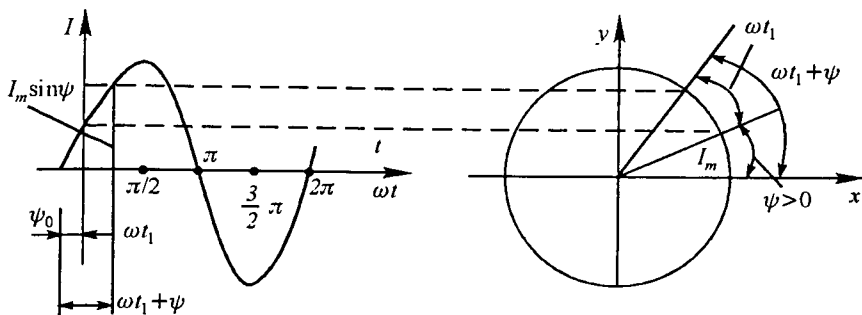
Yechish. $f = \frac{pn}{60} = \frac{2 \cdot 1500}{60} = 50$ Gs.

4-masala. Chorvoq GES turbogeneratorlari 250 ayl/min tezlik bilan aylanadi. Chastota $f = 50$ Gs boʻlganda generatorlarning juft qutblar sonini aniqlang.

Yechish. $p = 60f/n = 60 \cdot 50/250 = 12$.

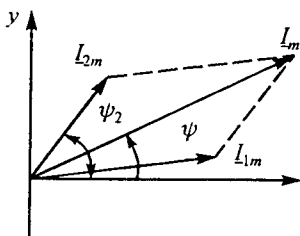
2.5. SINUSOIDAL KATTALIKLARNI VEKTORLAR BILAN TASVIRLASH

Matematika kursidan maʼlumki, ωt argumentli sinusoidal funksiya soat mili harakatiga qarama-qarshi yoʻnalishda ωt radianga buriluvchi birlik radiusning ordinata oʻqidagi proyeksiyasi bilan aniqlanadi. Sinusoidal tok i ga soat mili harakatiga teskari yoʻnalishda $\omega = \text{const}$ burchak tezlik bilan uzluksiz aylanuvchi I_m radiusli vektor mos keladi. Sinusoidani dekart koordinatalar sistemasida aylanuvchi vektor bilan tasvirlash mumkin (2.4-



2.4-rasm.

rasm). $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$ tokni aylanuvchi vektor ko'rinishda tasvirlash uchun uzunligi I_m ga teng bo'lgan vektor absissa o'qiga nisbatan ψ burchak (ψ burchak musbat qiymatga ega bo'lsa, absissa o'qidan soat mili harakatiga teskari yo'nalishda olinadi, manfiy qiymatga ega bo'lsa — aksincha) ostida qo'yiladi va u koordinata boshiga nisbatan soat mili harakatiga



2.5-rasm.

qarama-qarshi yo'nalishda ω burchak tezlik bilan aylanib turadi. I_m vektorining istalgan $t = t_1$ vaqtdagi ordinata o'qiga proyeksiyasi sinusoidal tokning shu vaqtdagi oniy qiymatiga teng bo'ladi, ya'ni $i(t_1) = I_m \sin(\omega t + \psi_1)$.

Sinusoidal funktsiyani aylanuvchi vektor ko'rinishida tasvirlash uchun uni xy tekisligida $t = 0$ vaqt uchun tasvirlash kifoya (2.4- rasm).

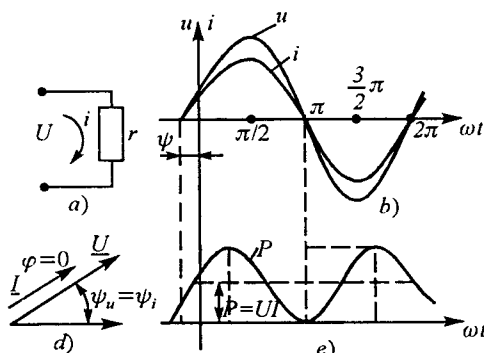
Sinusoidal kattaliklarni qo'shish yoki ayirishda ularning vektor tasvirlaridan foydalanilsa, amallarni bajarish ancha osonlashadi. Masalan, $i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$ va $i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \psi_2)$ toklarni qo'shib ko'ramiz. 2.5-rasmda i_1 va i_2 toklar I_1 va I_2 vektorlar ko'rinishida tasvirlangan. Natijaviy tok $i_1 + i_2 = I_m \sin(\omega t + \psi)$. Amalda ko'pincha oniy tokni emas, balki uning ta'sir etuvchi qiymatini bilish zarur bo'ladi. Shuning uchun ham amplituda vektorlari emas, balki ta'sir etuvchi tok vektorlari qo'shiladi.

2.6. SINUSOIDAL TOK ZANJIRLARIDA REZISTOR, INDUKTIV G'ALTAK VA KONDENSATOR

O'zgarmas tok zanjirlaridan farqli o'laroq, sinusoidal tok zanjirlarida rezistordan tashqari induktiv g'altak va kondensator kabi elementlardan keng foydalaniladi. Sinusoidal tok zanjirlarida energiyani issiqlik

energiyasiga aylantiruvchi elementlar *aktiv qarshiliklar* deb ataladi. Elektr zanjirlarining energiya davriy ravishda elektr yoki magnit maydoni energiyasi ko‘rinishida to‘planib turuvchi elementlari reaktiv elementlar, ularni o‘zgaruvchan tokka ko‘rsatadigan qarshiliklari esa *reaktiv qarshiliklar* deb ataladi. Induktiv g‘altak va kondensator zanjirning reaktiv elementlari hisoblanadi. Ushbu elementlardan tashkil topgan sinusoidal tok zanjirlarini hisoblashdan oldin bu elementlarda tok va kuchlanishlar o‘rtasidagi munosabatlarni o‘rganib chiqamiz.

2.6.1. Rezistiv elementli sinusoidal tok zanjiri



2.6-rasm.

Rezistiv elementdan tarkib topgan oddiy elektr zanjir sxemasi 2.6-rasm da keltirilgan. Sxemada r -rezistor. Sinusoidal kuchlanish $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ ta'sirida rezistor r dan o'tuvchi tok i Om qonuniga binoan: $i = \frac{u}{r} = \left(\frac{U_m}{r}\right) \times \sin(\omega t + \psi_u) = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ ifoda bilan aniqlanadi, bu yerda $I_m = U_m/r$; $\psi_u = \psi_i$.

2.6-rasm, b da kuchlanish va tok oniy qiymatlarining to'liq diagrammasi keltirilgan.

Demak, rezistiv elementli elektr zanjirdagi tok shakli sinusoidal bo'lib, uning chastotasi va boshlang'ich fazasi manba kuchlanishi chastotasi va boshlang'ich fazasi bilan bir xil bo'ladi. Kuchlanish va tokning o'zaro faza siljish burchagi $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$ ga teng (2.6-rasm, d).

Rezistiv elementli zanjir uchun Om qonuni kuchlanish va tokning ta'sir etuvchi qiymatlari orqali $I = U/r$ ko'rinishda yoziladi:

Ushbu zanjir uchun oniy quvvat quyidagi formula yordamida hisoblanadi:

$$p = ui = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi_u) = U_m I_m \left[\frac{1 - \cos 2(\omega t + \psi_u)}{2} \right] = UI - UI \cos 2(\omega t + \psi_u).$$

Quvvatning T davrdagi o'rtacha qiymati:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = \frac{1}{T} UI \int_0^T dt - \frac{1}{T} UI \int_0^T \cos 2(\omega t + \psi_u) \, dt = UI = rI^2 = U^2/r.$$

Oniy quvvatning o'zgarish grafigi 2.6-rasm, e da keltirilgan.

Rezistorda oniy quvvat noldan $2P=2UI$ qiymat oralig'ida o'zgarishi rasmdan ko'rinib turibdi. Demak, rezistiv elementli zanjirda manba quvvati rezistorda issiqlikka aylanib, to'la isrof bo'ladi.

Ma'lumki, o'tkazgichning qarshiligi o'zgaruvchan tokda o'zgaras tokka nisbatan kattaroq bo'ladi. Bunga sirt effekti, uyurmaviy toklar va o'tkazgich atrofiga sochilgan elektromagnit maydon energiyasi sabab bo'ladi.

Masala. Quvvati $P=100$ W li cho'g'lanma lampa kuchlanishi $U=220$ V va chastotasi $f=50$ Gs bo'lgan manbaga ulangan (2.7-rasm, a). Zanjirdan o'tuvchi tokni toping. Kuchlanish va tok oniy qiymatlari ifodasini yozing, ularning grafiglarini va vektor diagrammasini quring.

Yechish. Cho'g'lanma lampa aktiv qarshilik bo'lganligi uchun $P=UI$ ifodadan $I=P/U=100/220=0,45$ A.

Kuchlanish va tok oniy qiymatlari quyidagicha yoziladi:

$$u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \psi_u) = U_m \sin \omega t = \sqrt{2} \cdot 220 \sin \omega t = 310,2 \sin \omega t,$$

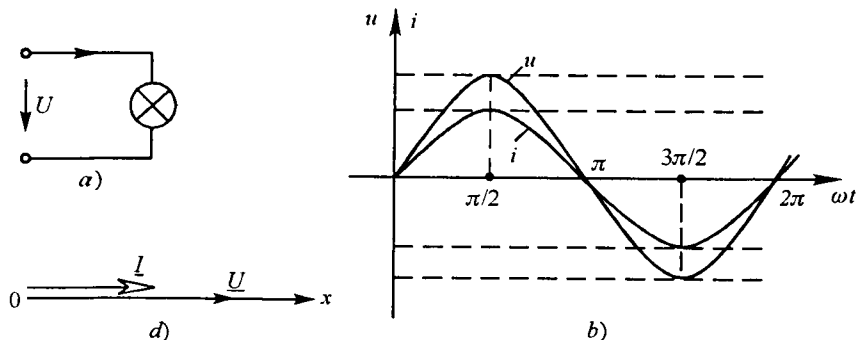
$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \psi_i) = I_m \sin \omega t = \sqrt{2} \cdot 0,45 \sin \omega t = 0,63 \sin \omega t,$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0 - 0 = 0,$$

bunda $U_m = \sqrt{2} \cdot 220 = 310,2$ V, $I_m = \sqrt{2} \cdot 0,45 = 0,63$ A.

Burchak chastotasi $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$ 1/s,

Davri $T = 1/f = 1/50 = 0,02$ s.



2.7-rasm.

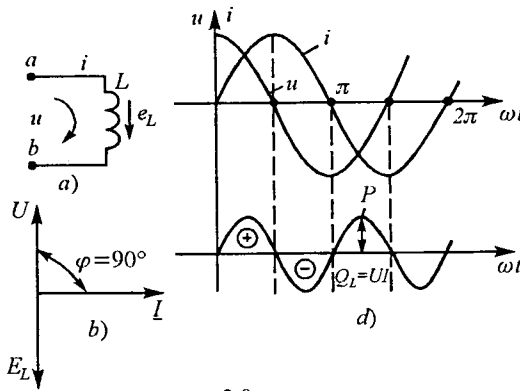
Sinusoidal kuchlanish va tokning grafiklarini qurish uchun masshtab tanlaymiz:

$$m_u = 100 \text{ V/sm} \quad m_i = 0,3 \text{ A/sm} \quad m_{\omega t} = 60 \text{ grad/sm.}$$

$u(\omega t)$, $i(\omega t)$ funksiyalar grafiklarini hamda U va I vektor dia grammasini quramiz (2.7-rasm, b , d).

2.6.2. Induktiv elementli elektr zanjirda sinusoidal tok. Induktiv qarshilik

Amalda har qanday induktiv g'altak aktiv qarshilik r va induktivlik L ga ega. Induktiv g'altak sxemada ko'pincha ketma-ket ulangan rezistor (aktiv qarshilik) va induktiv elementlari bilan tavsiflanadi. Sxemada faqat induktiv element L ni ajratib olamiz va $r=0$ deb hisoblab, ideal induktiv g'altakdagi jarayonni tahlil qilamiz.



2.8-rasm.

Agar induktiv elementdan $i = I_m \sin \omega t$ tok o'tsa, unda o'zinduksiya hodisiga asosan EYK hosil bo'ladi (2.8-rasm):

$$e_L = -L(di/dt) = -\omega LI_m \cos \omega t = -\omega LI_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

2.8-rasm, a da EYK e_L ning musbat yo'nalishi strelka bilan ko'rsatilgan; uning yo'nalishi i tokning musbat yo'nalishi bilan bir

xildir. a va b nuqtalar potentsiallari farqini aniqlaymiz. b nuqtadan a nuqta tomon siljiganimizda o'zinduksiya EYK e_L ning yo'nalishiga qarama-qarshi harakat qilamiz, shuning uchun $\varphi_a = \varphi_b - e_L$, bundan $u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = -e_L$.

Kuchlanish u_{ab} ning yo'nalishi tokning musbat yo'nalishi bilan bir xil. Induktivlikdagi kuchlanish:

$$u_{ab} = u_L = -e_L = \omega LI_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_m \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Bu ifodadan $U_m = \omega LI_m$.

ωL ko'paytma x_L deb belgilanadi va induktiv qarshilik deb ataladi, ya'ni: $x_L = \omega L$, uning o'lchami $[x_L] = [\omega] \cdot [L] = [(1/c) \cdot \Omega \cdot c] = [\Omega]$.

Shunday qilib, induktivlik o'zgaruvchan tokka $x_L = \omega L$ ga teng bo'lgan qarshilik ko'rsatadi. U chastotaga to'g'ri proporsional, ya'ni chastota ω oshsa, x_L ko'payadi va aksincha.

Induktiv g'altakda kuchlanish vektori tok vektoriga nisbatan faza jihatidan 90° oldinda yuradi (2.8-rasm, b). O'zinduksiya EYKning vektori kuchlanishga nisbatan teskari yo'nalgan.

2.8-rasm, d da i , u , p lar oniy qiymatlarining grafigi keltirilgan. Oniy quvvat:

$$p = ui = U_m \cos \omega t \cdot I_m \sin \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t.$$

Uning grafigi noldan o'tadi, chunki kuchlanish yoki tok noldan o'tganda $p=0$. Davrning birinchi choragida, u va i lar musbat bo'lganda p ham musbatdir.

Abssissa o'qi va oniy quvvat p egri chizig'i bilan chegaralangan yuza vaqt birligidagi energiya — quvvatdir. Bunda manbadan qabul qilingan energiya magnit maydonini hosil qiladi, ya'ni magnit maydoni energiyasiga aylanadi. Davrning ikkinchi choragida esa, tok zanjirda maksimumdan nolgacha kamayadi, bu holda magnit maydonining energiyasi manbaga qaytariladi, oniy quvvat esa, manfiy. Davrning uchinchi choragida manbadan yana energiya qabul qilinadi va magnit maydoni hosil bo'ladi, keyingi chorakda esa, manbaga qaytariladi va hokazo, ya'ni energiya davriy ravishda induktiv elementda magnit maydonini hosil qiladi yoki induktiv element energiyani orqaga — manbaga qaytaradi. *Iste'molchi bilan manba o'rtasida bir turdan ikkinchi turga o'tib sarf bo'lmaydigan va manbaga qaytariladigan energiya reaktiv energiya deb ataladi.* Uning quvvatini esa, ko'rib chiqilayotgan zanjir uchun induktiv xarakterdagi reaktiv quvvat deyiladi:

$$Q_L = UI = I^2 x_L [\text{VAR}].$$

Reaktiv quvvat aktiv quvvatdan farqli ravishda VAR — volt amper reaktivlarda o'lchanadi.

2.6.3. Rezistor va induktiv g'altakdan iborat zanjir

O'zgaruvchan tok ta'siridagi real induktiv g'altak aktiv va induktiv qarshilikdan iborat. Induktiv g'altakning ekvivalent sxemasi 2.9-rasm, a da keltirilgan.

G'altakdan $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ tok o'tmoqda deb, faraz qilaylik. Kirxgofning ikkinchi qonuniga binoan oniy qiymatlar uchun:

$$u = u_r + u_L = ir + Ldi/dt, \quad (2.1)$$

bunda, u_r — induktiv g'altakning aktiv qarshiligidagi kuchlanish: $u_r = ir = I_m r \sin \omega t$, u_L — induktiv qarshilikdagi kuchlanish:

$$\begin{aligned} u_L &= L \frac{di}{dt} = L \frac{d[I_m \sin(\omega t + \psi_i)]}{dt} = \omega L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \\ &= U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ). \end{aligned}$$

Kuchlanishlarning ta'sir etuvchi qiymatlari uchun (2.1) ni quyidagicha yozish mumkin: $\underline{U} = \underline{U}_r + \underline{U}_L$.

Tok va kuchlanishlar vektor diagrammasini (2.9-rasm, b) quyidagi ketma-ketlikda quramiz. (x, y) koordinata tekisligida I tok vektorini tasvirlaymiz. Undan keyin aktiv qarshilikdagi kuchlanish \underline{U}_r vektorini quramiz. Bu vektor tok bilan bir xil fazada bo'ladi. \underline{U}_L kuchlanish vektorini tok vektoridan 90° ga ilgariyladi. Shu vektorlarning yig'indisi manba kuchlanishi vektorini beradi va bu vektor tok vektoriga nisbatan φ burchakka ilgariyladi. Diagrammaga ko'ra:

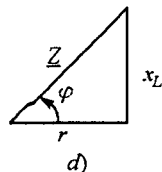
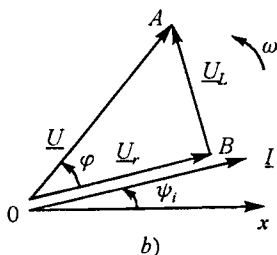
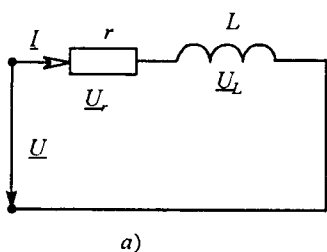
$$U^2 = U_r^2 + U_L^2 = I^2 r^2 + I^2 x_L^2, \text{ bundan, } I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}} = \frac{U}{z},$$

bunda $z = \sqrt{r^2 + x_L^2}$ — zanjirning to'la qarshiligi.

2.9-rasm, b da keltirilgan vektor diagrammadagi OAB uchburchak kuchlanishlar uchburchagi deb ataladi.

Tok fazasi bilan bir xil bo'lgan kuchlanishning tashkil etuvchisi uning *aktiv tashkil etuvchisi* deyiladi:

$$U_a = U_r = U \cos \varphi = I_r.$$



2.9-rasm.

Tok vektoriga perpendikulyar bo'lgan kuchlanishning tashkil etuvchisi kuchlanishning *reaktiv tashkil etuvchisi* deyiladi:

$$U_r = U_L = U \sin \varphi = I x_L.$$

Agar kuchlanishlar uchburchagi tomonlari tokning ta'sir etuvchi qiymatiga bo'linsa, u holda qarshiliklar uchburchagi hosil bo'ladi (2.9-rasm, *d*). Qarshiliklar uchburchagidagi fazalar siljishi va zanjir parametrlari orasidagi munosabatlarni hosil qilamiz:

$$r = z \cos \varphi, \quad x_L = z \sin \varphi, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_L}{r}, \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{x_L}{r}.$$

Masala. Kuchlanishi 220 V bo'lgan sanoat tarmog'iga aktiv qarshiligi 6 Ω va induktivligi 50 mGn bo'lgan induktiv g'altak ulangan (2.9-rasm, *a*). G'altakdan o'tuvchi tokning oniy qiymati ifodasini yozing. Induktiv g'altak uchun qarshiliklar uchburchagini, tok va kuchlanishlar vektor diagrammasini quring.

Yechish. G'altakning induktiv qarshiligi ($f=50$ Gs): $x_L = \omega L = 314 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 15,7 \Omega$.

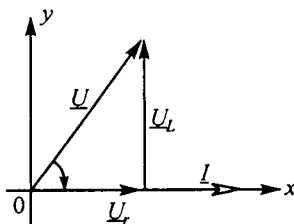
G'altakning to'la qarshiligi: $z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{6^2 + 15,7^2} = 16,1 \Omega$. Qarshiliklar uchburchagining katetlari ma'lum masshtabda r va x_L , gipotenuzasi esa z ga teng (2.9-rasm, *d*).

Zanjirdagi tok:

$$I = U/Z = 220/16,1 = 13,1 \text{ A}.$$

G'altakning aktiv qarshiligidagi kuchlanish: $U_r = I r = 13,1 \cdot 6 = 78,6 \text{ V}$, induktiv qarshiligidagi kuchlanish esa $U_L = I x_L = 13,1 \cdot 15,7 = 205 \text{ V}$.

Vektor diagrammani qurish uchun absissa o'qining musbat yo'nalishi bo'yicha ma'lum masshtabda ($m_u = 55 \text{ V/sm}$; $m_i = 3 \text{ A/sm}$) uzunligi 4,33 sm ga teng tok vektorini quramiz (2.10-rasm). Shu vektorning boshlanish nuqtasidan unga parallel ravishda belgilangan masshtabda \underline{U}_r kuchlanish vektorini quramiz. \underline{U}_L kuchlanish vektori \underline{U}_r vektorining oxiridan tok vektoriga nisbatan 90° ilgarilagan ravishda quriladi. \underline{U}_r vektorning boshi bilan \underline{U}_L vektorning oxirini birlashtirib \underline{U} kuchlanish vektorini hosil qilamiz. I tok va \underline{U} kuchlanish vektorlari orasidagi burchakni o'lchab $\varphi = -69^\circ$ ni topamiz.



2.10-rasm.

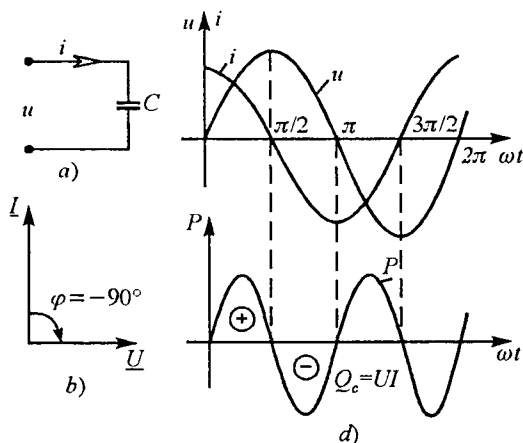
Shunday qilib, $i = 13,1 \sqrt{2} \sin(314 - 69^\circ) \text{ A}$.

2.6.4. Sig'im elementli elektr zanjirdagi sinusoidal tok. Sig'im qarshiligi

Agar kondensatorga berilgan kuchlanish vaqt bo'yicha o'zgarmasa, unda kondensator qoplamalaridan birida yig'ilgan zaryad $q = CU$ ikkinchisidagi esa $q = -CU$ bo'ladi, bu yerda C - kondensatorning sig'imi. Zaryadlar miqdori o'zgarmas bo'lib, kondensatordan tok o'tmaydi, chunki $i = dq/dt = 0$.

Agar kondensatorga berilgan kuchlanish vaqt bo'yicha sinusoidal o'zgarsa, ya'ni $u = U_m \sin \omega t$ bo'lsa, u holda undagi zaryad q ham sinusoidal qonun bo'yicha o'zgaradi: $q = Cu = CU_m \sin \omega t$ va kondensator davriy ravishda zaryadlanadi va zaryadsizlanadi. Kondensatorning davriy zaryadlanishi esa zanjirdan mos ravishda davriy tok o'tishiga sabab bo'ladi:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} (CU_m \sin \omega t) = \omega CU_m \cos \omega t = I_m \sin (\omega t + 90^\circ).$$



2.11-rasm.

Kondensatorida tokning musbat yo'nalishi kuchlanishning musbat yo'nalishi bilan bir xil (2.11-rasm, a).

Kondensatordan o'tayotgan tok faza jihatdan kuchlanishga nisbatan 90° oldinda bo'ladi (2.11-rasm, b). Tokning amplituda qiymati kuchlanish amplitudasining sig'im qarshiligiga nisbati bilan aniqlanadi:

$$I_m = \frac{U_m}{x_c} = \frac{U_m}{1/\omega C} = \omega C U_m,$$

bu yerda, $x_c = \frac{1}{\omega C} \left[\frac{1}{(1/C)KI/V} \right] = \left[\frac{V}{A} \right] = [\Omega]$ — sig'im qarshiligi.

Sig'im qarshiligi chastotaga teskari proporsionaldir, ya'ni chastota oshsa, sig'im qarshiligi kamayadi va aksincha. i , u , p lar oniy qiymatlarining grafi 2.11-rasm, d da keltirilgan.

Zanjirdagi oniy quvvat:

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \cos \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t.$$

Davrning birinchi choragida kondensator manbadan energiyani qabul qilib oʻzida elektr maydoni hosil qiladi. Davrning ikkinchi choragida kuchlanish kondensatorida maksimumdan nolgacha kamayadi va yigʻilgan elektr maydoni energiyasi orqaga-manbaga qaytariladi. Oniy quvvat bu vaqtda manfiy. Davrning uchinchi choragida energiya yana elektr maydon energiyasi koʻrinishida kondensatorida yigʻiladi va keyingi choragida esa, orqaga-manbaga qaytadi va hokazo.

Agar $i = C \frac{du_c}{dt}$ tenglamani integrallasak, u holda quyidagini hosil qilamiz: $u_c = \frac{1}{C} \int idt$.

Bu tenglama yordamida kondensator kuchlanishini undan oʻtayotgan tok orqali aniqlash mumkin.

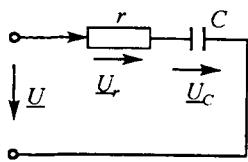
2.6.5. Rezistor va kondensatordan iborat zanjir

R va C elementlari ketma-ket ulangan zanjirda (2.12-rasm, a) kirish kuchlanishining taʼsir etuvchi qiymati Kirxgofning ikkinchi qonuniga koʻra $\underline{U} = \underline{U}_r + \underline{U}_c$ ga teng.

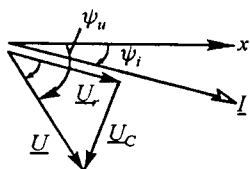
Zanjirdan oʻtadigan tok $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ va $\psi_i < 0$ deb vektor diagrammani quramiz. Tok vektorini absissa oʻqiga nisbatan ψ_i burchak ostida manfiy, yaʼni soat strelkasi harakati yoʻnalishida quramiz (2.12-rasm, b). Rezistordagi \underline{U}_r kuchlanish vektori \underline{I} tok vektori bilan faza boʻyicha mos tushadi, kondensatordagi \underline{U}_c kuchlanish vektori \underline{U}_r vektoridan 90° ga orqada qoladi. Ikkita vektorning yigʻindisi manba kuchlanishi \underline{U} vektorini hosil qiladi. Bu vektor diagrammadan:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_c^2}} = \frac{U}{z}, \text{ bu yerda } z = \sqrt{r^2 + x_c^2} \text{ — zanjirning toʻla qarshiligi.}$$

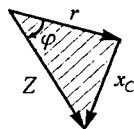
Qarshiliklar uchburchagi 2.12-rasm, d da keltirilgan.



a)



b)



d)

2.12-rasm.

Zanjir elementlaridagi kuchlanishlarning oniy qiymatlari:

$$u_r = I_m r \sin(\omega t + \psi_i) = U_{mr} \sin(\omega t + \psi_i),$$

$$u_c = I_m x_c \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ) = U_{mc} \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ),$$

$$u = I_m z \sin(\omega t + \psi_i + \varphi) = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi).$$

2.6.6. Rezistor, induktiv g'altak va kondensator ketma-ket ulangan sinusoidal tok zanjiri

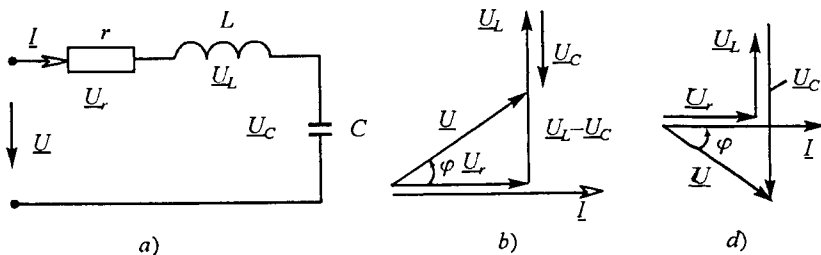
r , L va C elementlari ketma-ket ulangan zanjir (2.13-rasm, a) dan $i = I_m \sin \omega t$ sinusoidal tok o'tganda uning elementlarida pasaygan sinusoidal kuchlanishlarning algebraik yig'indisiga teng bo'lgan kuchlanish hosil bo'ladi. Kirxgofning 2-qonuniga ko'ra:

$$u = u_r + u_L + u_C \text{ yoki } \underline{U} = \underline{U}_r + \underline{U}_L + \underline{U}_C.$$

r qarshilikdagi kuchlanish faza jihatdan tok bilan mos, L induktivlikdagi kuchlanish tokdan 90° oldinda, C sig'imdagi kuchlanish esa tokdan 90° orqada bo'ladi (2.13-rasm, b). Om qonunidan foydalanib quyidagini yozishimiz mumkin:

$$\begin{aligned} u &= ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = rI_m \sin \omega t + \omega LI_m \cos \omega t - \frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t = \\ &= rI_m \sin \omega t + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) I_m \cos \omega t = rI_m \sin \omega t + xI_m \cos \omega t. \end{aligned}$$

Bu tenglama kuchlanishlar oniy qiymatlari uchun Kirxgofning 2-qonunining *trigonometrik shakli* deb ataladi. Undagi $x = x_L - x_C =$ kattalik zanjirning *reaktiv qarshiligi* deb ataladi. $x_L > x_C$ bo'lganda, $x > 0$ va $\varphi > 0$ bo'lib (2.13-rasm, b), zanjir *induktiv xarakterga*, $x_L < x_C$ bo'l-



2.13-rasm

ganda esa, $x < 0$ va $\varphi < 0$ bo'lib (2.13-rasm, *d*), zanjir *sig'im xarakterga*, $x_L = x_C$ bo'lganda $x = 0$ va $\varphi = 0$ bo'lib, zanjir *aktiv xarakterga* ega bo'ladi.

Yuqoridagi tenglamadan U_m va φ larni topish uchun quyidagi trigonometrik munosabatlardan foydalanamiz:

$$m \sin \alpha \pm n \cos \alpha = \sqrt{m^2 + n^2} \sin(\alpha \pm \varphi), \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{n}{m}.$$

Bu munosabatlarni va qarshiliklar uchburchagini hisobga olib:

$$U_m = \sqrt{r^2 + x^2} I_m, \quad \operatorname{tg} \varphi = x/r = (x_L - x_C)/r.$$

Tok va kuchlanishlarning ta'sir etuvchi qiymatlari uchun:

$$U = \sqrt{r^2 + x^2} I = zI, \quad \text{bundan } I = U / \sqrt{r^2 + x^2},$$

$$\text{bu yerda } z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \text{ — zanjirning to'la qarshiligi.}$$

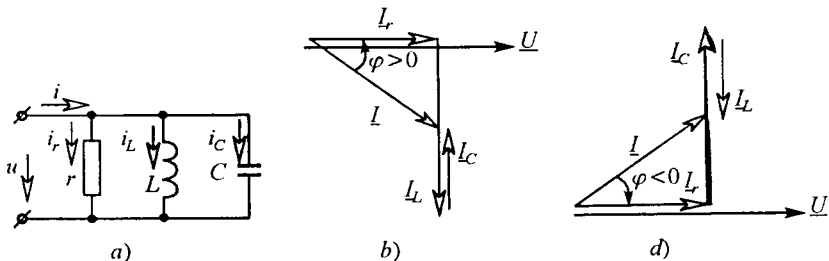
Ko'rilayotgan zanjir uchun tok va kuchlanishlar vektor diagrammasini quramiz (2.13-rasm, *b*). Uni tok vektori \underline{I} ni qurishdan boshlaymiz. r elementdagi kuchlanish vektori \underline{U}_r tok \underline{I} bilan faza jihatdan mos, L elementdagi kuchlanish vektori \underline{U}_L tok \underline{I} dan 90° ga oldinda, C elementdagi kuchlanish vektori \underline{U}_C tok \underline{I} vektoridan 90° ga orqada bo'ladi. \underline{U} kuchlanish vektori Kirxgofning 2-qonuniga ko'ra \underline{U}_r , \underline{U}_L va \underline{U}_C vektorlarning yig'indisi ko'rinishida quriladi. Tok bilan zanjir qismlaridagi kuchlanish vektorlari orasidagi faza siljish burchagi $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{x}{r}$ ga teng bo'ladi.

2.6.7. Rezistor, induktiv g'altak va kondensator parallel ulangan sinusoidal tok zanjiri

r , L va C elementlari parallel ulangan zanjir (2.14-rasm, *a*) $u = U_m \sin \omega t$ sinusoidal kuchlanish manbaiga ulansa, undan o'tadigan sinusoidal tok Kirxgofning 1-qonuniga ko'ra zanjir har bir elementidan o'tayotgan toklarning algebraik yig'indisiga teng:

$$i = i_r + i_L + i_C.$$

r qarshilikdagi tok i_r kuchlanish bilan faza jihatdan mos, induktivlikdagi tok i_L 90° ga orqada, sig'imdagi tok i_C 90° ga oldinda bo'ladi. Zanjirdagi umumiy tok:



2.14-rasm.

$$\begin{aligned}
 I_m \sin(\omega t - \varphi) &= \frac{1}{r} U_m \sin \omega t - \frac{1}{\omega L} U_m \cos \omega t + \omega C U_m \cos \omega t = \\
 &= U_m \left[\frac{1}{r} \sin \omega t - \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \cos \omega t \right] = U_m [g \sin \omega t - b \cos \omega t].
 \end{aligned}$$

Oxirgi tenglama toklar niy qiymatlari uchun Kirxgof 1-qonunining *trigonometrik shakli* hisoblanadi.

$b = b_L - b_C = (1/\omega L) - \omega C$ — zanjirning *reaktiv o'tkazuvchanligi* deb ataladi. $b_L > b_C$ bo'lganda, $b > 0$ va $\varphi > 0$ bo'lib (2.14-rasm, b), zanjir *induktiv xarakterga*, $b_L < b_C$ bo'lganda, $b < 0$ va $\varphi < 0$ bo'lib (2.14-rasm, d), zanjir *sig'im xarakterga*, $b_L = b_C$ bo'lganda esa $b = 0$ va $\varphi = 0$ bo'lib, zanjir *aktiv xarakterga* ega bo'ladi.

I_m va φ quyidagi munosabatlar yordamida aniqlanadi:

$$I_m = \sqrt{g^2 + b^2} U_m = y U_m, \quad \operatorname{tg} \varphi = b/g,$$

bu yerda $y = \sqrt{g^2 + b^2}$ — zanjirning to'la o'tkazuvchanligi.

Toklar va kuchlanish orasidagi faza siljish burchagi quyidagi formula yordamida topiladi:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{(1/\omega L - \omega C)}{g} = \operatorname{arctg} \frac{b}{g}.$$

Ko'rilayotgan zanjir uchun tok va kuchlanish vektor diagrammasini quramiz (2.14-rasm, b). Diagrammani kuchlanish vektori \underline{U} ni qurishdan boshlaymiz. r elementdagi tok vektori \underline{I}_r kuchlanish vektori bilan mos, L elementdagi tok vektori undan 90° ga orqada, C elementdagi tok vektori esa \underline{U} dan 90° ga oldinda bo'ladi. Umumiy tok vektori \underline{I} uchala elementlardagi tok vektorlarining geometrik yig'indisiga teng bo'ladi.

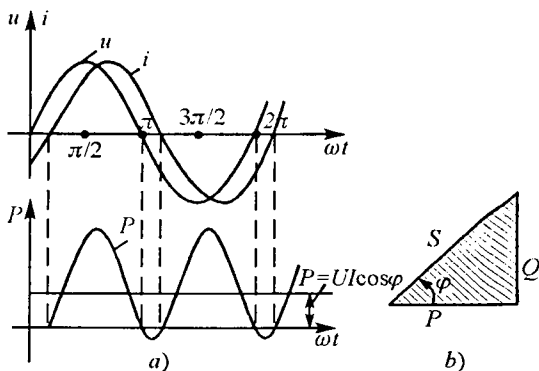
2.7. SINUSOIDAL TOK ZANJIRIDA QUVVAT

Sinusoidal tok zanjirining r , L va C kabi ayrim elementlaridagi energetik munosabatlar avvalgi paragraflarda ko'rib chiqildi. Endi umumiy holat, ya'ni zanjirdagi kuchlanish $u = U_m \sin \omega t$ va tok $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ ga teng bo'lgan holat uchun energetik munosabatlarni ko'rib chiqamiz.

Zanjirdagi oniy quvvatni aniqlaymiz:

$$p = ui = U_m I_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = UI [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)].$$

Oniy quvvat ikkita: doimiy ($UI \cos \varphi$) va ikkilangan chastota bilan o'zgaruvchi kosinusoidal ($UI \cos(2\omega t - \varphi)$) tashkil etuvchilardan iborat. Induktiv xarakterli $\varphi > 0$ zanjirdagi tok, kuchlanish va quvvat oniy qiymatlarining grafigi 2.15-rasm, a da keltirilgan.



2.15-rasm.

Davrning kuchlanish va tok ishoralari bir xil bo'lgan qismlarida oniy quvvat musbat energiya manbaidan iste'mol qilinadi: bir qismini rezistorda iste'mol qilinadi, qolgan qismi esa g'altak magnit maydoniga to'planadi. Davrning kuchlanish va tok ishoralari har xil bo'lgan qismlarida oniy quvvat manfiy, energiya qisman iste'molchidan manbaga qaytariladi. Rezistorda iste'mol qilinayotgan aktiv quvvat oniy quvvatning bir davr mobaynidagi o'rtacha qiymatiga teng:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi. \quad (2.2)$$

$\cos \varphi$ ko'paytma quvvat koeffitsiyenti deb ataladi. (2.2) ifodadan ko'rinib turibdiki, zanjirning aktiv quvvati kuchlanish, tok ta'sir etuvchi qiymatlari va quvvat koeffitsiyentlarining ko'paytmasiga teng.

Zanjirdagi tok va kuchlanishlar orasidagi faza siljish burchagi φ nolga qancha yaqin bo'lsa, $\cos \varphi$ birga shuncha yaqin bo'ladi. Bunda U va I larning berilgan qiymatlarida $\cos \varphi$ qancha katta bo'lsa, shuncha ko'p aktiv quvvat manbaidan iste'molchiga uzatiladi.

Aktiv quvvatni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$P = zI^2 \cos\varphi = rI^2, \quad P = yU^2 \cos\varphi = gU^2.$$

Kuchlanish va tokning berilgan qiymatlarida aktiv quvvatning maksimal qiymati zanjirning to'la quvvati deb ataladi: $S = UI$ [V · A].

Aktiv quvvat ifodasidan: $\cos\varphi = P/S$.

Elektr zanjirini hisoblashda va amaliyotda reaktiv quvvat tushunchasidan foydalaniladi:

$$Q = UI \sin\varphi = I^2x = U^2b [\text{VAr}].$$

Reaktiv quvvat manba bilan iste'molchi o'rtasidagi energiya almashinuvi tezligini tavsiflaydi va reaktiv tok iste'molining o'lchovi hisoblanadi. Zanjir induktiv xarakterga ega ($\varphi > 0$) bo'lganda reaktiv quvvat musbat, sig'im xarakterga ega ($\varphi < 0$) bo'lganda esa manfiy bo'ladi. Aktiv, reaktiv va to'la quvvatlar o'zaro quyidagicha bog'langan (2.15-rasm, b):

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad \sin\varphi = \frac{Q}{S}, \quad \text{tg}\varphi = \frac{Q}{P}.$$

2.8. SINUSOIDAL TOK ZANJIRLARINI KOMPLEKS USULDA HISOBLASH

Sinusoidal tok zanjirlarini kompleks usulda hisoblashni amerikalik olim I. Shteynmets 1894-yilda ishlab chiqqan. Bu usul bilan hisoblashning asosida sinusoidal tok zanjiri uchun tuzilgan differensial tenglamalarni algebraik tenglamalar bilan almashtirish yotadi. Bunda tok va kuchlanishlarning oniy qiymatlari ularning kompleks tasvirlari bilan almashtiriladi, ya'ni vaqt funksiyasidagi integro-differensial tenglamalardan kompleks shaklda yozilgan va vaqt kattaligi istisno qilingan algebraik tenglamalar hosil qilinadi. Bu esa, tabiiyki zanjirlarni hisoblashni ancha soddalashtiradi.

2.8.1. Sinusoidal kattaliklarni kompleks tekislikda vektorlar bilan tasvirlash

Ma'lumki har qanday kompleks son haqiqiy va mavhum qismlardan iborat. 2.16-rasmda kompleks tekislik keltirilgan. Absissa o'qi *haqiqiy sonlar o'qi*, ordinata o'qi esa *mavhum sonlar o'qi* hisoblanadi. Kompleks

tekislikda haqiqiy sonlar o'qi +1 belgi bilan, mavhum sonlar o'qi esa $+j$ ($j = \sqrt{-1}$) bilan belgilanadi. Agar kompleks tekislikda abssissa o'qiga kompleks sonning haqiqiy qismini, ordinata o'qiga esa mavhum qismini joylashtirsak, u holda kompleks son tekislikda bir nuqtani ifodalaydi. Eylar formulasiga binoan $e^{j\alpha} = \cos\alpha + j\sin\alpha$ Kompleks son $e^{j\alpha}$ kompleks tekislikda vektor ko'rinishda tasvirlanadi, uning amplitudasi 1 ga teng va α burchakning musbat yo'nalishi haqiqiy sonlar o'qi (+1) ga nisbatan soat miliga teskari yo'nalishda hisoblanadi. $e^{j\alpha}$ funksiyaning moduli birga teng:

$$|e^{j\alpha}| = \sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} = 1.$$

$e^{j\alpha}$ funksiya vektorining haqiqiy o'qqa proyeksiyasi $\cos\alpha$ ga teng, mavhum o'qqa proyeksiyasi esa $\sin\alpha$ ga teng. Agar funksiya o'rniga $I_m e^{j\alpha}$ funksiyasini olsak, u holda

$$I_m e^{j\alpha} = I_m \cos\alpha + j I_m \sin\alpha \quad (2.3)$$

ifoda hosil bo'ladi.

Kompleks tekislikda bu funksiyaning (+1) o'qiga nisbatan burchagi α ga teng, faqat vektorning uzunligi I_m marta kattadir. (2.3) formuladagi α burchak qiymati har xil bo'lishi mumkin. Masalan, $\alpha = \omega t + \psi_i$ (2.16-rasm, b), ya'ni α burchak t vaqtga proporsional o'zgarsa, u holda

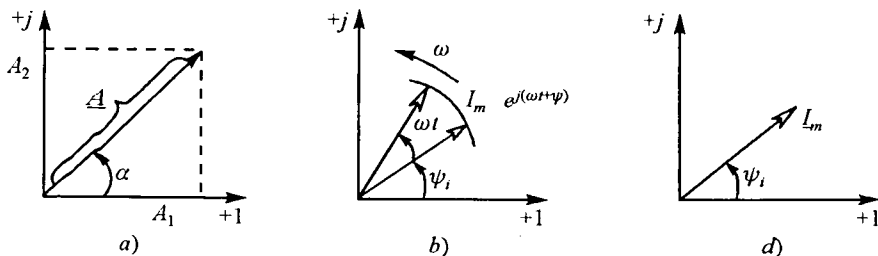
$$I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = I_m \cos(\omega t + \psi_i) + j I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

$I_m \cos(\omega t + \psi_i)$ tashkil etuvchi $I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$ ifodaning haqiqiy (Re) qismi bo'lib, u quyidagicha ifodalanadi:

$$Re[I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}] = I_m \cos(\omega t + \psi_i).$$

$I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ tashkil etuvchi $I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$ ifodaning mavhum I_m qismi bo'lib, u quyidagicha yoziladi:

$$Im[I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}] = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$



2.16-rasm.

Shunday qilib, sinusoidal tokni $i = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$ ko‘rinishda yozish mumkin. Bu aylanuvchi vektor $\underline{I}_m = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$ ning $+j$ o‘qiga proyeksiyasidir. Kompleks tekislikda sinusoidal kattaliklarni vektor tasvirlarini $\omega t = 0$ dagi holatini tasvirlash qabul qilingan. Bu holda $\underline{I}_m = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$ vektor $\omega t = 0$ bo‘lganda quyidagicha ifodalanadi:

$$I_m e^{j\psi_i} = \underline{I}_m.$$

\underline{I}_m — kompleks tok, uning moduli I_m ga, argumenti esa vektorni haqiqiy sonlar o‘qiga nisbatan hosil qilgan burchagi (boshlang‘ich faza ψ_i) ga teng bo‘ladi (2.16-rasm, d).

2.8.2. Om va Kirxgof qonunlarining kompleks shakli

Om va Kirxgof qonunlarining kompleks shaklini hosil qilish uchun r , L va C elementlari ketma-ket ulangan zanjirni ko‘rib chiqamiz (2.13-rasm).

Bu zanjir uchun:

$$u_r + u_L + u_C = u \text{ yoki } ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = u,$$

bu yerda

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

$$u_L = \omega L I_m \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ), \quad u_C = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ)$$

Yuqoridagi tenglamalarni kompleks shaklda yozamiz:

$$\begin{aligned} \underline{I}_m &= I_m e^{j\psi_i}, & \underline{U}_{r_m} &= r I_m e^{j\psi_i} = r \underline{I}_m, & \underline{U}_{L_m} &= \omega L I_m e^{j(\psi_i + 90^\circ)} = \omega L I_m e^{j\psi_i} e^{j90^\circ} = \\ & & & & & = \omega L I_m e^{j\psi_i} (\cos 90^\circ + j \sin 90^\circ) = j \omega L I_m e^{j\psi_i} = j \omega L \underline{I}_m \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{C_m} = \frac{1}{\omega C} I_m e^{j(\psi_i - 90^\circ)} = \frac{1}{\omega C} I_m e^{j\psi_i} e^{-j90^\circ} = -j \frac{1}{\omega C} \underline{I}_m.$$

Hosil qilingan tenglamalardan ko‘rinib turibdiki, sinusoidal kattaliklarni kompleks sonlar bilan almashtirishda *differensiallash amali $j\omega$ bilan, integrallash amali esa $1/j\omega$ bilan almashtiriladi.*

Ko‘rilayotgan zanjir uchun Kirxgof qonuning kompleks shakli quyidagicha yoziladi:

$$\underline{U}_{r_m} + \underline{U}_{L_m} + \underline{U}_{C_m} = \underline{U}_m \text{ yoki } r \underline{I}_m + j \omega L \underline{I}_m - j \frac{1}{\omega C} \underline{I}_m = \underline{U}_m.$$

bundan

$$\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_m}{r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}}$$

yoki ta'sir etuvchi qiymatlar uchun $\underline{I} = \underline{U}/\underline{Z}$.

Oxirgi tenglik Om qonunining kompleks shakli deb ataladi. Demak, sinusoidal tok zanjiridagi kompleks tok unga berilgan kompleks kuchlanishga to'g'ri proporsional, zanjirning to'la kompleks qarshiligiga esa teskari proporsionaldir.

$$\underline{Z} = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = r + jx = z \cos \varphi + jz \sin \varphi = \sqrt{r^2 + x^2} \cdot e^{j\varphi} = ze^{j\varphi}.$$

— *zanjirning kompleks qarshiligi* deb ataladi. Bunda kompleks qarshilikning haqiqiy qismi-aktiv qarshilik, mavhum qismi-reaktiv qarshilikka teng bo'ladi.

To'la kompleks qarshilikka teskari bo'lgan kattalik to'la *kompleks o'tkazuvchanlik* deb ataladi:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{ze^{\pm j\varphi}} = ye^{\mp j\varphi} = y \cos \varphi \mp jy \sin \varphi = g \mp jb,$$

bunda $y = \sqrt{g^2 + b^2}$, $\varphi = \arctg \frac{b}{g}$ — mos ravishda to'la kompleks o'tkazuvchanlikning *moduli* va *argumenti*.

Sinusoidal tok zanjirlari uchun Kirxgof qonunlari kompleks tok va kuchlanishlar orqali quyidagicha ifodalanadi:

Zanjirning istalgan tugunidagi kompleks toklarning algebraik yig'indisi nolga teng (Kirxgofning 1-qonuni):

$$\sum_{k=1}^n \underline{I}_k = 0.$$

Zanjirning istalgan berk konturida kompleks EYK larning algebraik yig'indisi shu kontur kompleks qarshiliklaridagi kompleks kuchlanishlar pasayishlarining algebraik yig'indisiga teng (Kirxgofning 2-qonuni):

$$\sum_{k=1}^n \underline{E}_k = \sum_{q=1}^m \underline{I}_q \underline{Z}_q.$$

2.8.3. Kompleks quvvat

To'la quvvatni kompleks ko'rinishda yozish uchun kompleks kuchlanishni qo'shma kompleks tokka ko'paytiramiz:

$$\tilde{S} = \underline{U} \underline{I}^* = UIe^{\pm j\varphi} = UI \cos \varphi \pm jUI \sin \varphi = P \pm jQ.$$

bunda \underline{I}^* — qo'shma kompleks tok. Masalan, agar $\underline{I} = I_m e^{-j\varphi}$ bo'lsa, u holda bu tokning qo'shmasi $\underline{I}^* = I_m e^{j\varphi}$ bo'ladi. \tilde{S} — kompleks to'la quvvat deb ataladi. Uning haqiqiy qismi aktiv quvvatga, mavhum qismi esa reaktiv quvvatga teng, ya'ni:

$$P = \operatorname{Re} \left[\underline{U} \underline{I}^* \right] = \operatorname{Re} [\tilde{S}]; \quad Q = \operatorname{Im} \left[\underline{U} \underline{I}^* \right] = \operatorname{Im} [\tilde{S}].$$

Masala. agar tok va kuchlanishning oniy qiymat ifodalari mos ravishda $i = 141 \sin(314t + 60^\circ)$ A, $u = 7,07 \sin(314t + 30^\circ)$ V ko'rinishida berilgan bo'lsa, aktiv, reaktiv va to'la quvvatlar aniqlansin.

Yechish. Tok va kuchlanishning kompleks ta'sir etuvchi qiymatlarini yozib olamiz:

$$\underline{U} = \frac{141}{\sqrt{2}} e^{j60^\circ} = 100 e^{j60^\circ} \text{ V}; \quad \underline{I} = \frac{7,07}{\sqrt{2}} e^{j30^\circ} = 5 e^{j30^\circ} \text{ A}.$$

Kompleks to'la quvvati:

$$\begin{aligned} \tilde{S} = \underline{U} \underline{I}^* &= 100 e^{j60^\circ} \cdot 5 e^{-j30^\circ} = 500 e^{j30^\circ} = 500 \cos 30^\circ + j500 \sin 30^\circ = \\ &= 433 + j250 \text{ V} \cdot \text{A}. \end{aligned}$$

Shunday qilib, $S = 500 \text{ V} \cdot \text{A}$, $P = 433 \text{ W}$, $Q = 250 \text{ VAR}$.

2.8.4. Sinusoidal tok zanjirlarida quvvatlar balansi

Energiya saqlanish qonunidan ma'lumki, har qanday zanjirda aktiv quvvatlar balansi saqlanadi: manbalar uzatayotgan aktiv quvvatlar yig'indisi iste'molchilar qabul qilayotgan aktiv quvvatlar yig'indisiga teng:

$$\sum_{k=1}^m P_{km} = \sum_{k=1}^n I_k^2 r_k,$$

bu yerda m — manbalar soni, n — iste'molchilar soni.

Zanjirdagi manbalar uzatayotgan reaktiv quvvatlar yig'indisi sxema dagi induktiv g'altak va kondensatorlar iste'mol qilayotgan reaktiv quvvatlarning algebraik yig'indisiga teng:

$$\sum_{k=1}^m Q_{km} = \sum_{k=1}^n I_k^2 x_k.$$

Kompleks quvvatlar balansi:

$$\sum_{k=1}^m \tilde{S}_{km} = \sum_{k=1}^n \tilde{S}_k.$$

Zanjir elementlarining kompleks qarshiliklari yig'indisi teng bo'lsada, ular modullarining yig'indisi umumiy holda teng bo'lmashligi mumkin. Shuning uchun to'la quvvatlar balansi har doim ham saqlanmasligi mumkin, ya'ni:

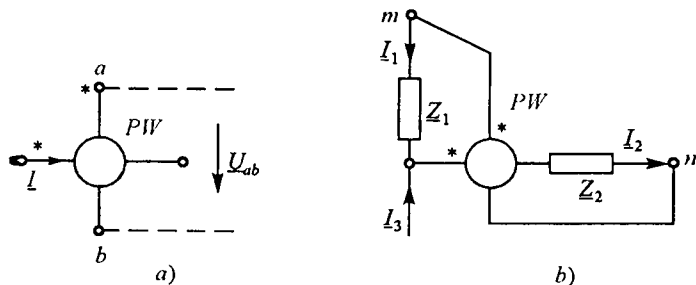
$$\sum_{k=1}^m S_{km} \neq \sum_{k=1}^n S_k.$$

Bir fazali sinusoidal tok zanjirlarida aktiv quvvatni o'lchash uchun elektrodinamik yoki ferrodinamik vattmetrlar qo'llaniladi (2.17-rasm, a). Bunda vattmetrning belgilangan I^* tok va U^* kuchlanish qismlari (generator qismlari) manba qismlariga ulanadi.

Sinusoidal tok zanjirida reaktiv quvvatni o'lchash uchun tok va kuchlanish vektorlari orasidagi faza siljish burchagi 90° ga farq qilishi kerak. Bunda vattmetr strelkasining burchagi:

$$\alpha = S_p UI \cos(\pi/2 - \varphi) = S_p UI \sin \varphi.$$

$\varphi = 90^\circ$ li burchak asbobning parallel qismiga qo'shimcha rezistor va g'altakdan iborat zanjirni ulash bilan hosil qilinadi. Shuni aytib o'tish



2.17-rasm.

joizki, bir fazali zanjirlarda reaktiv quvvat faqat laboratoriya ta'dqiqotlarida o'lanadi.

To'la quvvatni hisoblash uchun tok I va kuchlanish U ni ampermetr va voltmeter yordamida o'lingan qiymatlari ko'paytiriladi: $S = UI$.

Masala. 2.17-rasm, b da keltirilgan vattmetr ko'rsatkichini aniqlang. Quyidagilar berilgan:

$$I_1 = 10e^{-j37^\circ} \text{ A}, I_3 = 8e^{-j15^\circ} \text{ A}, Z_1 = 2 \Omega, Z_2 = 1,8e^{-j44^\circ} \Omega.$$

Yechish. Vattmetr orqali o'tadigan tok quyidagiga teng:

$$I_2 = I_1 + I_3 = 8e^{-j15^\circ} + 10e^{j37^\circ} = 8\cos 15^\circ - j8\sin 15^\circ + \\ + 10\cos 37^\circ + j10\sin 37^\circ = 16,2e^{j14^\circ} \text{ A}.$$

Vattmetr parallel g'altagidagi kuchlanish:

$$U_{mn} = I_1 Z_1 + I_2 Z_2 = 10e^{j37^\circ} \cdot 2 + 16,2e^{j14^\circ} \cdot 1,8e^{-j44^\circ} = 41 - j2,5 = 41,03e^{-j3,5^\circ} \text{ V}.$$

Vattmetr ko'rsatkichi:

$$P = \operatorname{Re} \left[\underline{U}_{mn} \underline{I}_2^* \right] = \operatorname{Re} \left[41,03e^{-j3,5^\circ} \cdot 16,2e^{-j14^\circ} \right] = \operatorname{Re} \left[665e^{-j17,5^\circ} \right] = \\ = 665 \cos 17,5^\circ = 634 \text{ W}.$$

2.8.5. Sinusoidal tok zanjirlarini kompleks usulda hisoblash

Sinusoidal tok zanjirlarini hisoblashda o'zgarmas tok zanjirlarini hisoblashda qo'llanilgan barcha usullardan foydalaniladi. Bunda tuzilgan tenglamalardagi tok, kuchlanish, EYK va qarshiliklar kompleks shaklda yoziladi. Sinusoidal tok zanjirini hisoblashdagi o'ziga xos xususiyatlarni aniqroq tasavvur qilish uchun ayrim zanjirlarni kompleks usulda hisoblashni ko'rib chiqamiz.

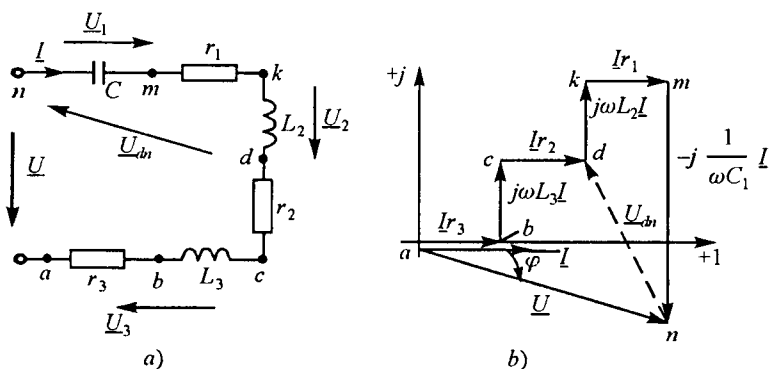
Shoxobchalanmagan zanjirni hisoblash. Kuchlanishlarning topografik vektor diagrammasi.

2.18-rasm, a da keltirilgan zanjirni ko'rib chiqamiz. Manba kuchlanishi va iste'molchilar parametrlari berilgan.

Zanjirning to'la qarshiligi:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 = r_1 - jx_{C1} + r_2 + jx_{L2} + r_3 + jx_{L3} = r + jx = ze^{j\varphi},$$

bu yerda $r = r_1 + r_2 + r_3$, $x = -x_{C1} + x_{L2} + x_{L3}$, $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{x}{r}$



2.18-rasm.

Om qonuni asosida zanjirdagi tok va uning elementlaridagi kuchlanishlarni topamiz:

$$I = \underline{U}/Z, \quad \underline{U}_1 = IZ_1 = I(r_1 - jx_{C_1}), \quad \underline{U}_2 = IZ_2 = I(r_2 + jx_{L_2}),$$

Zanjirning to'la, aktiv va reaktiv quvvatlari:

$$\tilde{S} = \underline{U} \underline{I}^* = P + jQ = \tilde{S}_1 + \tilde{S}_2 + \tilde{S}_3 = \underline{U}_1 \underline{I}^* + \underline{U}_2 \underline{I}^* + \underline{U}_3 \underline{I}^*,$$

$$P = \operatorname{Re}|\tilde{S}| = \sum_{k=1}^n I^2 r_k = \sum_{k=1}^n P_k = P_1 + P_2 + P_3,$$

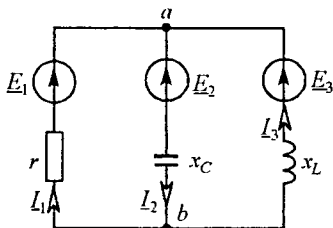
$$Q = I_m |\tilde{S}| = \sum_{k=1}^n I^2 x_k = \sum_{k=1}^n Q_k = -Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

Zanjirdagi jarayonlarni grafik tasvirlash uchun kuchlanishlar vektor diagrammasi qurilgan (2.18-rasm, b).

Bu diagrammada istalgan vektor parallel ravishda ko'chirilishi mumkin. Kirxgofning 2-qonuni asosida vektor diagramma qurilganda vektorlar ixtiyoriy ketma-ketlikda qurilishi mumkin.

Kuchlanishlar topografik vektor diagrammasi deb shunday vektor diagrammaga aytiladiki, unda kuchlanishlar vektorlari zanjir elementlarining o'zaro ulanish ketma-ketligi bo'yicha quriladi. Bunda kuchlanishlar vektor diagrammalari topologiyasi zanjir topologiyasi bilan bir xil bo'ladi, ya'ni vektorlarning o'zaro ulangan nuqtasiga zanjirning shu vektorlar tavsiflayotgan elementlarining ulangan nuqtasi mos keladi.

Topografik diagramma zanjirning istalgan nuqtalari orasida kuchlanishni osongina aniqlash imkonini beradi. Masalan, 2.18-rasm, *b* dagi vektor diagrammada \underline{U}_{dn} kuchlanish *n* nuqtadan *d* nuqtaga yo‘nalgan vektor ko‘rinishida ko‘rsatilgan.



2.19-rasm.

Masala. Agar elektr zanjirda (2.19-rasm) $\underline{E}_1 = 120 \text{ V}$; $\underline{E}_2 = 120e^{j120^\circ} \text{ V}$; $\underline{E}_3 = 120e^{-j240^\circ} \text{ V}$; $r = x_L = x_C = 10 \Omega$ bo‘lsa, shoxobchalardagi toklar aniqlansin.

Yechish. Ushbu zanjirni ikki tugun usuli yordamida hisoblash osonroq. Buning uchun shoxobchalarning kompleks o‘tkazuvchanliklarini aniqlaymiz:

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{r} = 0,1 \text{ Sm}; \quad \underline{Y}_2 = \frac{1}{-jx_C} = j0,1 \text{ Sm}; \quad \underline{Y}_3 = \frac{1}{jx_L} = -j0,1 \text{ Sm}.$$

Ikki tugun orasidagi kompleks kuchlanishni topamiz:

$$\underline{U}_{ab} = \frac{\underline{E}_1 \underline{Y}_1 + \underline{E}_2 \underline{Y}_2 + \underline{E}_3 \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} = \frac{120 \cdot 0,1 + 120e^{-j120^\circ} \cdot j0,1 + 120e^{-j240^\circ} \cdot (-j0,1)}{0,1 + j0,1 - j0,1} = 328 \text{ V}.$$

Om qonuni bo‘yicha shoxobchalardagi toklar:

$$\underline{I}_1 = (\underline{E}_1 - \underline{U}_{ab}) \underline{Y}_1 = (120 - 328) \cdot 0,1 = -20,8 \text{ A}.$$

$$\underline{I}_2 = (-\underline{E}_2 + \underline{U}_{ab}) \underline{Y}_2 = (-120e^{j120^\circ} + 328) \cdot j0,1 = -40e^{j105^\circ} \text{ A},$$

$$\underline{I}_3 = (-\underline{E}_3 + \underline{U}_{ab}) \underline{Y}_3 = (120e^{-j240^\circ} - 328) \cdot (-j0,1) = -40e^{j75^\circ} \text{ A}.$$

2.9. ELEKTR ZANJIRLARIDA REZONANS

Elektr zanjirlarida reaktiv qarshiliklar musbat, manfiy va nolga teng bo‘lishi mumkin. Zanjirda induktiv va sig‘im elementlar bo‘lganda zanjirning kirish reaktiv qarshiligi nolga teng bo‘lishi mumkin. Bunda zanjir aktiv xarakterga ega bo‘lib, tok bilan kuchlanish orasidagi faza siljish burchagi nolga teng bo‘ladi. Elektr zanjirlaridagi bu hodisa *rezonans* deb ataladi.

r, *L* va *C* elementlari ketma-ket (paralel) ulangan sinusoidal tok zanjirining xususiy chastotasi $\omega = 1/\sqrt{LC}$ manba kuchlanishining chastotasi $\omega = 2\pi f$ ga teng bo‘lganda $x_L = x_C$, ($b_L = b_C$) va $|U_L| = |U_C|$, ($|I_L| = |I_C|$) bo‘lib, reaktiv elementlardagi kuchlanish (tok)lar modul

jihatdan bir-biriga teng hamda manba kuchlanishi (toki)dan bir necha marta ortib ketadi. *Elektr zanjirlaridagi bu rejim kuchlanishlar (toklar) rezonansi deb ataladi.* Bunday holatda zanjirning reaktiv quvvati nolga teng bo‘ladi. *Rezonans yuzaga keladigan chastota rezonans chastotasi deb ataladi.*

Elektr zanjirlaridagi rezonans rejimlaridan elektrotexnikada, radio-texnikada va elektr o‘zgartkichlarda keng foydalaniladi. Ayrim hollarda esa, zanjirda rezonans hodisasi yuzaga kelishi noqulayliklarni tug‘diradi (masalan, uzatish liniyalarida va transformatorlarda kuchlanish va toklarning keskin ortib ketishi o‘lchash asboblarning hamda izolyatsiyaning ishdan chiqishiga olib keladi).

2.9.1. Kuchlanishlar rezonansi

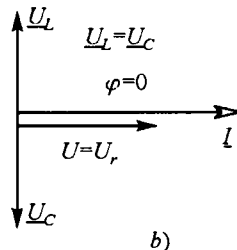
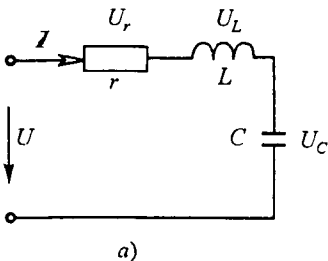
r , L va C elementlari ketma-ket ulangan zanjirni ko‘rib chiqamiz (2.20-rasm, a). Zanjirning kompleks qarshiligi:

$$\underline{Z} = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right).$$

Kuchlanishlar rezonansi shartiga ko‘ra: $X = \omega L - 1/\omega C = 0$ yoki $\omega L = 1/\omega C$, bunda $\omega_r = 1/\sqrt{LC}$ — rezonans chastotasi.

Kuchlanishlar rezonansi rejimi uchun tok va kuchlanishlar vektor diagrammasi 2.20-rasm, b da keltirilgan. Unda reaktiv elementlardagi kuchlanishlarning modul qiymatlari teng, yo‘nalishlari esa qarama-qarshi. Rezonans shartidan ko‘rinib turibdiki, zanjirda bu rejimni hosil qilish uchun manba chastotasini rostlab yoki zanjir xususiy chastotasini L yoki C ni o‘zgartirish (rostlash) hisobiga hosil qilish mumkin.

Rezonans rejimida zanjirning to‘la qarshiligi minimal bo‘lib, aktiv qarshilikka teng bo‘ladi:



2.20-rasm.

$$Z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = r.$$

Zanjirdagi tok bu paytda maksimal qiymatga erishadi:

$$I = U/Z = U/r.$$

r qarshilikdagi kuchlanish pasayishi manba kuchlanishiga teng bo'ladi:

$$U_r = Ir = U.$$

Rezonans rejimidagi induktiv yoki sig'im qarshilik rezonans zanjir (kontur)ining to'liqin qarshiligi deb ataladi:

$$\rho = \omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Agar zanjirda $\rho \gg r$ shart bajarilsa, u holda reaktiv elementlardagi kuchlanishlar manba kuchlanishidan ko'p marta ortiq bo'ladi.

U_L yoki U_C ning U dan necha marta katta bo'lishi konturning aslliligi bilan tavsiflanadi:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{I_r \omega_r L}{I_r r} = \frac{\omega_r L}{r} = \frac{\rho}{r}.$$

$d = 1/Q = r/\rho$ — zanjir (kontur) ning so'nishi.

Rezonans rejimida zanjirdagi energetik munosabatlar ham o'ziga xos ayrim xususiyatlarga ega. Zanjirdagi tok $i = I_m \sin \omega_r t$ bo'lsa, kondensatordagi kuchlanish $U_C = \frac{1}{C} \int i dt = U_{sm} \cos \omega_r t$ bo'ladi.

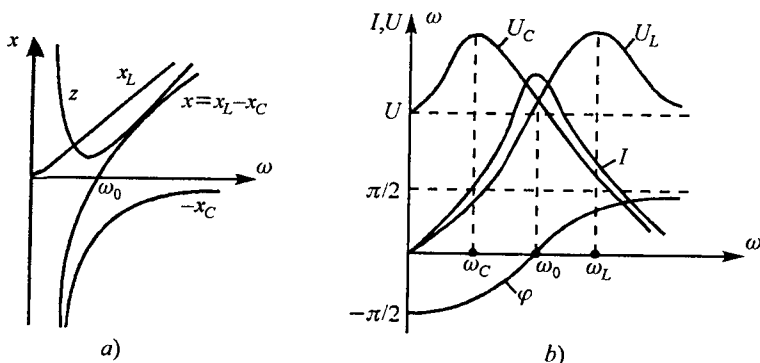
Zanjir elektr va magnit maydonlaridagi energiya:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{Cu_c^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} \sin^2 \omega_r t + \frac{CU_{cm}^2}{2} \cos^2 \omega_r t = \frac{LI_m^2}{2} + \frac{CU_{cm}^2}{2} = \text{const.}$$

$$U_{cm} = \frac{1}{\omega_r C} I_m = \sqrt{\frac{L}{C}} I_m \text{ bo'lgani uchun } \frac{CU_{cm}^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}.$$

Oxirgi ifodadan ko'rinadiki, zanjirdagi elektr va magnit maydonlari energiyalarining yig'indisi vaqt bo'yicha o'zgarmaydi. Energiya induktiv g'altak bilan kondensatorda navbatma-navbat to'planib turadi. Aktiv qarshilikda sarf bo'layotgan energiyani manbadan kelayotgan energiya qoplab turadi.

r , L va C elementlar ketma-ket ulangan zanjir (kontur) chastota tavsiflarini o'rganib chiqamiz. Manba kuchlanishi amplitudasi chastotasining oraliqda o'zgarishi zanjirning quyidagi parametrlarining o'zga-



2.21-rasm

rishiga olib keladi:

$$x_L = \omega L, \quad x_C = 1/\omega C, \quad x = x_L(\omega) - x_C(\omega),$$

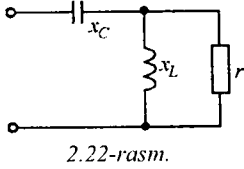
$$Z = \sqrt{r^2 + [x_L(\omega) - x_C(\omega)]^2}, \quad \varphi = \arctg[x(\omega)/r],$$

2.21-rasm, a da $x_L = (\omega)$, $x_C = (\omega)$, $x(\omega)$, $Z(\omega)$ va 2.21-rasm, b da $I(\omega)$, $U_L(\omega)$, $U_C(\omega)$, $\varphi(\omega)$ grafiklari keltirilgan. $\omega=0$ bo'lganda $I(0)=0$, chunki kondensator o'zgarimas tokni o'tkazmaydi. Barcha kuchlanish kondensatorida pasayadi. Chastota $0 < \omega < \omega_r$ diapazonida o'zgarganda x_L qarshilik oshadi, x_C esa kamayadi, Z qarshilik ham kamayadi. Bu diapazonda reaktiv qarshilik sig'im xarakterga ega bo'ladi. Shuning uchun ham faza siljish burchagi $-90^\circ < \varphi < 0$ oraliqda o'zgaradi. Chastota $\omega_r < \omega < \infty$ diapazonida o'zgarganda, $Z(\omega)$ va $x(\omega)$ lar 0 dan ∞ gacha ortib boradi. Zanjir induktiv xarakterga ega bo'ladi. Tok esa maksimal qiymatdan 0 gacha kamayadi. $U_L(\omega)$ kuchlanish manba kuchlanish U gacha kamayadi $U_C(\omega)$ esa 0 gacha kamayadi.

Chastota $\omega = \omega_r$ bo'lganda grafiklarda aks ettirilgandek $Z(\omega_r) = Z_{\min} = r$, $x_r = x_L - x_C = 0$, $\varphi = 0$, $I(\omega_r) = I_{\max} = U/r$ bo'ladi. $U_L(\omega_r)$ va $U_C(\omega_r)$ esa maksimal qiymatga yaqin qiymatga erishadi. Zanjir bu paytda aktiv xarakterga ega bo'ladi.

$U_L(\omega_r)$ va $U_C(\omega_r)$ grafiklaridan ko'rinib turibdiki, reaktiv elementlardagi kuchlanishlarning maksimal qiymatlari rezonans chastotasidan farq qilgan chastotalarga to'g'ri keladi. $U_L(\omega)$ kuchlanish $\omega_L < \omega_r$ da, $U_C(\omega)$ kuchlanish esa $\omega_L < \omega_r$ da maksimumga erishadi. Funksiyalarning ekstremumlarini topish sharti $dU_L/d\omega = 0$ va $dU_C/d\omega = 0$ dan:

$$\omega_L = \omega_r \sqrt{\frac{2}{2-d^2}}, \quad \omega_C = \omega_r \sqrt{\frac{2-d^2}{2}}.$$



Masala. Agar kuchlanishlar rezonansi rejimida ishlayotgan ikki qutblikning kirish to'la qarshiligi $z_{kir} = 20 \Omega$ va sig'im qarshiligi $x_C = 40 \Omega$ bo'lsa, u holda uning induktiv x_L va aktiv r qarshiliklari qiymatlarini aniqlang (2.22-rasm).

Yechish. Ikki qutblikning kirish kompleks qarshiligi quyidagiga teng:

$$Z_{kir} = -jx_C + \frac{jx_L r}{r + jx_L} = \frac{x_L^2 r}{r^2 + x_L^2} + j\left(-x_C + \frac{x_L r^2}{r^2 + x_L^2}\right).$$

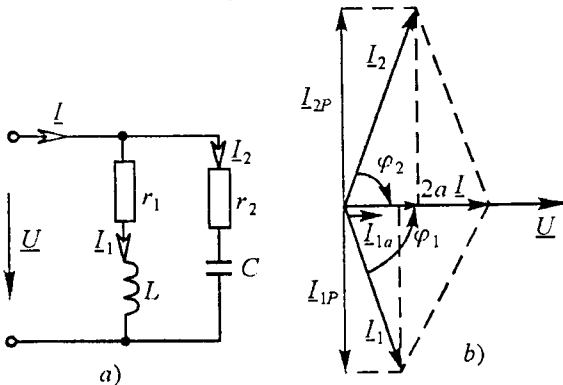
Kuchlanish rezonansi shartiga ko'ra zanjirning reaktiv qarshiligi nolga teng. Bu shartdan foydalanib quyidagi tenglamalar sistemasini tuzishimiz mumkin:

$$\left. \begin{aligned} Z_{kir} &= \frac{x_L^2 r}{r^2 + x_L^2} = 20; \\ x &= -x_C + \frac{x_L r^2}{r^2 + x_L^2} = 0. \end{aligned} \right\}$$

Bu sistemani x_L va r ga nisbatan yechib, quyidagilarni topamiz: $x_L = 50 \Omega$, $r = 100 \Omega$.

2.9.2. Toklar rezonansi

Reaktiv elementlar o'zaro parallel ulangan zanjirda (2.23-rasm, a) ma'lum shartlar bajarilganda toklar rezonansi yuz berishi mumkin.



2.23-rasm.

Rezonans rejimida manba toki va kuchlanish orasidagi faza siljish burchagi nolga teng bo'ladi, reaktiv o'tkazuvchanlik esa $b = b_L - b_C = 0$ yoki $b_L = b_C$ bo'ladi.

Rezonans rejimi uchun qurilgan vektor diagrammadan ko'rinib turibdiki (2.23-rasm, b),

reaktiv elementlardagi toklar modul qiymatlari jihatidan o'zaro teng, yo'nali shlari esa qarama-qarshi. Bunda $|I_L| = |I_C|$ toklar manba tokidan bir necha rnatoba ortib ketishi mumkin. Shuning uchun ham bu zanjirdagi rezonans toklar rezonansi deb ataladi.

Zanjir reaktiv o'tkazuvchanligining nolga tenglik shartidan:

$$\frac{\omega_r L}{r_1^2 + (\omega_r L)^2} = \frac{1/\omega_r C}{r_2^2 + (1/\omega_r C)^2}, \text{ bundan } \omega_r = \sqrt{1/LC} \sqrt{\frac{(L/C) - r_1^2}{(L/C) - r_2^2}}.$$

Ko'rilayotgan zanjirda rezonans rejimi hosil bo'lishi uchun oxirgi tenglamaning ildiz osti ifodasi doim musbat bo'lishi lozim. $r_1 = r_2$ bo'lgan hol uchun $\omega_r = 1/\sqrt{LC}$ bo'ladi. $r_1 = r_2 = \sqrt{L/C}$ hol uchun $\omega_r = 0/0$ bo'ladi. Bu holatda zanjirda ixtiyoriy chastotada rezonans yuz beradi. Zanjirning kirish qarshiligi $Z = Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2) = r$ ga teng bo'ladi.

Idea lashtirilgan holat $r_1 = r_2 = 0$ uchun zanjirning kirish qarshiligi cheksiz katta qiymatga teng bo'lib, tok nolga teng. Energiya manbadan zanjirga uzatilmaydi va kondensator hamda induktiv g'altak maydonlarida davriy ravishda almashinib to'planib turadi.

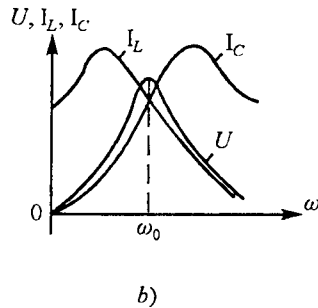
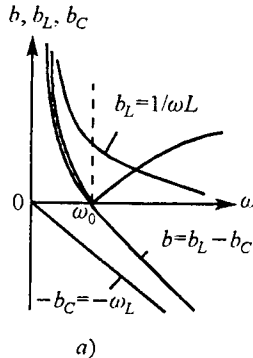
$\omega_r C = 1/\omega_r L = \sqrt{C/L} = \gamma$ — zanjirning to'lqin o'tkazuvchanligi deb ataladi.

Induktiv g'altak yoki kondensatordagi tokning manba tokidan necha marta katta ekanligini ko'rsatuvchi kattalik zanjir (kontur) ning aslligi deb ataladi:

$$Q = \frac{I_C}{I} = \frac{I_L}{I} = \frac{\omega_r C U}{g U} = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{\gamma}{g}.$$

Toklar rezonansida ham kuchlanishlar rezonansidagiga o'xshash energetik jarayonlar yuz beradi. $g \neq 0$ bo'lgan zanjirda $p_L = -p_C$ bo'lib, energiya g'altak bilan kondensator maydonlarida davriy to'planib turadi.

Qarshilikda 0 sarf bo'layotgan energiyani manbadan kelayotgan energiya qoplab turadi. 2.24-rasm, a



2.24-rasm.

da $b_L(\omega)$, $b_C(\omega)$, $b(\omega)$, 2.24-rasm, b da esa $I_L(\omega)$, $I_C(\omega)$, $U(\omega)$ larning grafiklari keltirilgan. Bu kattaliklar va zanjir parametrlarining chastota $0 \leq \omega \leq \omega_r$ va $\omega_r \leq \omega \leq \infty$ diapazonlardagi o'zgarishlari xuddi kuchlanishlar rezonansidagi o'zgarishlariga o'xshash bo'ladi.

Masala. Induktivligi $L_F = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Gn}$ va aktiv qarshiligi $R_F = 1000 \Omega$ bo'lgan induktiv g'altak hamda sig'imi $C = 120 \text{ nF} = 120 \cdot 10^{-12} \text{ F}$ bo'lgan kondensator parallel rezonansli konturni tashkil qiladi va $R = 210 \text{ k}\Omega$ rezistor orqali qiymati $U = 66 \text{ V}$ bo'lgan sinusoidal kuchlanish manbaiga ulangan.

Tok rezonansi rejimini ta'minlaydigan manba chastotasini va bu rejimdagi konturning to'la qarshiligini hamda shoxobchalaridagi toklarni hisoblang.

Yechish. Tok rezonansi sharti ($b_L = b_C$)ni ta'minlaydigan manba chastotasini $R_F = R_1$ va $R_2 = 0$ larni e'tiborga olib quyidagicha hisoblaymiz:

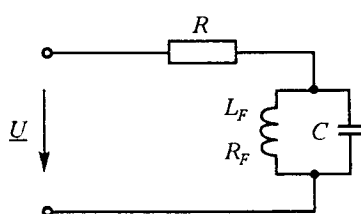
$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{(L/C) - R_1^2}{(L/C) - R_2^2}} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \sqrt{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \cdot 10^{-12}}} \sqrt{\frac{(2,5 \cdot 10^{-3} / 120 \cdot 10^{-12}) - (1000)^2}{2,5 \cdot 10^{-3} / 120 \cdot 10^{-12}}} =$$

$$= 290,4 \cdot 10^3 \cdot 0,976 = 284 \cdot 10^3 \text{ Gs}$$

Rezonans konturini tashkil qiluvchi shoxobchalarning o'tkazuvchanliklari:

$$b_L = b_C = \omega_p C = 2\pi f_p \cdot C = 2 \cdot 3,14 \cdot 284 \cdot 10^3 \cdot 120 \cdot 10^{-12} = 2,14 \cdot 10^{-4} \text{ Sm.}$$



2.25-rasm.

Konturning to'la reaktiv o'tkazuvchanligi esa $b = b_L - b_C = 2,14 \cdot 10^{-4} = 0$ ga teng bo'ladi.

Konturning g'aktiv o'tkazuvchanligi uning induktiv g'altigidan iborat shoxobchasining aktiv o'tkazuvchanligiga teng, ya'ni:

$$g = g_1 = \frac{R_F}{R_F^2 + 6(\omega \cdot L)^2} = \frac{1000}{1000^2 + (178 \cdot 10^4 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3})^2} = 0,48 \cdot 10^{-4} \text{ Sm.}$$

Konturning to'la o'tkazuvchanligi $C = \sqrt{g^2 + b^2} = g = 0,48 \cdot 10^{-4} \text{ Sm.}$

Rezonans konturining to'la qarshiligini quyidagicha hisoblaymiz:

$$Z_K = 1/y = 1/0,48 \cdot 10^{-4} = 20,8 \cdot 10^3 \Omega.$$

Konturning hisoblangan to'la qarshiligi zanjir uchun dastlab berilgan qarshilik R dan 10 baravar kichik. Shu sababli konturdagi kuchlanish quyidagiga teng:

$$U_K = \frac{U}{R+Z_K} \cdot Z_K = 66 \frac{21}{210+21} = 6 \text{ V}.$$

Induktiv g'altakdagi tokning aktiv va reaktiv tashkil etuvchilari:

$$I_{1a} = Uq_1 = 6,0 \cdot 0,48 \cdot 10^{-4} = 0,284 \cdot 10^{-3} \text{ A},$$

$$I_{1r} = Ub_1 = 6,0 \cdot 2,14 \cdot 10^{-4} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

Shu shoxobchadagi umumiy tok

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} = \sqrt{(0,284 \cdot 10^{-3})^2 + (1,26 \cdot 10^{-3})^2} = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

Ikkinchi shoxobchadagi tok $I_{2a} = Ug_2 = U \cdot 0 = 0$, $I_{2r} = Ub_2 = Ub_1 = I_{1r} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ A}$ va shuning uchun ham $I_2 = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ A}$.

Zanjirning umumiy toki

$$I = \sqrt{(I_{1a} + I_{2a})^2 + (I_{1r} - I_{2r})^2} = \sqrt{(0,284 \cdot 10^{-3})^2 + 0} = 0,284 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

2.10. ELEKTROTEXNIK QURILMALARNING QUVVAT KOEFFITSIYENTI VA UNING MOHIYATI. QUVVAT KOEFFITSIYENTINI OSHIRISH USULLARI VA HISOBLASH ASOSLARI

Elektr energiya iste'molchilari amalda asosan aktiv-induktiv xarakterli bo'ladi va yuklama tokining fazasi manba kuchlanishi fazasidan orqada qoladi.

Yuklama quvvat koeffitsiyentining kamayishi yuklamadan o'tuvchi tokni oshiradi, chunki

$$I = P/U \cos \varphi.$$

Sinusoidal tok generatorlari ma'lum bir $S_{nom} = U_{nom} I_{nom}$ quvvatga mo'ljallangan bo'ladi, ya'ni U_{nom} nominal kuchlanishda ular faqat belgilangan nominal I_{nom} tokdan oshmagan yuklamaga ulanishi mumkin.

Shu sababli yuklamaning quvvat koeffitsiyenti past bo'lganda generator toki belgilangan nominal qiymatdan oshmasligi uchun uning aktiv quvvatini kamaytirish kerak bo'ladi. Bunday hollarda generator tok bo'yicha to'la yuklangan bo'lsa-da aktiv quvvat bo'yicha to'la yuklanmagan bo'ladi.

Generator va birlamchi motordan iborat elektr manbaining umumiy foydali ish koeffitsiyenti har bir uskunaning foydali ish koeffitsiyentiga bog'liq bo'lib, birlamchi motorning ishi asosan generatorning aktiv quvvatiga bog'liq. Shu sababli generatorni aktiv quvvat bilan to'la yuklanmasligi birlamchi motorning va umuman energetik qurilmaning foydalanish koeffitsiyenti pasayishiga olib keladi. Bundan tashqari uzatish liniyasidagi quvvat isrofi katta bo'ladi:

$$\Delta P = r_l I^2 = \frac{r_l P^2}{U^2 \cos^2 \varphi},$$

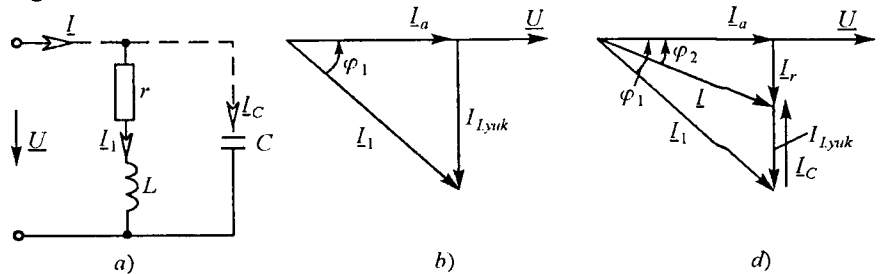
bu yerda r_l — uzatish liniyasining aktiv qarshiligi.

Ifodadan ko'rinib turibdiki, yuklamaning quvvat koeffitsiyenti qancha kam bo'lsa, quvvat isrofi shuncha ko'p bo'ladi. Binobarin, yuklamaning quvvat koeffitsiyenti qancha kam bo'lsa, uzatish liniyasidagi quvvat isrofi shuncha ko'p bo'ladi. Quvvat koeffitsiyenti manba quvvati qanday foydalanilayotganligini bildiradi.

Elektr uskunaning quvvat koeffitsiyentini oshirishning uchta usuli mavjud:

1. Induktiv xarakterli yuklamaga kondensator batareyalarini parallel ulash.
2. Induktiv xarakterli yuklamaga kondensatorni ketma-ket ulash.
3. Elektr tarmog'iga sinxron motor ulash.

Quyida birinchi usulga binoan qo'llaniladigan kondensatorlar batareyasi sig'imini hisoblash uslubini ko'rib chiqamiz. 2.26-rasmdagi vektor



2.26-rasm.

diagrammadan I tok bilan U kuchlanish orasidagi kerakli burchak siljishini olish uchun sig'ım shoxobchadagi I_C tok yuklamaning kompensatsiya qilishdan avvalgi reaktiv tashkil etuvchi $I_{r,yuk}$ tokidan kompensatsiya qilingandan keyingi I_r toklarning ayirmasiga teng bo'lishi kerak: $I_C = I_{r,yuk} - I_r$.

Bu ifodadagi toklarni yuklama tokining aktiv tashkil etuvchisi I_a orqali $I_{r,yuk} = I_a \operatorname{tg}\varphi_{yuk}$ va $I_r = I_a \operatorname{tg}\varphi$ ko'rinishda ifodalash mumkin. Natijada quyidagilarni yozish mumkin:

$$I_C = I_a(\operatorname{tg}\varphi_{yuk} - \operatorname{tg}\varphi).$$

Bu ifodada kondensator uchun $I_C = U\omega C$ ekanligi va I_a tokni quvvat va kuchlanish orqali ifodalab, ifodani $U\omega C = (P/U)(\operatorname{tg}\varphi_{yuk} - \operatorname{tg}\varphi)$ ko'rinishda yozishimiz mumkin.

Oxirgi ifodadan kondensator batareyasining sig'imini topamiz:

$$C = \frac{P(\operatorname{tg}\varphi_{yuk} - \operatorname{tg}\varphi)}{\omega U^2}.$$

Odatda kondensator batareyalari yordamida $\cos\varphi(0,92-0,96)$ gacha oshiriladi. Quvvat koeffitsiyentining bundan katta bo'lishi texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlarga ko'ra maqsadga muvofiq emas.

Masala. Elektr motor kuchlanishi $U_{nom} = 220$ V va chastotasi $f = 50$ Gs bo'lgan manbaga ulangan.

Motoring quvvati $P_{nom} = 20$ kW va quvvat koeffitsiyenti $\cos\varphi_1 = 0,6$. Uskuna quvvat koeffitsiyenti $\cos\varphi_2 = 0,9$ bilan ishlashi uchun motorga qanday sig'imli kondensator ulash kerak?

Yechish. Quvvat koeffitsiyenti $\cos\varphi_1 = 0,6$ da motoring toki:

$$I_1 = P/(U \cos\varphi_1) = 20 \cdot 10^3 / (220 \cdot 0,6) = 152 \text{ A}.$$

$$\varphi_1 = \arccos 0,6 = 53^\circ 10' \text{ va } \sin\varphi_1 = 0,8.$$

Motor tokining reaktiv tashkil etuvchisi:

$$I_{r1} = I_1 \sin\varphi_1 = 152 \cdot 0,8 = 121,6 \text{ A},$$

$$\varphi_2 = \arccos 0,9 = 26^\circ 50' \text{ va } \sin\varphi_2 = 0,436.$$

Motoring $\cos\varphi_2 = 0,9$ quvvat koeffitsiyenti bilan ishlashini ta'minlovchi kondensator toki:

$$I_2 = P/(U \cos\varphi_2) = 20 \cdot 10^3 / (220 \cdot 0,9) = 101 \text{ A}.$$

Shu tokning reaktiv tashkil etuvchisi:

$$I_{r2} = I_2 \sin\varphi_2 = 101 \cdot 0,436 = 44 \text{ A}.$$

Kondensator ulangandan keyingi tokning qiymati:

$$I_C = I_{r1} - I_{r2} = 121,6 - 44 = 77,6 \text{ A}.$$

Sig‘im qarshiligi:

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{U}{I_C} = \frac{220}{77,6} = 2,83 \Omega.$$

Kondensator sig‘imi:

$$C = \frac{1}{x_C \omega} = \frac{1}{x_C 2\pi f} = \frac{1}{2,83 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1130 \text{ mkF}.$$

2.11. INDUKTIV BOG‘LANGAN ZANJIRLAR. O‘ZARO BOG‘LANISH KOEFFITSIYENTI

2.11.1. Umumiy ma‘lumotlar

Agar elektr zanjirning bir elementidagi tokning o‘zgarishi zanjirning boshqa elementida EYK paydo bo‘lishiga sabab bo‘lsa, u holda bu elementlar *o‘zaro induktiv bog‘langan*, paydo bo‘ladigan EYK esa *o‘zaro induksiya EYKi* deyiladi.

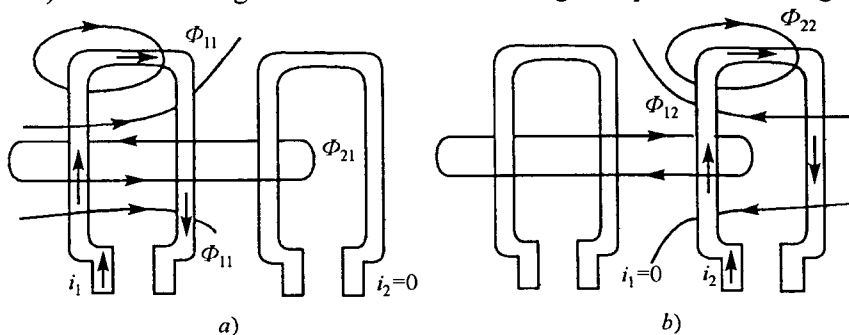
Ikki elementning induktiv bog‘lanish darajasi bog‘lanish koeffitsiyenti yordamida tavsiflanadi:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

bu ifodada M — zanjir elementlarining o‘zaro induktivligi, L_1 va L_2 — zanjir elementlarining xususiy induktivliklari.

Induktiv bog‘lanish koeffitsiyenti har doim birdan kichik bo‘lishini ko‘rib chiqamiz.

Nisbatan katta o‘lchamli ikkita induktiv g‘altak berilgan bo‘lsin (2.27-rasm). G‘altaklarning har bir o‘rami bir xil magnit oqimi bilan ilashgan



2.27-rasm.

bo'lsin. 2.27-rasm, a da birinchi g'altakdan i_1 tok o'tgan holat uchun magnit maydonning tasviri ko'rsatilgan. Birinchi g'altak o'ramlari o'zinduksiya magnit oqimi Φ_{11} , ikkinchi g'altak o'ramlari esa o'zaro induksiya magnit oqimi Φ_{12} bilan ilashgan. Birinchi va ikkinchi g'altaklarning o'zinduksiya va o'zaro induksiya ilashish magnit oqimlari quyidagicha aniqlanadi:

$$\psi_{11} = w_1 \Phi_{11}, \quad \psi_{21} = w_2 \Phi_{21},$$

bunda w_1 va w_2 — g'altaklardagi o'ramlar soni.

O'zaro induksiya oqimlari (Φ_{21} va Φ_{12}) va ilashish oqimlari (ψ_{21} va ψ_{12}) indeksidagi birinchi raqam oqimning qaysi kontur bilan ilashayotganligini, ikkinchisi esa shu oqimni hosil qilgan tok qaysi konturga tegishlilikini bildiradi.

Ta'rif bo'yicha birinchi g'altakning induktivligi va g'altaklarning o'zaro induktivligi quyidagilarga teng:

$$L_1 = \frac{\psi_{11}}{i_1} = \frac{w_1 \Phi_{11}}{i_1}, \quad M = M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_1} = \frac{w_2 \Phi_{21}}{i_1}.$$

G'altakdan o'tadigan tok va o'zinduksiya magnit oqimining musbat yo'nalishlarini o'ng vint qoidasiga ko'ra tanlaymiz, shuning uchun $i_1 > 0$ bo'ladi va ψ_{11}/i_1 nisbat har doim musbat qiymatga ega. O'zaro induksiya oqimining musbat yo'nalishi esa ixtiyoriy va shuning uchun ψ_{21}/i_1 nisbat musbat yoki manfiy ishorali bo'lishi mumkin.

2.27-rasm, b da faqat ikkinchi g'altakdan i_2 tok o'tayotgan holat uchun magnit maydonining tasviri berilgan. Ta'rif bo'yicha

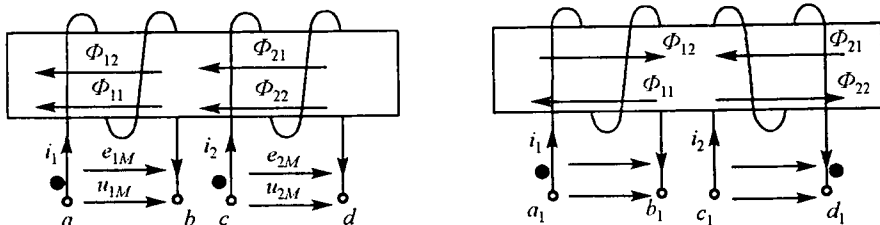
$$L_2 = \frac{\psi_{22}}{i_2} = \frac{w_2 \Phi_{22}}{i_2}, \quad M = M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_2} = \frac{w_1 \Phi_{12}}{i_2}.$$

Amalda ikki g'altakning o'ramlari bir xil bo'lmagan (bir-biridan farq qiladigan) magnit oqimlar bilan ilashadi, shuning uchun har doim $k < 1$ bo'ladi.

O'zaro induktiv bog'lanish koeffitsiyenti qiymatini g'altaklarni bir-biriga nisbatan siljitis h bilan o'zgartirish mumkin. G'altaklari bir-biriga nisbatan siljishi mumkin bo'lgan asbob *variometr* deb ataladi.

2.11.2. O'zaro induksiya EYK

Induktiv bog'langan elementlardan biridagi tok o'zgarsa, boshqa elementda o'zaro induksiya EYKi paydo bo'ladi. O'zaro induksiya (elektromagnit induksiya qonuni) tufayli paydo bo'ladigan EYK va kuchlanishning absolyut qiymati mos ravishda quyidagilarga teng:



2.28-rasm.

$$|u_{1M}| = |e_{1M}| = \left| \frac{d\psi_{12}}{dt} \right| = \left| M \frac{di_2}{dt} \right|, \quad |u_{2M}| = |e_{2M}| = \left| \frac{d\psi_{21}}{dt} \right| = \left| M \frac{di_1}{dt} \right|.$$

Bu kattaliklar ishoralarini aniqlash uchun o‘zaro bog‘langan zanjir elementlarining bir xil nomlangan qismlarini topish kerak. Bunda quyidagi qoida o‘rinlidir:

Agar qismalarga nisbatan bir xil yo‘nalishda o‘tadigan tokdan har bir elementda hosil bo‘ladigan o‘zinduksiya va o‘zaro induksiya magnit oqimlari qo‘shilsa, u holda bu qismalar induktiv bog‘langan ikkita elementning bir xil nomlangan qismlari deyiladi.

Bu qoida asosida 2.28-rasm, *a* da keltirilgan g‘altaklar qismlari belgilangan. i_1 tok *a* qismadan *b* qismaga yo‘nalgan bo‘lsa va i_2 tok *c* qismadan *d* qismaga yo‘nalgan bo‘lsa, o‘zinduksiya magnit oqimi $\Phi_{11}(\Phi_{22})$ va o‘zaro induksiya magnit oqimi $\Phi_{12}(\Phi_{21})$ bilan qo‘shiladi. Shuning uchun *a* qisma bilan *c* qisma bir xil nomlangan bo‘ladi, xuddi shunday *b* qisma *d* qisma bilan bir xil nomlangan bo‘ladi.

2.28-rasm, *b* dagi g‘altaklar uchun a_1 va d_1 hamda b_1 va c_1 bir xil nomlangan qismlar bo‘ladi.

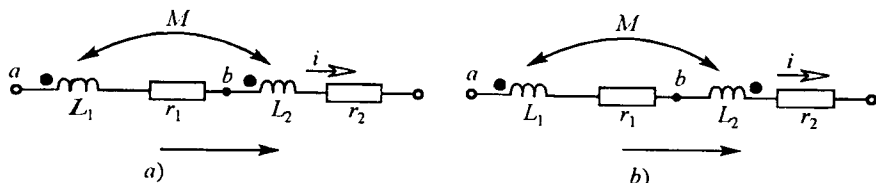
Avvalgi holdan farqli joyi shundaki, 2-g‘altakning o‘ralish yo‘nalishi 1-g‘altakning o‘ralish yo‘nalishiga qarama-qarshidir.

Bir xil nomlangan ikkita juft qismlardan biri maxsus belgilar: nuqta yoki yulduzcha bilan belgilanadi.

2.11.3. Ketma-ket va parallel ulangan o‘zaro induktiv bog‘langan zanjirlar

1. Induktiv bog‘langan g‘altaklarning o‘zaro ketma-ket ulanishi.

Bunday ulanish ikki xil bo‘lishi mumkin: mos yoki qarama-qarshi ulanish. Mos ulangan g‘altaklarda toklar bir xil nomli qismlarga nisbatan bir xil yo‘nalgan bo‘ladi (2.29-rasm, *a*). Qarama-qarshi ulangan



2.29-rasm.

g'altaklarda toklarning yo'nalishi bir xil nomlangan qismalarga nisbatan qaram a-qarshi yo'nalgan bo'ladi (2.29-rasm, b).

Kirxgofning ikkinchi qonuniga asosan ikkita induktiv g'altakning o'zaro mos ulangan zanjiri uchun elektr muvozanat tenglamasini tuzamiz. Tokning musbat yo'nalishi va konturning aylanib chiqish yo'nalishi bir xil deb faraz qilaylik. Induktiv bog'langan elementlari bo'lgan elektr zanjirlarni bevosita hisoblash uchun zanjirlarni hisoblashning avval ko'rib o'tilgan barcha usullari ishlatiladi, faqat tugun potentsiallar usulini qo'llash uchun ba'zi bir qo'shirmacha qoidalardan foydalanishga to'g'ri keladi.

O'zaro bog'langan ikkita induktiv g'altak ketma-ket va induktiv jihatdan mos ulanganda uning differensial tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$u = r_1 i + L_1 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} + r_2 i + L_2 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt}.$$

Kompleks shaklda esa:

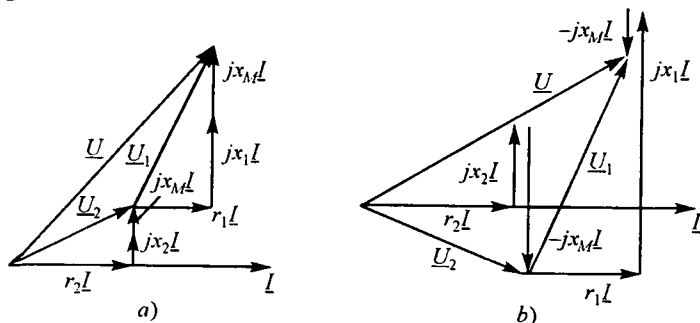
$$\underline{U} = r_1 \underline{I} + j\omega L_1 \underline{I} + j\omega M \underline{I} + j\omega L_2 \underline{I} + r_2 \underline{I} + j\omega L_2 \underline{I} = \underline{Z}_{mos} \underline{I},$$

bunda

$$\underline{Z}_{mos} = r_1 + r_2 + j(\omega L_1 + \omega L_2 + 2\omega M) = r_1 + r_2 + j(x_1 + x_2 + 2x_M),$$

bu yerda $x_M = \omega M$ — o'zaro induktiv qarshilik.

Mos ulangan zanjir uchun vektorlar diagrammasi 2.30-rasm, a da keltirilgan.



2.30-rasm.

G'altaklar ketma-ket va o'zaro qarama-qarshi ulanganda elektr muvozanat tenglamasi differensial shaklda quyidagicha yoziladi:

$$u = r_1 i + L_1 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} + r_2 i + L_2 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt},$$

kompleks shaklda esa:

$$\underline{U} = r_1 \underline{I} + j\omega L_1 \underline{I} - j\omega M \underline{I} + r_2 \underline{I} + j\omega L_2 \underline{I} - j\omega M \underline{I} = \underline{Z}_{q,q} \underline{I},$$

$$\underline{Z}_{q,q} = r_1 + r_2 + j(\omega L_1 + \omega L_2 - 2\omega M) = r_1 + r_2 + j(x_1 + x_2 - 2x_M).$$

Ketma-ket va induktiv jihatdan qarama-qarshi ulangan zanjir uchun vektorlar diagrammasi 2.30-rasm, b da keltirilgan.

Induktiv bog'langan g'altaklar o'zaro mos ulanganda ularning to'la qarshiligi ular o'zaro qarama-qarshi ulangandagiga nisbatan katta bo'ladi. Bu xususiyatdan o'zaro induktiv bog'langan g'altaklar bir xil nomlangan qismlarini aniqlashda foydalaniladi.

2. Induktiv bog'langan g'altaklarning o'zaro parallel ulanishi

Ikkita o'zaro induktiv bog'langan g'altaklarning parallel ulanishini (2.31-rasm) tahlil qilish uchun Kirxgofning 1- va 2-qonunlariga asoslanib differensial va kompleks shakllarda muvozanat tenglamalarini tuzamiz:

$$i = i_1 + i_2, \quad u = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt}, \quad u = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt}, \quad \underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2,$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U} &= r_1 \underline{I}_1 + jx_1 \underline{I}_1 \pm jx_M \underline{I}_2, & \underline{U} &= \underline{Z}_1 \underline{I}_1 \pm \underline{Z}_M \underline{I}_2 \\ \underline{U} &= r_2 \underline{I}_2 + jx_2 \underline{I}_2 \pm jx_M \underline{I}_1, & \underline{U} &= \underline{Z}_2 \underline{I}_2 \pm \underline{Z}_M \underline{I}_1 \end{aligned} \right\}, \quad \text{yoki}$$

bunda $\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1$, $\underline{Z}_2 = r_2 + jx_2$, $\underline{Z}_M = \pm jx_M$

Agar o'zinduksiya va o'zaro induksiya magnit oqimlari yo'nalishlari mos tushsa, u holda x_M «musbat», aks holda esa — «manfiy» ishora bilan olinadi. So'ngi tenglamalar sistemasini I_1 va I_2 toklarga nisbatan yechib, quyidagi ifodalarni hosil qilamiz:

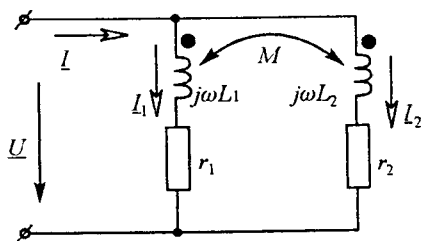
$$\underline{I}_1 = \underline{U} \frac{\underline{Z}_2 \mp \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}, \quad \underline{I}_2 = \underline{U} \frac{\underline{Z}_1 \mp \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}.$$

Umumiy tok \underline{I} esa:

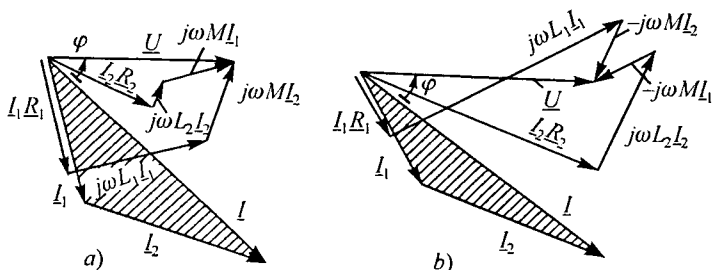
$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \underline{U} \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \mp 2\underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}.$$

Zanjirning kirish qarshiligi:

$$\underline{Z}_{kir} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \mp 2\underline{Z}_M}.$$



2.31-rasm.



2.32-rasm.

Agar $r_1=r_2=0$ bo'lsa, u holda:

$$L_1 = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_2 \mp M}, \quad L_2 = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 \mp M}, \quad L = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \mp 2M}.$$

2.32-rasmda o'zaro parallel ulangan va induktiv bog'langan ikkita g'altak vektor diagrammalari qurilgan: a) mos; b) qarama-qarshi ulangan zanjirlar uchun.

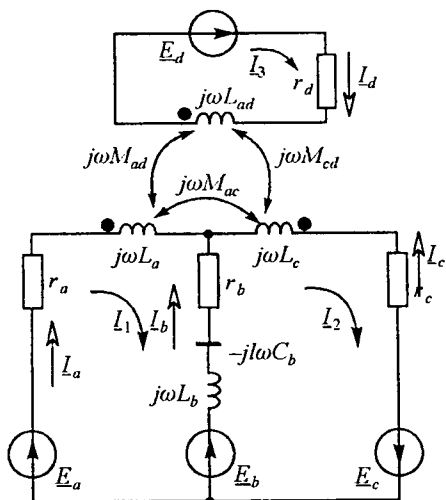
Vek tor diagrammalarni qurishda manba kuchlanishi vektori \underline{U} ning boshlarig'ich fazasi nolga teng deb olingan.

2.11.4. O'zaro induktiv bog'langan zanjirlarni hisoblash

Tarmoqlangan induktiv bog'langan zanjirlarni Kirxgofning birinchi va ikkinchi qonunlari asosida yoki kontur toklar usulida hisoblash mumkin. Tugun potentsiallar usulini bevosita qo'llab bo'lmaydi, chunki bir shoxobchadagi tok nafaqat shu shoxobchadagi EYK va shoxobcha ulangan tugunlarning potentsiallariga, balki boshqa induktiv bog'langan shoxobchalardagi toklar o'zgarishiga ham bog'liqdir. Ekvivalent generator usulini esa, faqat ikki qutblikka tegishli bo'lmagan shoxobcha ikki qutblik tarkibiga kiradigan boshqa shoxobcha bilan induktiv bog'lanmagan elektr zanjirlarida qo'llash mumkin.

Hisoblash usullarini chegaralaydigan hollardan ozod bo'lish uchun ba'zi bir hollarda induktiv bog'lanishni bartaraf etadigan ekvivalent sxemalariga o'tish zarur bo'ladi.

Kirxgofning ikkinchi qonuniga ko'ra tenglama tuzishda o'zaro induksiya EYKi mos kuchlanish kabi hisobga olinadi. k elementdagi kompleks $\pm j\omega M_{kS} I_S$ kuchlanish ishorasi k elementini aylanib chiqishda



2.33-rasm.

s-elementdagi tokning musbat yo'nalishini ham nazarda tutib belgilanadi. Agar bir xil nomlangan qismlarga nisbatan aylanib chiqish yo'nalishi bir xil bo'lsa, u holda $j\omega M_{ks}I_s$ ishorasini «musbat», aks holda esa «manfiy» bo'ladi.

Misol tariqasida 2.33-rasmda keltirilgan zanjir uchun Kirxgof qonunlari asosida tenglamalar tuzamiz. Tenglamalar-dagi kuchlanishlar ifodalarini konturdagi elementlarning joylas hish tartibiga ko'ra yozamiz:

$$I_a + I_b + I_c = 0,$$

$$\left. \begin{aligned} r_a I_a + j\omega L_a I_a + j\omega M_{ac} I_c - j\omega M_{ad} I_d - r_b I_b + \frac{jI_b}{\omega C_b} - j\omega L_b I_b &= E_a - E_b, \\ j\omega L_b I_b + \frac{jI_b}{\omega C_b} + r_b I_b - j\omega L_c I_c + j\omega M_{ac} I_a - j\omega M_{cd} I_d - r_c I_c &= E_b + E_c, \\ r_d I_d + j\omega L_d I_d - j\omega M_{ad} I_a + j\omega M_{cd} I_c &= E_d. \end{aligned} \right\}$$

Kirxgofning 2-qonuniga asosan tuzilgan kontur toklar tenglamalari sistemasini ham keltiramiz:

$$\begin{aligned} & \left[r_a + r_b + j \left(\omega L_a + \omega L_b - \frac{1}{\omega C_b} \right) \right] I_1 - \left[r_b - j \left(\omega L_b - \frac{1}{\omega C_b} \right) \right] \times \\ & \quad \times I_2 - j\omega M_{ad} I_3 = E_a - E_b; \\ & - \left[r_b - j \left(\omega L_b - \frac{1}{\omega C_b} \right) \right] I_1 + \left[r_b + r_c + j \left(\omega L_b + \omega L_c - \frac{1}{\omega C_b} \right) \right] \times \\ & \quad \times I_2 - j\omega M_{cd} I_3 = E_b + E_c; \\ & -j\omega M_{ad} I_1 - j\omega M_{cd} I_2 + (r_d + \omega L_d) I_3 = E_d; \end{aligned}$$

Bu tenglamalarni quyidagicha ko'rinishda yozish mumkin:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{11}I_1 + \underline{Z}_{12}I_2 + \underline{Z}_{13}I_3 &= \underline{E}_1 \\ \underline{Z}_{21}I_1 + \underline{Z}_{22}I_2 + \underline{Z}_{23}I_3 &= \underline{E}_2 \\ \underline{Z}_{31}I_1 + \underline{Z}_{32}I_2 + \underline{Z}_{33}I_3 &= \underline{E}_3 \end{aligned} \right\}$$

Bunda \underline{Z}_{11} , \underline{Z}_{22} va \underline{Z}_{33} — birinchi, ikkinchi va uchinchi konturlarning xususi y kompleks qarshiliklari, $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}$; $\underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{32}$ va $\underline{Z}_{31} = \underline{Z}_{13}$ — 1 va 2, 2 va 3, 3 va 1 qo'shni konturlarning o'zaro kompleks qarshiliklari; \underline{E}_1 , \underline{E}_2 , \underline{E}_3 — birinchi, ikkinchi va uchinchi konturlarning kompleks EYK lari.

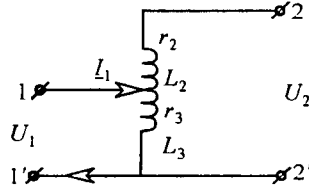
Misol uchun:

$$\underline{Z}_{11} = r_a + r_b + j\left(\omega L_a + \omega L_b - \frac{1}{\omega C_b}\right), \quad \underline{Z}_{12} = -\left[r_b - j\left(\omega L_b - \frac{1}{\omega C_b}\right)\right],$$

$$\underline{Z}_{13} = -j\omega M_{ab}; \quad \underline{E}_1 = \underline{E}_a - \underline{E}_b.$$

Induktiv bog'langan zanjirlar uchun ham o'zarolik xossasi o'rinlidir. Bu holat o'zgarmas tok zanjirlari uchun o'zarolik xossasining qo'llanishi kabi tu shuntiriladi.

1-masala. Induktiv bog'langan zanjir (masalan, avtotransformator) ning (2.34-rasm) 1-1' qismlariga sinusoidal kuchlanish ulangan. Yuqlama ulanmagan chiqish qismlaridagi kuchlanish topilsin.



2.34-rasm.

Berilgan:

$$r_2 = r_3 = 3 \Omega; \quad \omega L_2 = \omega L_3 = 4 \Omega; \quad \omega M = 2 \Omega; \quad U_1 = 10 \text{ V}.$$

Yechish. Kirish kuchlanishi $\underline{U}_1 = U_1 = 10 \text{ V}$. Kirish tokini hisoblaymiz:

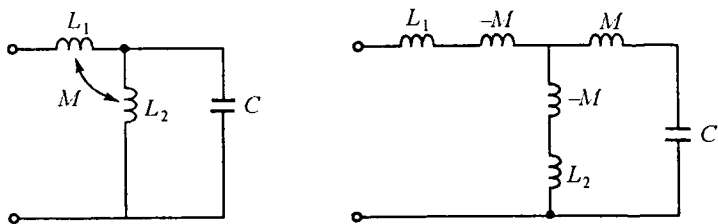
$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{(r_3 + j\omega L_3)} = \frac{10}{(3 + j4)} = 1,2 - j1,6 \text{ A}.$$

Chiqish \underline{U}_2 kuchlanishi zanjirning 2 qismasidan 2' qismasigacha bo'lgan kuchlanishlar yig'indisidan iborat:

$$\underline{U}_2 = j\omega M \underline{I}_1 + \underline{U}_1 = j2(1,2 - j1,6) + 10 = 13,2 + j2,4 \text{ V}.$$

Agar L_2 induktivlikning pastki qismasi L_3 induktivlikning yuqori qismasi bilan bir xil nomlangan bo'lsa, u holda L_2 va L_3 elementlardan o'tuvchi toklar bir xil nomlangan qismlarga nisbatan har xil yo'nalishda bo'ladi. Shuning uchun $j\omega M \underline{I}_1$ had \underline{U}_2 kuchlanish ifodasiga minus ishora bilan qo'shilar edi va bu holda:

$$\underline{U}_2 = -j\omega M \underline{I}_1 + \underline{U}_1 = -j2(1,2 - j1,6) + 10 = -6,8 - j2,4 \text{ V}.$$



2.35-rasm.

2-masala. Parametrlari $x_{L1} = 10 \Omega$, $x_{L2} = 5 \Omega$, $x_M = 5 \Omega$, $x_C = 10 \Omega$ bo'lgan zanjirning (2.35-rasm, a) kompleks kirish qarshiligini aniqlang.

Yechish. Bir xil nomlangan qismlar bitta tugunga ulanganligini hisobga olib zanjirni induktiv bog'lanishsiz ko'rinishga keltiramiz (2.35-rasm, b).

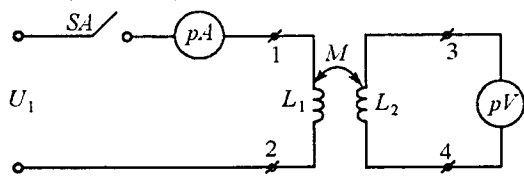
Hosil bo'lgan zanjir kirish qarshiligining kompleks qiymatini aniqlaymiz:

$$\underline{Z}_{kir} = jx_{L1} - jx_M + \frac{(jx_M - jx_C)(jx_{L2} - jx_M)}{jx_M - jx_C + jx_{L2} - jx_M} = j5 = 5e^{j90^\circ} \Omega.$$

2.11.5. Ikki konturli o'zaro induktiv bog'langan zanjir da bir xil nomlangan qismlarni va o'zaro induktivlikni aniqlash usullari

Induktiv bog'langan g'altaklar bir xil nomlangan qismlarini aniqlash generator, transformator, elektr motor va bir qator radiotexnik hamda elektr o'lchash qurilmalarini normal ishlatish uchun zarur bo'ladi.

Ikkita o'zaro induktiv bog'langan g'altaklar bir xil nomli qismlarini tajribada aniqlash juda oson. Buning uchun 2.36-rasmdagi sxemaga binoan o'zgarmas tok manbaining «+» belgili qismasini birinchi g'altakning 1 belgili qismasiga, 2 belgili qismasini esa, manbaining «-» ishorali qismasiga ulanadi. Noli o'rtada joylashgan o'zgarmas tok voltmetri ikkinchi induktiv g'altakka ulanadi. Agar kalit SA ulanganida voltmetr mili (strelkasi) musbat yo'nalishga, ya'ni o'ngga burilsa, u holda ikkinchi



2.36-rasm.

induktiv g'altakning bir xil nomli qismasi 3 bo'ladi. Agar voltmetr s trekasi manfiy yo'nalishga, ya'ni chapga burilsa, u holda bir xil nomli qisma 4 bo'ladi.

a) o'zaro induktivlikni aniqlashning birinchi usuli

Salt ish rejimida ikkinchi induktiv g'altakning qismlarida hosil bo'lgan U_2 kuchlanishni birinchi g'altak chulg'amidan o'tayotgan I_1 tokka nisbatini olib, undan o'zaro induktiv qarshilik x_M ni va o'zaro induktivlik M ni hisoblash mumkin.

$x_M = U_2/I_1$; $x_M = \omega M$ va bundan $M = x_M/\omega$. Yoki birinchi induktiv g'altak chulg'amida hosil bo'lgan kuchlanish U_1 ni ikkinchi g'altakdan o'tayotgan I_2 tok qiymatiga bo'lib, o'zaro induktiv qarshilik x_M va o'zaro induktivlik M ni aniqlash mumkin: $x_M = U_1/I_2$; $x_M = \omega M$; $M = x_M/\omega$.

b) o'zaro induktivlikni aniqlashning ikkinchi usuli

Buning uchun 2.37-rasmda keltirilgan sxemani yig'amiz va U kuchlanish, I tok va P aktiv quvvatlarni o'zaro induktiv bog'langan ikkita g'altak ketma-ket va mos hamda ketma-ket va qarama-qarshi ulangan holatlarida o'lchaymiz. O'lchash natijalari asosida quyidagilarni hisoblaymiz:

$$\cos \varphi_{mos} = \frac{P_{mos}}{UI_{mos}}; \quad \cos \varphi_{q.q.} = \frac{q.q.}{UI_{q.q.}},$$

$$z_{mos} = \frac{U}{I_{mos}} = \sqrt{r_{mos}^2 + x_{mos}^2} = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + \omega^2 (L_1 + L_2 + 2M)^2},$$

$$r_{mos} = r_1 + r_2 = z_{mos} \cos \varphi_{mos}; \quad x_{mos} = \omega (L_1 + L_2 + 2M) = z_{mos} \sin \varphi_{mos},$$

$$z_{q.q.} = \frac{U}{I_{q.q.}} = \sqrt{r_{q.q.}^2 + x_{q.q.}^2} = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + \omega^2 (L_1 + L_2 - 2M)^2},$$

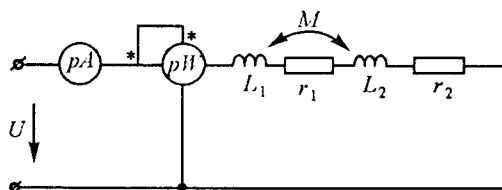
$$r_{q.q.} = r_1 + r_2 = z_{q.q.} \cos \varphi_{q.q.}; \quad x_{q.q.} = \omega (L_1 + L_2 - 2M) = z_{q.q.} \sin \varphi_{q.q.}$$

Bu ifodalarda *mos* indeksi — g'altaklar o'zaro induktiv jihatdan mos, *q.q.* indeksi esa, g'altaklar o'zaro qarama-qarshi ulashga taalluqli. O'zaro induktivlik quyidagicha hisoblanadi: $M = (x_{mos} - x_{q.q.})/4\omega$.

Bog'lanish koeffitsiyenti esa $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$ bo'ladi.

2.11.6. Induktiv bog'langan zanjirlarning ekvivalent sxemalari

Induktiv bog'langan zanjirlarni tahlil etish va hisoblash birmuncha qiyinchil iklar tug'diradi. Bu ishini soddalashtirish maqsadida induktiv



2.37-rasm.

bog‘langan zanjirlarni ekvivalent almashtirish usuli qo‘llaniladi.

2.38-rasm, a da keltirilgan o‘zaro induktiv bog‘langan zanjirni induktiv bog‘lanmagan zanjirga almashtirishni tahlil qilaylik. Bunda bo‘lishi mumkin bo‘lgan ikki holatni ko‘rib chiqamiz:

1. Elementlarning bir xil nomlangan qismlari umumiy tugunga ulangan sxema (2.38-rasm, a).

2. Elementlarning har xil nomlangan qismlari umumiy tugunga ulangan sxema (2.38-rasm, b).

Agar 3-tugunda faqat uchta shoxobcha ulangan bo‘lsa, u holda sxemaga qo‘shimcha shoxobcha kiritish shart emas.

1, 3 va 2, 3 qismlar orasidagi kuchlanishlar uchun quyidagi ifodalarni yozish mumkin:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{13} &= \underline{Z}_1 I_1 \pm \underline{Z}_M I_2, \\ \underline{U}_{23} &= \underline{Z}_2 I_2 \pm \underline{Z}_M I_1. \end{aligned} \right\}$$

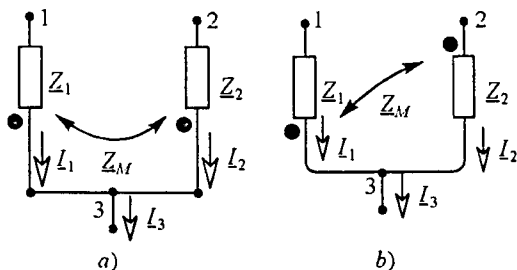
Ushbu tenglamalardagi «+» ishora bir xil nomlangan qismlar ulangan birinchi holatga, «-» ishora esa har xil nomlangan qismlar ulangan ikkinchi holatga mos keladi. Ishoralarning bunday tartibini keyingi ifodalarda uchun ham qo‘llaymiz.

$I_1 + I_2 - I_3 = 0$ ifodadan foydalanib sistemaning birinchi tenglamasidan I_2 tokni, ikkinchi tenglamasidan esa I_1 tokni istisno qilib, quyidagi tenglamalarni yozish mumkin:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{13} &= (\underline{Z}_1 \mp \underline{Z}_M) I_1 \pm \underline{Z}_M I_3, \\ \underline{U}_{23} &= (\underline{Z}_2 \mp \underline{Z}_M) I_2 \pm \underline{Z}_M I_3. \end{aligned} \right\}$$

Bundan tashqari quyidagini hosil qilish mumkin:

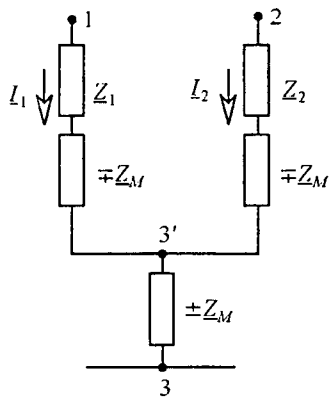
$$\underline{U}_{12} = (\underline{Z}_1 \mp \underline{Z}_M) I_1 - (\underline{Z}_2 \pm \underline{Z}_M) I_2.$$



2.38-rasm.

Yuqorida keltirilgan oxirgi uchta tenglama 2.39-rasm-dagi sxema uchun o‘rinli va shuning uchun ham bu sxema induktiv bog‘lanmagan ekvivalent sxema bo‘ladi. Demak, zanjirdagi induktiv bog‘lanishni istisno etish

uchun Z_1 va Z_2 qarshilikli shoxobchalarga $\mp Z_M$ qo'shimcha qarshiliklar kiritib, 3'-3 tugunlar orasiga esa $\mp Z_M$ qarshilikli element kiritish kerak bo'ladi. Z_M qarshilik oldidagi « \rightarrow » ishora bir xil nomlangan qismalar umumiy tugunga ulangan holatga to'g'ri keladi. Induktiv bog'langan elementlar uch qirrali yulduz yoki uchburchak usulida ulangan bo'lsa, yuqorida bayon etilgan ekvivalent almashlash usulidan foydalanib, induktiv bog'lanishi bo'lmagan sxemaga o'tish mumkin. To'rt qirrali yulduz usulida ulangan sxemalarni ekvivalent almashlash birmuncha murakkab, chunki almashlash natijasida induktiv bog'langan elementlar umumiy tuguni bo'lmagan shoxobchalarda joylashgan bo'lib qoladi.



2.39-rasm.

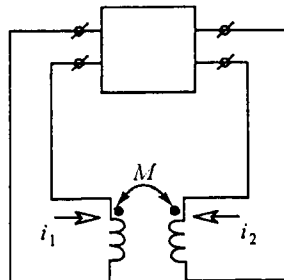
2.11.7. Induktiv bog'langan zanjirlarda energiya uzatish

Ikkita o'zaro induktiv bog'langan elementlarda o'zaro energiya uzatilishini ko'rib chiqamiz. Buning uchun induktiv bog'langan elementlardan tashqari zanjirning qolgan qismini aktiv to'rtqutblik sifatida qaraymiz (2.40-rasm).

Har bir davr mobaynida i_1 va i_2 toklarning o'zgarishi natijasida induktiv bog'langan elementlar magnit maydoni orqali berilayotgan energiya to'rtqutblikka qayta uzatiladi. Agar i_1 va i_2 toklar orasidagi faza siljish burchagi bir-biriga nisbatan 0 va π oralig'ida bo'lsa, u holda magnit maydonini hosil qilishga sarflanayotgan energiya maydondan qaytayotgan energiyaga nisbatan ko'proq bo'ladi va aksincha, boshqa elementdan magnit maydoniga berilayotgan energiya maydondan chiqayotgan energiyadan kam bo'ladi. Natijada energiya bir elementdan boshqa elementga uzatilib turadi.

Quyidagi toklar ma'lum bo'lsin: $I_1 = I_1 e^{j\psi_1}$ va $I_2 = I_2 e^{j\psi_2}$.

O'zaro induksiya ta'sirida birinchi va ikkinchi



2.40-rasm.

elementlarda ajraladigan kompleks quvvatlar ifodasini quyidagicha yozish mumkin:

$$\left. \begin{aligned} \bar{S}_{1M} &= \underline{U}_{1M} I_{-1}^* = j\omega M I_2 I_1 e^{j(\psi_2 - \psi_1)} = \\ &= \omega M I_2 I_1 \sin(\psi_2 - \psi_1) + j\omega M I_2 I_1 \cos(\psi_2 - \psi_1), \\ \bar{S}_{1M} &= \underline{U}_{2M} I_{-2}^* = -j\omega M I_{-1} I_{-2}^* = -S_{-1M}^* \end{aligned} \right\}$$

bundan

$$P_{1M} = -P_{2M} = \omega M I_2 I_1 \sin(\psi_1 - \psi_2).$$

Sxemada ko'rsatilgan tok va kuchlanishlarning musbat yo'nalishida quvvatlarning musbat qiymati aktiv to'rtqutblikdan elementlarga berilayotgan energiyaga mos keladi, quvvatlarning manfiy qiymati esa, elementdan to'rtqutblikka uzatiladigan energiyaga mos keladi.

Lekin o'zaro induksiya ta'sirida paydo bo'ladigan va ikkala elementga berilayotgan aktiv quvvat nolga teng, ya'ni $P_{1M} + P_{2M} = 0$ bo'ladi.

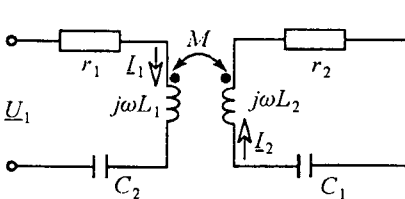
Agar $\pi > \psi_1 - \psi_2 > 0$ bo'lsa, u holda $P_{1M} > 0$, $P_{2M} < 0$, ya'ni fizik nuqtai nazardan, energiya to'rtqutblikdan olinib, birinchi elementdan ikkinchi element orqali yana to'rtqutblikka qayta uzatiladi. Agar $2\pi > \psi_1 - \psi_2 > \pi$ bo'lsa, u holda $P_{2M} > 0$ va $P_{1M} < 0$ bo'ladi. Bu holda energiya ikkinchi elementdan birinchi element orqali to'rtqutblikka qayta uzatiladi.

2.11.8. Induktiv bog'langan konturlarda rezonans

Amaliyotda radiotexnik va elektron qurilmalarda, konturlari o'zaro induktiv yoki sig'imiyl bog'langan zanjirlar keng qo'llaniladi.

Induktiv bog'langan va reaktiv elementlari o'zaro ketma-ket ulangan zanjirdagi rezonans hodisalarini ko'rib chiqamiz (2.41-rasm).

Zanjir rejimi ikkita tenglama bilan aniqlanadi:



$$\left. \begin{aligned} (r_1 + jx_1) I_1 - j\omega M I_2 &= \underline{U}_1 \\ (r_2 + jx_2) I_2 - j\omega M I_1 &= 0, \end{aligned} \right\}$$

bu yerda $x_1 = \omega L_1 - 1/\omega C_1$,
 $x_2 = \omega L_2 - 1/\omega C_2$.

Agar konturlarning xususiy bur-

2.41-rasm.

chak chastotalari $\omega_1 = \omega_2 = 1/\sqrt{LC} = \omega_0$ va har bir konturning reaktiv qarshiligi $x=0$ bo'lsa, u holda har bir kontur rezonansga sozlangan bo'ladi. Bunday holat *to'la rezonans* deyiladi. Tenglamadan quyidagini keltirib chiqarish mumkin:

$$I_{1rez} = \frac{r_1 U_1}{(r_1^2 + \omega_0^2 M^2)}.$$

Zanjir rezonansga sozlanganligi uchun bu tokning fazasi U_1 kuchlanishning fazasi bilan bir xil bo'ladi.

Ikkinchi konturdagi tok esa

$$I_{2rez} = j\omega_0 \frac{M I_{1rez}}{r_2} = j\omega_0 \frac{M r_1}{(r_2^2 + \omega_0^2 M^2)} U_1.$$

Har qanday boshqa chastotada I_2 tok uchun quyidagini hosil qilish mumkin:

$$I_2 = \frac{j\omega M U_1}{[(r_2 + jx_2)^2 + (\omega^2 M^2)]}.$$

Nisbiy birlikda:

$$\frac{I_2}{I_{2rez}} = \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{r_2^2 + \omega_0^2 M^2}{(r_2 + jx_2)^2 + \omega^2 M^2} = \omega^* \cdot \frac{1 + \omega_0^2 M^2 / r_2^2}{(1 + x_2 / r_2)^2 + \omega^2 M^2 / r_2^2} = \omega^* \cdot \frac{1 + (kQ)^2}{(1 + \xi)^2 + (kQ)^2},$$

chunki $\frac{\omega_0 M}{r_2} = \frac{\omega_0 L}{r_2} \cdot \frac{M}{L} = kQ$,

$\omega^* = \frac{\omega}{\omega_0}$ — nisbiy chastota,

Q — har bir konturning *asllik koeffitsiyenti*,

$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ — bog'lanish koeffitsiyenti va

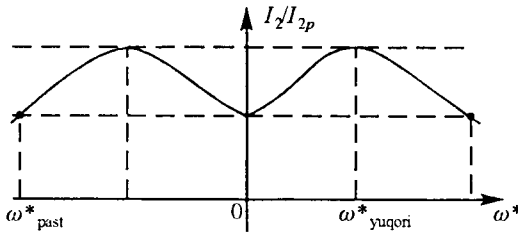
$\frac{x}{r} = \frac{\omega L - 1/\omega C}{r} = \frac{\omega^* \omega_0 L - 1/\omega^* \omega_0 C}{r} = Q \left(\frac{\omega^* - 1}{\omega^*} \right) = \xi$ — konturning *umumlashgan noozligi*.

Zanjirning rezonans xarakteristikasini qurishda $\omega/\omega_0 = 1$ deb, Q ni hisoblashda esa, $\omega L = \omega_0 L$ deb qabul qilish mumkin.

Konturlar kuchli bog'langan, ya'ni $kQ > 1$ bo'lsa, ikkita maksimumga ega bo'lgan rezonans egri chizig'i hosil bo'ladi (2.42-rasm).

Ushbu zanjirning signalni o'tkazish kengligi ($\omega_{yuuqori}^* - \omega_{pasti}^*$), oddiy bir konturli L va C elementlar ketma-ket ulangan zanjirning o'tkazish

qobiliyatidan 3,1 marta katta bo'ladi. $kQ > 1$ bo'lganda $\frac{I_2}{I_{2rez}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^4/4}}$



2.42-rasm.

va $\xi = \pm\sqrt{2}$ bo'ladi. Bu holda ham o'zaro induktiv bog'langan ikki konturli zanjirning o'tkazish qobiliyati bir konturli zanjirnikidan katta bo'ladi.

Shunday qilib, I_{2rez} tok qiymati konturlarning bog'

lanish koeffitsiyentiga bog'liq.

Tokning eng katta qiymati esa $\omega_0 M = r$ shart bajarilganda $I_{2max} = U_1/2r$ ga teng bo'ladi.

Konturlarda xususiy rezonans rejimini o'rnatish uchun har bir kontur parametrlarini-kondensator sig'imini yoki g'altak induktivligini o'zgartirish mumkin.

«Murakkab rezonans» esa, bog'lanish koeffitsiyenti va kontur parametrlarini o'zgartirish bilan amalga oshiriladi.

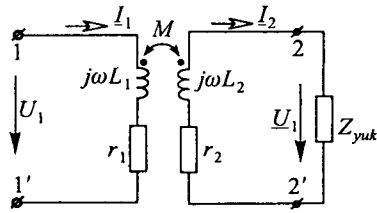
2.11.9. O'zaksiz transformatorlar. Transformatorlarni almashlash sxemasi va vektor diagrammasi

O'zaksiz transformatorlar radiotexnikada va o'lchash texnikasida keni qo'llaniladi. Umumiy holda transformator statik elektromagnit qurilma bo'lib, unda elektr energiya zanjirning bir qismidan ikkinchi qismiga o'zaro induktiv bog'lanish yordamida uzatiladi. Transformatorlar induktiv bog'langan bir necha chulg'am (g'altak) lardan iborat bo'lib, ularning induktivligini oshirish va sochilgan magnit oqimlarini kamaytirish maqsadida chulg'amlar umumiy ferromagnit o'zakka joylashtiriladi. Transformator chulg'amlaridan biri energiya manbaiga ulanadi, qolgan chulg'amlariga esa, iste'molchilar ulanadi. Energiya manbaiga ulangan chulg'amni *birlamchi*, qolganlarini esa *ikkilamchi chulg'amlar* deb ataladi. Transformator chulg'amlari bir-biridan elektr izolyasiyalangan bo'lishi kerak. Magnit materiallarining xossalari magnit maydonning kuchlanganligiga bog'liq bo'lgani uchun, ular shu magnit maydonni hosil qiluvchi toklarga ham bog'liq bo'ladi. Shuning uchun o'zakli transformator umumiy holda chiziqli bo'lmagan xarakteristikali qurilmadir. Undagi jarayonlar chiziqli bo'lmagan differensial tenglamalar bilan ifodalanadi. Ferromagnit o'zaksiz (havoli) transformatorlarda elektromagnit jarayonlar

chiziqli differensial tenglamalar bilan ifodalanadi, shu sababdan bunday transformatorlar *chiziqli transformatorlar* deb ataladi (2.43-rasm).

Ikki chulg'amli chiziqli transformatorni o'zaro induktiv bog'langan ikkita g'altak ko'rinishida qarash mumkin.

Transformator chulg'amlaridagi energiya isrofini r_1 va r_2 rezistiv qarshiliklar bilan hisobga olinadi. Induktiv bog'langan zanjir tenglamasidan foydalanib sxemasi 2.43-rasmda keltirilgan ideal zanjir uchun kuchlanishlar muvozanat tenglamasini tuzamiz:



2.43-rasm.

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \\ -u_2 &= r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \right\}$$

Tok va kuchlanishlarning kompleks ifodasiga o'tamiz:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= (r_1 + j\omega L_1) \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2 \\ -\underline{U}_2 &= [(r_2 + j\omega L_2)] \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Agar tahlil qilinayotgan ikki chulg'amli chiziqli transformatorida ikkilamchi chulg'am toki $I_2 = 0$ bo'lsa, u holda transformatorning bu holati uning *salt ish rejimi* deyiladi. Bu rejim uchun birlamchi chulg'am toki I_1 ni aniqlaymiz:

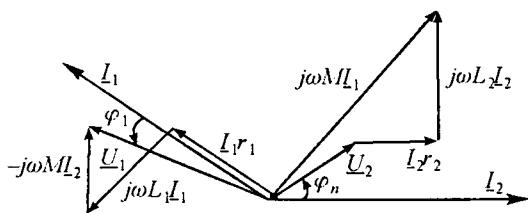
$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{r_1 + j\omega L_1} = \underline{I}_{10}.$$

Transformatorning salt ish rejimida manbadan qabul qilayotgan toki I_{10} *magnitlovchi tok* deb ataladi.

(2.3) tenglamalar sistemasini \underline{U}_1 kuchlanish va \underline{I}_1 tokka nisbatan yechamiz:

$$\underline{U}_1 = \left[\frac{r_1 + j\omega L_1}{j\omega M} + \frac{(r_1 + j\omega L_1)(r_2 + j\omega L_2) + \omega^2 M^2}{j\omega M Z_{yuk}} \right] \underline{U}_2, \quad \underline{I}_1 = \frac{r_2 + j\omega L_2 + Z_{yuk}}{j\omega M} \underline{I}_2.$$

Chiziqli transformatorida \underline{U}_1 kuchlanish va birlamchi chulg'am toki \underline{I}_1 , ikkilamchi chulg'am \underline{U}_2 kuchlanishi va toki \underline{I}_2 ga mos ravishda proporsional bo'lib, proporsionallik koeffitsiyenti ikkala tenglamada ham iste'molchi qarshiligi $\underline{Z}_{yuk} = \underline{U}_2 / \underline{I}_2$ ga bog'liq bo'ladi.



2.44-rasm.

Ferromagnit o'zaksiz transformator vektor diagrammasini quramiz (2.44-rasm).

Bunda iste'molchi $Z_{yuk} = Z_{yuk} e^{j\varphi_{yuk}}$ ni induktiv xarakterga ega deb

faraz qilamiz. Tok I_2 ni +1 absissa yarim o'qi bo'yicha yo'naltiramiz. Iste'molchidagi kuchlanish U_{yuk} tok I_2 ga nisbatan φ_n burchakka oldinda, $r_2 I_2$ esa kuchlanishi faza jihatidan tok I_2 bilan bir xil bo'ladi. Vektor $j\omega L_2 I_2$ esa, tok I_2 ga nisbatan 90° oldinda bo'ladi, (2.3) tenglamaga asosan vektor $j\omega M I_2$ ni shunday o'tkazamizki, unda ikkilamchi zanjir kuchlanishlar vektorlarining yig'indisi nolga teng bo'lsin. I_1 tok vektori kuchlanish $j\omega M I_1$ vektoridan 90° orqada qoladi. Vektor $r_1 I_1$ faza jihatidan I_1 tok vektori bilan mos tushadi, vektor $j\omega L_1 I_1$ esa vektor I_1 dan 90° oldinda bo'ladi. $j\omega M I_2$ vektori I_2 vektorga nisbatan 90° oldinda bo'ladi. Unda $\underline{U}_1 = r_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 + (-j\omega M I_2)$.

Elektr zanjirlar nazariyasida «mukammal» va «ideal» transformator tushunchalari katta ahamiyatga ega.

Mukammal transformator deb bog'lanish koeffitsiyenti birga ($k=1$) teng bo'lgan ideal to'rtqutblikka aytiladi. Demak, bunday transformatorlarda sochilgan magnit oqimlari bo'lmaydi.

Agar yuqoridagi ifodalarda $r_1 = r_2 = 0$ va $M = \sqrt{L_1 L_2}$ bo'lsa, u holda birlamchi chulg'amdagi tok va kuchlanish mukammal transformator uchun quyidagicha ifodalanadi:

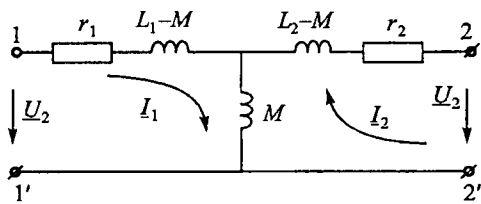
$$\underline{U}_1 = \left(\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \right) \underline{U}_2, \quad \underline{I}_1 = \left[\left(\sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \right) + \left(\sqrt{\frac{Z_{yuk}}{j\omega L_1}} \right) \left(\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \right) \right] \underline{I}_2, \quad n = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = \frac{L_2}{M} = \frac{M}{L_1},$$

bu yerda n — *transformatsiya koeffitsiyenti* deb ataladi. Transformatsiya koeffitsiyenti o'ramlar soni orqali quyidagicha ifodalanadi:

$$n = w_1/w_2, \quad \underline{U}_1 = n \underline{U}_2, \quad \underline{I}_1 = (\underline{I}_2/n + \underline{I}_{10}).$$

Mukammal transformatorning magnitlovchi toki $\underline{I}_{10} = \underline{U}_1/j\omega L_1$ ga teng bo'ladi, chunki unda $r_1 = 0$. Birlamchi chulg'am kuchlanishining ikkilamchi chulg'am kuchlanishiga nisbati transformatsiya koeffitsiyentiga teng, ya'ni $n = U_1/U_2$ va u iste'molchi qarshiligiga bog'liq emas. Mukammal transformatorning kompleks almashlash sxemasi 2.45-rasmda keltirilgan.

Agar mukammal transformatorning magnitlovchi toki nolga teng bo'lsa, bunday transformator *ideal transformator* deb ataladi. $I_{10} = U/\omega L_1$ ifodadan ko'rinib turibdiki, agar mukammal transformator



2.45-rasm.

$L_1 = \infty$ bo'lsa, u holda uning magnitlovchi toki nolga teng bo'ladi.

Demak, ideal transformator tenglamalarini $U_1 = nU_2$ ko'rinishda yozish mumkin. O'niy qiymatlar uchun esa: $i_1 = i_2/n$, $u_1 = nu_2$ bo'ladi.

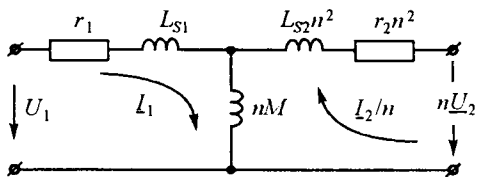
Agar ideal transformator 2-2' qismlariga $Z_{yuk} = U_2/I_2$ kompleks qarshilikli istemolchi ulangan bo'lsa, u holda transformatorning 1-1' qismlari tomonidan kirish qarshiligi $Z_{kir} = U_1/I_1 = U_2 n^2/I_2 = n^2 Z_{yuk}$ bo'ladi.

Shunday qilib, iste'molchi qarshiligi qanday xarakterda bo'lsa, transformatorning kirish qarshiligi shunday xarakterda bo'ladi, ammo uning moduli n^2 marta farq qiladi. Transformatorlarning qarshiliklar «modulini» o'zgartirish xususiyati radiotexnika qurilmalarida keng qo'llaniladi. Manba qarshiligini iste'molchi qarshiligi bilan moslashda real transformatorida ideal transformatorga qaraganda quvvat isrofi yuzaga keladi, ba'zi hollarda esa transformatorning chulg'amlarida sig'im qarshiliklar paydo bo'lib, induktivligi chegara qiymatga ega bo'ladi va sochilgan magnit maydonlar nolga teng bo'lmaydi. Bunday holat yuqori chastotada sodir bo'ladi. Demak, bunday holatni real transformatorlarda hisobga olish kerak bo'ladi.

Agar kuchlanishlar muvozanati tenglamalari (2.3) ning birinchisiga $j\omega M I_1$ ni, ikkinchisiga esa $j\omega M I_2$ ni qo'shib va ayirsak, u holda quyidagi tenglamalarni hosil qilamiz:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= [r_1 + j\omega(L_1 - M) + j\omega M] I_1 - j\omega M I_2 \\ -U_2 &= [r_2 + j\omega(L_2 - M) + j\omega M] I_2 - j\omega M I_1 \end{aligned} \right\}$$

Bu tenglamalar tegishli konturlarning tenglamasi bo'lib, 2.45-rasmda keltirilgan sxemaga taalluqli va uni ferromagnit o'zaksiz transformatorning almashlash sxemasi sifatida qarashimiz mumkin. Sxemaga kiruvchi $L_1 - M$ va $L_2 - M$ kattaliklar faqat birlamchi va ikkilamchi chulg'amlarning o'ramlari soni bir-biriga teng ($w_1 = w_2$) bo'lganda, ma'lum fizik ma'noga ega ekanligi rasmdan ko'rinib turibdi. Sochilgan induktivliklar L_{s1} va L_{s2}



2.46-rasm.

transformatorning birlamchi va ikkilamchi chulgʻamlariga tegishli boʻladi. Agar birlamchi va ikkilamchi chulgʻamlarning oʻramlari soni teng boʻlmasa, u holda transformatorning keltirilgan almashlash sxemasidan

foydalaniladi. Bunday sxema 2.46-rasmda koʻrsatilgan.

Ikkilamchi chulgʻamning kuchlanishi U_2 va toki I_2 birlamchi chulgʻamga keltiriladi va tegishli kattaliklar bilan almashtiriladi: U_2 kuchlanish n ga koʻpaytiriladi, toki esa n ga boʻlinadi. Unda tenglamalar sistemasi quyidagicha yoziladi:

$$\underline{U}_1 = (r_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega \frac{nM}{n} I_2;$$

$$-n\underline{U}_2 = n^2(r_2 + j\omega L_2)I_2/n - j\omega M I_1.$$

Bularni quyidagicha oʻzgartiramiz:

$$\underline{U}_1 = [r_1 + j\omega(L_1 - nM)]I_1 + j\omega nM I_1 - j\omega nM \frac{I_2}{n},$$

$$-n\underline{U}_2 = n^2[r_2 + j\omega(L_2 - M/n)]\frac{I_2}{n} + j\omega nM \frac{I_2}{n} - j\omega nM I_1.$$

Bu tenglamalar transformatorning keltirilgan almashlash sxemasining konturlari tenglamasini tashkil etadi (2.46-rasm). Transformatorning birlamchi chulgʻamiga keltirilgan almashlash sxemasi quyidagi qismlardan iborat: birlamchi chulgʻamning r_1 — aktiv qarshiligi va L_{S1} — sochilgan induktivligi; koʻndalang shoxobcha induktivligi $(w_1/w_2)M$ (bu shoxobcha magnitlovchi shoxobcha deb ataladi). Birlamchi chulgʻamga keltirilgan parametrlar r_2 va L_{S2} larni n^2 ga boʻlish bilan aniqlanadi. ωL_{S1} va ωL_{S2} lar transformator birlamchi va ikkilamchi chulgʻamlarining sochilgan induktiv qarshiliklari, $n\omega M$ esa magnitlovchi shoxobcha induktiv qarshiligi hisoblanadi.

Magnitlovchi kuch transformatorning umumiy magnit oqimini aniqlaydi va u birlamchi va ikkilamchi chulgʻamlarda toklar qarama-qarshi yoʻnalgan boʻlganda quyidagicha aniqlanadi:

$$i_1 w_1 - i_2 w_2 = \left(i_1 - \frac{w_2}{w_1} i_2\right) w_1 = \left(i_1 - \frac{i_2}{n}\right) w_1.$$

$(i_1 - i_2/n)$ toklar va ularga mos $(L_1 - L_2/n)$ kompleks toklar birlamchi chulgʻamga keltirilgan sxemada magnitlovchi shoxobchadan oʻtadi va

transformatorning *magnitlovchi toki* deb ataladi.

2.46-rasmda keltirilgan sxema uchun vektorlar diagrammasi 2.47-rasmda keltirilgan.

Vektor diagrammani qurishda ikkilamchi chulg'am kuchlanishi va toki birlamchi chulg'amga keltirilgan parametrlariga mos qilib olinadi. Keltirilgan aktiv qarshilik $n^2 r_2$ va sochilgan induktiv qarshilik $n^2 \omega L_{S2}$ lardagi kuchlanishlar tushuvi geometrik qo'shiladi, keltirilgan ikkilamchi kuchlanish nU_2 bilan bu chulg'amda hosil bo'lgan kuchlanishlarning geometrik yig'indisi magnitlovchi tokni magnitlash shoxobchasida hosil qilgan kuchlanish tushuvi $j\omega M(L_1 - L_2/n)$ ga teng bo'ladi; bu holda magnitlovchi tok undan hosil bo'lgan kuchlanish tushuvidan 90° orqada bo'ladi. Birlamchi tok ikkilamchi keltirilgan tok bilan magnitlovchi tokning geometrik yig'indisiga teng, ya'ni:

$$(L_1 - L_2/n) + L_2/n = L_1.$$

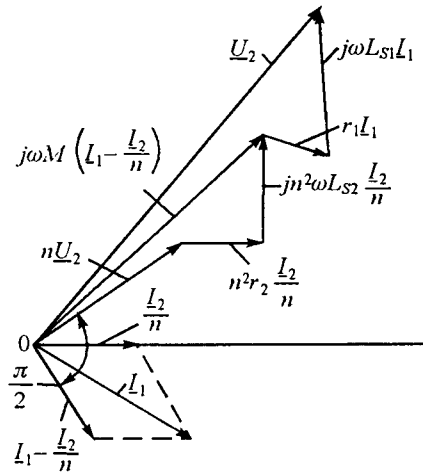
Birlamchi chulg'amning aktiv qarshiligidagi va sochilgan induktiv qarshiligidagi kuchlanishlar tushuvi geometrik qo'shiladi va magnitlovchi shoxobcha kuchlanishi bilan birlamchi kuchlanishni hosil qiladi.

2.12. TO'RTQUTBLIKLAR

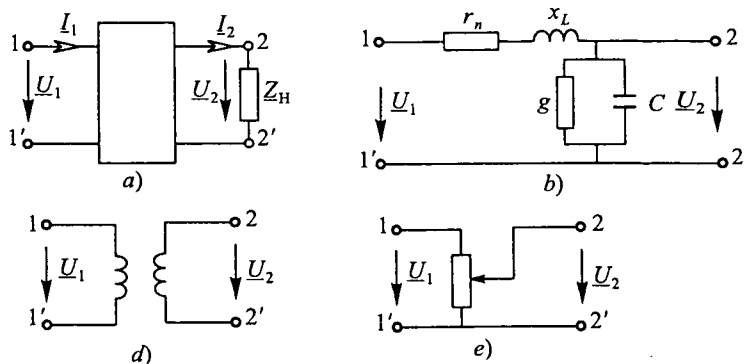
2.12.1. Umumiy ma'lumotlar

Ikkita kirish va ikkita chiqish qismlariga ega bo'lgan zanjirning qismi to'rtqutblik deb ataladi. Bunda to'rtqutblikning energiya manbaiga ulanadigan qismlari kirish, yuklama ulanadigan qismlari esa chiqish qismlari hisoblanadi.

Elektr sxemalarda to'rtqutblik 1-1' kirish va 2-2' chiqish qismlari bo'lgan to'g'ri to'rtburchak ko'rinishda belgilanadi (2.48-rasm, a).

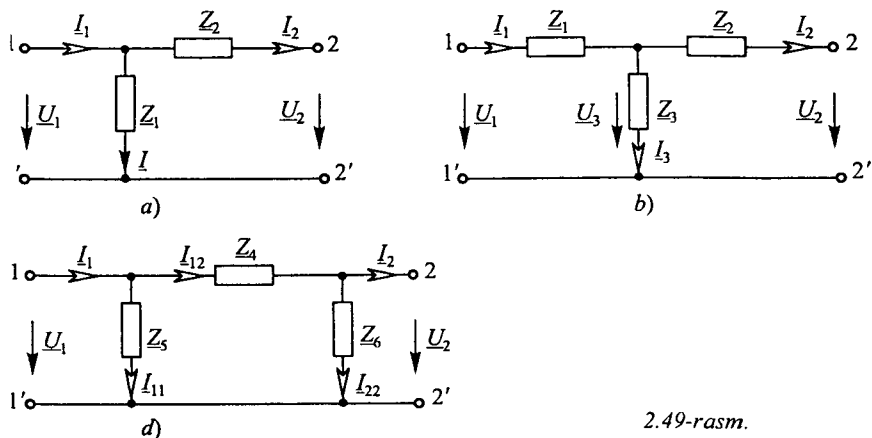


2.47-rasm.



2.48-rasm.

Elektr energiyani uzatish liniyasi (2.48-rasm, b), transformator (2.48-rasm, d), rostanuvchi rezistor (2.48-rasm, e), to'g'rilagich qurilmasi, ko'prik sxemalari, elektr filtrlar, kuchaytirgichlar va boshqa ko'pgina qurilmalar to'rtqutblik sifatida qaralishi mumkin. Agar to'rtqutblik ichida energiya manbai mavjud bo'lsa, u holda u *aktiv*, aks holda esa *passiv* deb ataladi hamda to'g'ri to'rtburchak ichiga mos ravishda A va P harfini yozish bilan farqlanadi. Agar to'rtqutblik faqat chiziqli elementlardan tashkil topgan bo'lsa, u holda u *chiziqli to'rtqutblik*, tarkibida hech bo'lmaganda bitta chiziqli bo'lmagan elementi bo'lgan to'rtqutblik esa *chiziqli bo'lmagan to'rtqutblik* deb ataladi. Agar to'rtqutblik qismlari o'rni almashtirilganda, ya'ni kirish qismlari yuklamaga, chiqish qismlari energiya manbaiga ulanganda, uning kirish va chiqish toklari o'zgarmasa,



2.49-rasm.

u holda bunday to'rtqutbliklar *simmetrik*, aks holda esa *nosimmetrik* deb ataladi. To'rtqutblik elementlarining o'zaro ulanish sxemalariga ko'ra Γ -simon (2.49-rasm, *a*), T -simon (2.49-rasm, *b*) va Π -simon (2.49-rasm, *d*) almashlash sxemali to'rtqutbliklarga bo'linadi.

To'rtqutblikni hisoblash deganda uning umumlashgan parametrlaridan foydalanib kirish va chiqish tok va kuchlanishlarini topish tushuniladi. Ixtiyoriy passiv to'rtqutblikda kirish toki I_1 va kuchlanishi \underline{U}_2 , uning chiqish toki I_2 va kuchlanishi \underline{U}_1 quyidagi *ikkita asosiy* tenglama bilan ifodalaniadi:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}I_2, \quad (2.4)$$

$$I_1 = \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}I_2, \quad (2.5)$$

bu yerda \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} — to'rtqutblikning kompleks koeffitsiyent (doimiy) lari. Bu koeffitsiyentlar to'rtqutblik elementlarining ulanish sxemalariga va elementlarning xarakteriga bog'liq bo'lib, $\underline{A}\underline{B} - \underline{C}\underline{D} = 1$ munosabat bilan aniqlanadi.

To'rtqutblikning yuqorida keltirilgan asosiy tenglamalari asosida uning turli xil almashlash sxemalarini hosil qilish mumkin. Bu sxemalar to'rtqutblik umumiy xossalarini tahlil qilishni osonlashtiradi. Amaliyotda ko'pincha T -simon va Π -simon almashlash sxemalardan keng foydalaniladi.

2.12.2. To'rtqutblikning T -simon almashlash sxemasi

T -simon almashlash sxemasi uchun to'rtqutblik koeffitsiyentlarini aniqlaymiz (2.49-rasm, *b*). Kirxgof qonunlariga ko'ra:

$$\underline{U}_1 = I_1 Z_1 + \underline{U}_3 = I_1 Z_1 + I_2 Z_2 + \underline{U}_2, \quad (2.6)$$

$$I_1 = I_2 + I_3 = I_2 + \frac{\underline{U}_3}{Z_3} = I_2 + \frac{I_2 Z_2 + \underline{U}_2}{Z_3}. \quad (2.7)$$

(2.7) ifodani (2.6) tenglamaga qo'yib, hosil qilamiz:

$$\underline{U}_1 = \left(1 + \frac{Z_1}{Z_3}\right) \underline{U}_2 + I_2 \left(Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}\right) = \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}I_2,$$

bu yerda $\underline{A} = \left(1 + \frac{Z_1}{Z_3}\right)$, $\underline{B} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}$.

(2.7) tenglamani quyidagicha o'zgartiramiz:

$$I_1 = \frac{1}{Z_3} U_2 + I_2 \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right) = \underline{C} U_2 + \underline{D} I_2,$$

bu yerda $\underline{C} = \frac{1}{Z_3}$, $\underline{D} = 1 + \frac{Z_2}{Z_3}$.

Yuqoridagi ifodalardan ko'rinib turibdiki, \underline{B} koeffitsiyent qarshilik birligida, \underline{C} o'tkazuvchanlik birligida bo'lib, \underline{A} va \underline{D} koeffitsiyentlar esa o'lchovsiz kattaliklar hisoblanadi. Simmetrik to'rtqutbliklarda $Z_1 = Z_2$ bo'lib, $\underline{A} = \underline{D}$ shart bajariladi.

Agar to'rtqutblik koeffitsiyentlari ma'lum bo'lsa, u holda T -simon almashlash sxema parametrlari quyidagicha aniqlanadi:

$$Z_1 = \frac{A-1}{C}, \quad Z_2 = \frac{D-1}{C}, \quad Z_3 = \frac{1}{C}.$$

Oxirgi munosabatlardan quyidagicha xulosa chiqarish mumkin: to'rtqutblik kirish va chiqish qismalari o'zaro almashtirilsa, \underline{B} va \underline{C} koeffitsiyentlar o'zgarmaydi, ammo tenglamalarda \underline{A} va \underline{D} koeffitsiyentlar o'rnini almashib keladi, ya'ni:

$$\underline{U}_2 = \underline{D} \underline{U}_1 + \underline{B} \underline{I}_1, \quad \underline{I}_2 = \underline{C} \underline{U}_1 + \underline{A} \underline{I}_1 \quad (2.8)$$

2.12.3. To'rtqutblikning Π -simon almashlash sxemasi

Π -simon almashlash sxemasi uchun Kirxgof qonunlari asosida quyidagi tenglamalarni yozish mumkin (2.49-rasm, d):

$$\underline{I}_{12} = \underline{I}_{22} + \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{Z_6} + \underline{I}_2,$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{I}_{12} Z_4 + \underline{U}_2 = \left(\frac{\underline{U}_2}{Z_6} + \underline{I}_2 \right) Z_4 + \underline{U}_2 = \\ &= \underline{U}_2 \left(1 + \frac{Z_4}{Z_6} \right) + \underline{I}_2 Z_4 = \underline{A} \underline{U}_2 + \underline{B} \underline{I}_2, \end{aligned} \quad (2.9)$$

bu yerda $\underline{A} = 1 + \frac{Z_4}{Z_6}$, $\underline{B} = Z_4$.

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_{11} + \underline{I}_{12} = \frac{\underline{U}_1}{Z_5} + \frac{\underline{U}_2}{Z_6} + \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{Z_5} \left(1 + \frac{Z_4}{Z_6} \right) + \underline{I}_2 \frac{Z_4}{Z_5} + \frac{\underline{U}_2}{Z_6} + \underline{I}_2 = \\ &= \underline{U}_2 \left(\frac{Z_4 + Z_5 + Z_6}{Z_6 Z_5} \right) + \underline{I}_2 \left(1 + \frac{Z_4}{Z_5} \right) = \underline{C} \underline{U}_2 + \underline{D} \underline{I}_2. \end{aligned}$$

Ox irgi tenglamadan:

$$\underline{C} = \frac{\underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6}{\underline{Z}_6 \underline{Z}_5} = \frac{1}{\underline{Z}_6} + \frac{1}{\underline{Z}_5} + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_6 \underline{Z}_5}, \quad \underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_5}.$$

O'z navbatida agar \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} koeffitsiyentlar ma'lum bo'lsa, u holda Π -simon almashlash sxemasi parametrlari quyidagicha topiladi:

$$\underline{Z}_4 = \underline{B}, \quad \underline{Z}_5 = \frac{\underline{B}}{\underline{D}-1}, \quad \underline{Z}_6 = \frac{\underline{B}}{\underline{A}-1}.$$

Agar $\underline{Z}_5 = \underline{Z}_6$ shart bajarilsa, unda to'rtqutblik simmetrik bo'lib, $\underline{A} = \underline{D}$ bo'ladi.

2.12.4. To'rtqutblik koeffitsiyentlarini tajriba yordamida aniqlash

Passiv to'rtqutblik kompleks koeffitsiyentlarini tajriba yordamida aniqlash mumkin. Buning uchun to'rtqutblik parametrlari qiymatlari va elementlarining ulanish sxemasini bilish shart emas.

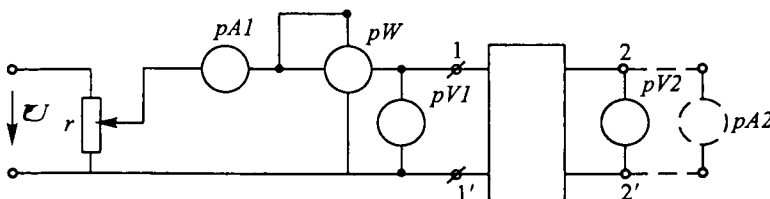
\underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} koeffitsiyentlarni topish formulalarini salt ish va qisqa tutashish tajribalari natijalariga asosanib hosil qilish mumkin. Tajriba o'tkaziladigan sxema 2.50-rasmda keltirilgan.

1. *To'rtqutblik kirish qismlari manbaga ulangan holat uchun salt ish tajribasi.* Qarshiligi rostlanadigan rezistor R yordamida to'rtqutblik kirishiga U_{2nom} kuchlanishga teng bo'lgan kuchlanish beriladi va o'lchov asboblari yordamida U_{10} , I_{10} va φ_{10} lar aniqlanadi. Salt ish rejimida $I_{20} = 0$ bo'lganligi sababli (2.4) va (2.5) tenglamalar quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}U_{2n}, \quad I_{10} = \underline{C}U_{2n},$$

$$\underline{Z}_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}} = \frac{U_{10}}{I_{10}} \cdot 5^{j\varphi_{10}} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}} \frac{U_{2n}}{U_{2n}} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}. \quad (2.10)$$

2. *To'rtqutblik kirish qismlari manbaga ulangan holat uchun qisqa tutashish tajribasi.* Bu tajribani o'tkazish uchun to'rtqutblik chiqish



2.50-rasm.

qismlariga ampermetr ulab uning kirishiga shunday kuchlanish beramizki, bunda to'rtqutblik chiqishidagi tok I_{2nom} ga teng bo'lsin. O'lchov asboblari yordamida U_{1q} , I_{1q} va φ_{1q} larni topamiz. Qisqa tutashish rejimida $U_{2q}=0$ bo'lganligi sababli (2.4) va (2.5) tenglamalar quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\underline{U}_{1q} = \underline{B}I_1, I_{1q} = \underline{D}I_{2n},$$

bundan:

$$\underline{Z}_{1q} = \frac{\underline{U}_{1q}}{I_{1q}} = \frac{\underline{U}_{1q}}{I_{1q}} \cdot e^{j\varphi_{1q}} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}} \frac{I_{2n}}{I_{2n}} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}}. \quad (2.11)$$

3. *To'rtqutblik chiqish qismlari manbaga ulangan holat uchun salt ish tajribasi.* To'rtqutblik 2-2' chiqish qismlariga shunday kuchlanish beramizki, bunda kirish qismlaridagi kuchlanish U_{1nom} ga teng bo'lsin. O'lchov asboblari yordamida U_{20} , I_{20} va φ_{20} ni yozib olamiz. Salt ish rejimida $I_{10}=0$ bo'lganligi uchun (2.8) tenglamalar quyidagicha yoziladi:

$$\underline{U}_{20} = \underline{D}U_{1n}, I_{20} = \underline{C}U_{1n}.$$

To'rtqutblikning chiqish qismlari tomonidan kirish qarshiligi:

$$\underline{Z}_{20} = \frac{\underline{U}_{20}}{I_{20}} = \frac{\underline{U}_{20}}{I_{20}} \cdot e^{j\varphi_{20}} = \frac{\underline{D}}{\underline{C}} \frac{U_{1n}}{U_{1n}} = \frac{\underline{D}}{\underline{C}}. \quad (2.12)$$

4. *To'rtqutblik chiqish qismlari manbaga ulangan holat uchun qisqa tutashish tajribasi.* (2.8) tenglamalar $U_{1q}=0$ bo'lganda $\underline{U}_{2q} = \underline{B}I_{1n}$, $I_{2q} = \underline{A}I_{1n}$.

Kirish qarshiligi:

$$\underline{Z}_{2q} = \frac{\underline{U}_{2q}}{I_{2q}} = \frac{\underline{U}_{2q}}{I_{2q}} \cdot e^{j\varphi_{2q}} = \frac{\underline{B}}{\underline{A}} \frac{I_{1n}}{I_{1n}} = \frac{\underline{B}}{\underline{A}}. \quad (2.13)$$

(2.10)—(2.13) tenglamalar o'zaro $\underline{Z}_{1q}/\underline{Z}_{10} = \underline{Z}_{2q}/\underline{Z}_{20}$ munosabat bilan bog'langanligini inobatga olsak, unda \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} koefitsiyentlarni topish mumkin. (2.10)—(2.13) tenglamalarni $\underline{AD} - \underline{BC} = 1$ tenglama bilan birgalikda yechib, quyidagilarni hosil qilamiz:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{10}}{\underline{Z}_{20} - \underline{Z}_{2q}}}, \quad \underline{B} = \underline{A}\underline{Z}_{2q}, \quad \underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{10}}, \quad \underline{D} = \underline{C}\underline{Z}_{20}.$$

Shunday qilib, to'rtqutblikning \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} koefitsiyentlarini aniqlash uchun yuqorida keltirilgan tajribalardan uchtasini, simmetrik to'rtqutblik uchun esa ikkitasini o'tkazish kifoya.

2.12.5. To'rtqutblikning salt ishlashi va qisqa tutashishi

(2.4) va (2.5) tenglamalardan ko'rinib turibdiki, to'rtqutblik kirishidagi kuchlanish ham, tok ham ikkita tashkil etuvchidan iborat bo'lib, ulardan biri U_2 kuchlanishga, ikkinchisi esa I_2 tokka proporsional.

To'rtqutblikning ikkita: *salt ish* va *qisqa tutashish* chegaraviy rejimlarini ko'rib chiqamiz. Salt ish rejimida to'rtqutblik chiqishidagi kuchlanish uning normal ish rejimidagi nominal kuchlanishga, qisqa tutashish rejimida to'rtqutblik chiqish toki normal ish rejimidagi tokka teng qilib olinadi:

$$\underline{U}_{10} = \underline{A}U_2, \underline{U}_{1q} = \underline{B}I_2, \underline{I}_{10} = \underline{C}U_2, \underline{I}_{1q} = \underline{D}I_2 \quad (2.14)$$

(2.14) va (2.8) tenglamalarni o'zaro taqqoslab, \underline{U}_1 kuchlanish va I_1 tok salt ish va qisqa tutashish rejimlaridagi mos ravishda kuchlanishlar va toklar yig'indisiga tengligiga ishonch hosil qilish mumkin, ya'ni:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}U_2 + \underline{B}I_2 = \underline{U}_{10} + \underline{U}_{1q}, \quad I_1 = \underline{C}U_2 + \underline{D}I_2 = I_{10} + I_{1q}$$

Shunday qilib, to'rtqutblik kirish qismidagi kuchlanish va tokni salt ish va qisqa tutashish rejimlari natijalarini ustma-ustlab aniqlash mumkin.

Katta quvvatli elektrotexnik qurilmalarni sinovdan o'tkazishda ustma-ustlash prinsipini qo'llash alohida ahamiyatga ega. Chunki salt ish va qisqa tutashish tajribalarini o'tkazishda yuklama rejimidagiga nisbatan ancha kam quvvatli energiya manbaini talab qiladi va bunda elektrotexnik qurilmalarni sinovdan o'tkazishda katta miqdorda elektr energiya tejiladi.

2.12.6. Istalgan yuklama uchun to'rtqutblikning kirish qarshiligi

To'rtqutblik ish rejimini tavsiflashda ko'pincha uning kirish qarshiligi tushunchasidan foydalaniladi. To'rtqutblik kirish kuchlanishi \underline{U}_1 ning kirish toki I_1 ga nisbati uning *kirish qarshiligi* deb ataladi. Bunda manba to'rtqutblikning kirish qismalariga ulangan deb hisoblanadi. Demak:

$$\underline{Z}_{kir(1)} = \frac{\underline{U}_1}{I_1} = \frac{\underline{A}U_2 + \underline{B}I_2}{\underline{C}U_2 + \underline{D}I_2} = \frac{\underline{A}Z_n + \underline{B}}{\underline{C}Z_n + \underline{D}}, \quad (2.15)$$

bu yerda $Z_n = \underline{U}_2/I_2$.

Xuddi shuningdek, manba to'rtqutblikning chiqish qismalariga ulangandagi kirish qarshiligi quyidagiga teng:

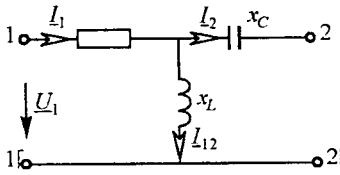
$$\underline{Z}_{kir(2)} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{DU_1 + BI_1}{AU_1 + AI_1} = \frac{D\underline{Z}_n + B}{C\underline{Z}_n + A}. \quad (2.16)$$

(2.15) va (2.16) tenglamalardagi \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} koeffitsiyentlar o'rniga (2.10)—(2.13) ifodalarini qo'yib, amalda ko'p uchraydigan quyidagi munosabatlarni hosil qilishimiz mumkin:

$$\underline{Z}_{kir(1)} = \frac{A(\underline{Z}_n + B/A)}{C(\underline{Z}_n + D/C)} = \underline{Z}_{10} \frac{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{2q}}{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{20}},$$

$$\underline{Z}_{kir(2)} = \frac{D(\underline{Z}_n + B/D)}{C(\underline{Z}_n + A/C)} = \underline{Z}_{20} \frac{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{1q}}{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{10}}.$$

Shuni ta'kidlash joizki, to'rtqutblikning yuqorida ko'rilgan tenglamalaridan tashqari turli ko'rinishdagi tenglamalari ham mavjud.



2.51-rasm.

Masala. 2.51-rasmda keltirilgan to'rtqutblik T -simon almashlash sxemasi uchun \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} koeffitsiyentlarni toping va $\underline{AD} - \underline{BC} = 1$ munosabatni tekshirib ko'ring. Quyidagilar berilgan: $r = 100 \Omega$, $x_L = 200 \Omega$, $x_C = 100 \Omega$.

Yechish. To'rtqutblik koeffitsientlarini topish uchun uning salt ish va qisqa tutashish rejimlari uchun yozilgan (2.14) tenglamalaridan foydalanamiz:

$$\underline{A} = \frac{U_{10}}{U_{2n}} = \frac{U_1}{(U_1 \cdot jx_L)/(r + jx_L)} = \frac{r + jx_L}{jx_L} = \frac{100 + j200}{j200} = 1 - j0,5.$$

\underline{B} koeffitsiyentni aniqlash uchun avval qisqa tutashish to'kini topamiz:

$$\underline{I}_{2q} = \frac{U_{1q}}{r + \frac{x_L x_C}{jx_L - jx_C}} \cdot \frac{jx_L}{jx_L - jx_C} = \frac{U_{1q} jx_L}{x_L x_C + jr(x_L - x_C)}.$$

\underline{I}_{2q} tokning topilgan ifodasidan foydalanib, \underline{B} koeffitsiyentni aniqlaymiz:

$$\underline{B} = \frac{U_{1q}}{\underline{I}_{2q}} = \frac{x_L x_C + jr(x_L - x_C)}{jx_L} = 50 - j100 \Omega,$$

$$\underline{C} = \frac{I_{10}}{U_{20}} = \frac{I_{10}}{jx_L I_{10}} = -j0,005 \text{ Sm}, \quad \underline{D} = \frac{I_{1q}}{\underline{I}_{2q}} = \frac{I_{1q}}{I_{1q} \frac{jx_L}{x_L - x_C}} = \frac{x_L - x_C}{x_L} = 0,5.$$

Endi $\underline{AD} - \underline{BC} = 1$ munosabatni tekshirib ko'ramiz:

$$\underline{AD} - \underline{BC} = (1 - j0,5) \cdot 0,5 - (50 - j100) \cdot (-j0,005) = 1.$$

MUSTAQIL TAYYORLANISHGA DOIR REFERAT MAVZULARI

1. Sinusoidal EYuNi hosil qilish, uni tavsiflovchi asosiy ko'rsatkichlar.
2. Sinusoidal tok chiziqli elektr zanjirlarida rezistor, induktiv g'altak va kondensator.
3. Sinusoidal tok zanjirlarida quvvat. Quvvatlar balansi.
4. Sinusoidal tok zanjirlarini kompleks usulda hisoblash asoslari.
5. Elektr zanjirlarida rezonans va uning ahamiyati.
6. Elektrotexnik qurilmalarning quvvat koeffitsiyenti va uni oshirish usullari.
7. Induktiv bog'langan zanjirlar va ularni hisoblash asoslari.
8. O'zaksiz transformator, uning almashlash sxemalari va vektor diagrammasi.
9. To'rtqutbliklar: asosiy tenglamalari va almashlash sxemalari.
10. To'rtqutblik koeffitsiyentlarini tajriba yordamida aniqlash.

O'Z-O'ZINI SINASH SAVOLLARI

1. Sinusoidal tokni o'zgarmas tokka nisbatan afzalliklarini aytib bering.
2. Sinusoidal kattalik(EYK, tok, kuchlanish)larni tavsiflovchi asosiy ko'rsatkichlarga nimalar kiradi?
3. Sinusoidal EYK qanday hosil qilinadi?
4. Sinusoidal EYK, tok va kuchlanishlarning ta'sir etuvchi(effektiv) va o'rtacha qiymatlari qanday aniqlanadi?
5. Sinusoidal kattaliklarning amplituda va shakl koeffitsiyentlari qanday hisoblanadi?
6. Sinusoidal kattaliklarni aylanuvchi vektorlar bilan tasvirlashning mohiyatini tushuntirib bering.
7. Sinusoidal kuchlanish va tok vektorlari orasidagi faza siljish burchagi deganda nima tushuniladi?
8. Aktiv, induktiv, sig'im, reaktiv va to'la qarshiliklar ifodalarini yozing va ma'nolarini tushuntirib bering.
9. Qarshiliklar, toklar va kuchlanishlar uchburchaklari nima?
10. Aktiv, reaktiv va to'la quvvatlar elektr zanjirining qanday xususiyatlarini tavsiflaydi? Quvvatlar uchburchagi nima?
11. Sinusoidal kattaliklarni kompleks tekislikda vektorlar bilan tasvirlash qanday amalga oshiriladi va u qanday qulayliklar tug'diradi?
12. Zanjirning kompleks to'la qarshiligi va o'tkazuvchanligi nima?
13. Om, Kirxgof qonunlarining kompleks shakllarini yozib bering.
14. Kompleks quvvat va kompleks quvvatlar balansi nima?
15. Sinusoidal tok zanjirlarini kompleks usulda hisoblash ketma-ketligini aytib bering.
16. Elektr zanjirida tebranish konturi nima?
17. Elektr zanjirlarida rezonans hodisasi nima va uni mexanikadagi rezonans bilan taqqoslang?
18. Rezonans shartlari nima?
19. Kuchlanishlar rezonansi nima va uni hosil qilish usullarini so'zlab bering?
20. Toklar rezonansi nima va uni hosil qilish usullarini ayting?
21. Tebranish konturining to'liq qarshiligi va asllik koeffitsiyenti nima?
22. Rezonans hodisasining amaliy ahamiyatini ayting.

23. Quvvat koeffitsiyenti va uning amaliy ahamiyati haqida nimalarni bilasiz?
24. O'zinduksiya va o'zaroinduksiya hodisalarini tushuntirib bering.
25. O'zaroinduktivlik va induktiv bog'lanish koeffitsiyenti nima?
26. Ketma-ket va parallel ulangan o'zaro induktiv bog'langan zanjirlarda o'zaro induktivlik qanday aniqlanadi?
27. O'zaro induktiv bog'langan zanjirlarni hisoblashning o'ziga hos xususiyatlarini izohlang.
28. O'zaro induktiv bog'langan ikkita kontur bir xil nomli qismlarini va o'zaro induktivlikni tajriba yordamida aniqlash usullarini tushuntirib bering.
29. Induktiv bog'langan zanjirlarni tahlil qilishda ekvivalent sxemalardan foydalanishning afzalliklari nimalardan iborat?
30. Induktiv bog'langan zanjirlarda energiya uzatish jarayoni qanday amalga oshadi?
31. Induktiv bog'langan zanjirlarda rezonans hodisasining o'ziga xos xususiyatlarini tushuntirib bering.
32. O'zaksiz transformatorning tuzilishi va ishlash prinsipini aytib bering.
33. O'zaksiz transformatorning ekvivalent almashlash sxemasi qanday elementlardan tashkil topgan?
34. Ideal transformator nima? Mukammal transformator-chi?
35. To'rtqutblik deb qanday sxemalarga aytiladi? Unga misollar keltiring.
36. Qanday to'rtqutbliklar simmetrik, chiziqli, aktiv va passiv deb ataladi?
37. To'rtqutblikning asosiy tenglamalarini yozing va ularni izohlab bering.
38. To'rtqutblikning qanday ko'rinishdagi tenglamalarini bilasiz?
39. To'rtqutblikning qanday almashlash sxemalarini bilasiz?
40. To'rtqutblikning salt ishlash va qisqa tutashish rejimlarini izohlab bering.
41. To'rtqutblikning A, B, C va D koeffitsiyentlari tajriba yordamida qanday tartibda aniqlanadi?
42. To'rtqutblikning istalgan yuklamadagi kirish qarshiligi ifodalarini yozing.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. *Karimov A.S.* Elektrotexnikaning nazariy asosalri. – Toshkent, 2003.
2. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 2007.
3. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В.* Теоретические основы электротехники. – Санкт-Петербург. Питер, 2006.
4. *Коровкин Н.В.* и др. Сборник задач по теоретическим основам электротехники. – Санкт-Петербург. Питер, 2006.
5. *Новгородцев А.Б.* Теоретические основы электротехники. Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2006.
6. *Арсеньев Г.Н., Градов И.И.* Основы теории цепей. Учебное пособие. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2007.
7. *Прянишников В.А.* Теоретические основы электротехники. Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2007.
8. *Бычков Ю.А.* и др. Теоретические основы электротехники. Справочник по теории электрических цепей. – СПб.: Питер, 2007.
9. *Зевеке Г.В., Ионкин П.А.* и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. *Горбунов А.Н., Кравцов А.В.* и др. Теоретические основы электротехники. – М.: УМЦ «ТРИАДА», 2003.
11. *Евдокимов Ф.Е.* Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1984.
12. *Бессонов Л.А., Демидов И.Г.* и др. Сборник задач по теоретическим основам электротехники. – М.: Высшая школа, 1980.
13. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники / Под ред. П. А. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982.
14. *Атабеков Г.И.* Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1978.
15. *Шебес М.Р., Каблукова М.В.* Задачник по теории линейных электрических цепей. – М.: Высшая школа, 1990.
16. *Karimov A.S., Mirxaydarov M.M.* va b. Elektrotexnika va elektronika asoslari. Toshkent: «O'qituvchi», 1995.
17. *Матханов П.Х.* Основы анализа электрических цепей: Линейные цепи. – М.: Высшая школа, 1990.
18. *Иродов И.Е.* Основные законы электромагнетизма: Учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е, стереотип. – М.: Высшая школа, 1991.

MUNDARIJA

So'zboshi	3
Elektrotexnika taraqqiyoti tarixidan	5
O'zbekistonda elektrotexnikaning rivojlanishiga doir tarixiy ma'lumotlar	9
O'zbekistonda elektrotexnikaning rivojlanishiga hissa qo'shgan olimlar to'g'risida	16

Birinchi bob.

O'ZGARMAS TOK CHIZIQLI ELEKTR ZANJIRLARI VA ULARNI HISOBLASH USULLARI

1.1. Elektr zanjirlarni tavsiflovchi asosiy kattaliklar	18
1.1.1. Elektr maydonining kuchlanganligi	18
1.1.2. Elektr potensial va kuchlanish	19
1.1.3. Elektr tok. Tok zichligi	21
1.2. Elektr zanjir va uning elementlari	22
1.3. Om qonuni	27
1.3.1. Zanjirning EYK manbali qismi uchun Om qonuni	27
1.3.2. Katta toklarda Om qonunining buzilishi	29
1.4. Potensial diagramma	30
1.5. Elektr energiya va elektr quvvat. Quvvatlar balansi	34
1.5.1. Elektr energiya	34
1.5.2. Elektr quvvat.	35
1.5.3. Energiya manbaining FIK.	35
1.5.4. Elektr zanjirlarida quvvatlar balansi.	36
1.6. Kirxgof qonunlari.	37
1.7. Kirxgof qonunlari asosida murakkab elektr zanjirlarining topologik tenglamalarini tuzish.	39
1.8. Chiziqli elektr zanjir sxemalarini ekvivalent o'zgartirish	42
1.8.1. Ketma-ket ulangan elementlardan iborat zanjirni ekvivalent o'zgartirish	42
1.8.2. Parallel ulangan elementlardan iborat zanjirlarni ekvivalent o'zgartirish	44
1.8.3. Aralash ulangan elementlardan iborat zanjirlarni ekvivalent o'zgartirish	45
1.8.4. Qarshiliklar uchburchagini qarshiliklar yulduziga va aksincha ekvivalent o'zgartirish.	47
1.8.5. EYK va tok manbaiga ega bo'lgan parallel shoxobchalarni ekvivalent o'zgartirish.	50
1.9. Proporsional kattaliklar usuli	52
1.10. Kontur toklar usuli	53
1.11. Tugun potentsiallar usuli	56
1.12. Ikki tugun usuli	59
1.13. Ustma-ustlash prinsipi va uni elektr zanjirlarini hisoblashda qo'llash	60
1.14. O'zarolik xususiyati va uni tarmoqlangan elektr zanjirlarini hisoblashda qo'llash	63

1.15. Aktiv ikki qutblik haqida teorema va uni murakkab elektr zanjirlarni hisoblashda qo'llash. Ekvivalent generator usuli	66
1.16. Asosiy topologik tushunchalar va ularni elektr zanjirlarni hisoblashda qo'llash	70
<i>Mustaqil tayyorlanishga doir referat mavzulari</i>	73
<i>O'z-o'zini sinash savollari</i>	73

Ikkinchi bob.

BIR FAZALI SINUSOIDAL TOK CHIZIQLI ELEKTR ZANJIRLARI

2.1. Umumiy ma'lumotlar	75
2.2. Sinusoidal tok va kuchlanishlarning amplitudasi, chastotasi va fazasi	75
2.3. Sinusoidal EYK ni hosil qilish.	76
2.4. Sinusoidal tok, EYK va kuchlanish ta'sir etuvchi (effektiv) va o'rtacha qiymatlari	77
2.5. Sinusoidal kattaliklarni vektorlar bilan tasvirlash	80
2.6. Sinusoidal tok zanjirlarida rezistor, induktiv g'altak va kondensator	81
2.6.1. Rezistiv elementli sinusoidal tok zanjiri.	82
2.6.2. Induktiv elementli elektr zanjirda sinusoidal tok. Induktiv qarshilik.	84
2.6.3. Rezistor va induktiv g'altakdan iborat zanjir	85
2.6.4. Sig'im elementli elektr zanjirdagi sinusoidal tok. Sig'im qarshiligi	88
2.6.5. Rezistor va kondensatordan iborat zanjir	89
2.6.6. Rezistor, induktiv g'altak va kondensator ketma-ket ulangan sinusoidal tok zanjiri	90
2.6.7. Rezistor, induktiv g'altak va kondensator parallel ulangan sinusoidal tok zanjiri	91
2.7. Sinusoidal tok zanjirida quvvat	93
2.8. Sinusoidal tok zanjirlarini kompleks usulda hisoblash	94
2.8.1. Sinusoidal kattaliklarni kompleks tekislikda vektorlar bilan tasvirlash.	94
2.8.2. Om va Kirxgof qonunlarining kompleks shakli.	96
2.8.3. Kompleks quvvat	98
2.8.4. Sinusoidal tok zanjirlarida quvvatlar balansi	98
2.8.5. Sinusoidal tok zanjirlarini kompleks usulda hisoblash.	100
2.9. Elektr zanjirlarida rezonans	102
2.9.1. Kuchlanishlar rezonansi	103
2.9.2. Toklar rezonansi	106
2.10. Elektrotexnik qurilmalarning quvvat koeffitsiyenti va uning mohiyati. Quvvat koeffitsiyentini oshirish usullari va hisoblash asoslari	109
2.11. Induktiv bog'langan zanjirlar. O'zaro bog'lanish koeffitsiyenti	112
2.11.1. Umumiy ma'lumotlar	112
2.11.2. O'zaro induksiya EYK	113
2.11.3. Ketma-ket va parallel ulangan o'zaro induktiv bog'langan zanjirlar	114
2.11.4. O'zaro induktiv bog'langan zanjirlarni hisoblash	117
2.11.5. Ikki konturli o'zaro induktiv bog'langan zanjirda bir xil nomlangan qismalarni va o'zaro induktivlikni aniqlash usullari	120
2.11.6. Induktiv bog'langan zanjirlarning ekvivalent sxemalari	121

2.11.7. Induktiv bog‘langan zanjirlarda energiya uzatish.	123
2.11.8. Induktiv bog‘langan konturlarda rezonans.	124
2.11.9. O‘zaksiz transformatorlar. Transformatorlarni almashlash sxemasi va vektor diagrammasi	126
2.12. To‘rtqutbliklar	131
2.12.1. Umumiy ma‘lumotlar.	131
2.12.2. To‘rtqutblikning <i>T</i> -simon almashlash sxemasi.	133
2.12.3. To‘rtqutblikning <i>II</i> -simon almashlash sxemasi	134
2.12.4. To‘rtqutblik koeffitsiyentlarini tajriba yordamida aniqlash	135
2.12.5. To‘rtqutblikning salt ishlashi va qisqa tutashishi	137
2.12.6. Istalgan yuklama uchun to‘rtqutblikning kirish qarshiligi	137
<i>Mustaqil tayyorlanishga doir referat mavzulari</i>	139
<i>O‘z-o‘zini sinash savollari</i>	139
Foydalanilgan adabiyotlar.	141

***Sulton Fayzullayevich Amirov, Mirjalil Soatovich Yoqubov,
Nasim G‘afforovich Jabborov***

ELEKTROTEXNIKANING NAZARIY ASOSLARI

Oliy o‘quv yurtlari talabalari uchun o‘quv qo‘llanma

Toshkent — «Talqin» — 2008

Muharrir	<i>M. Sa‘dullayev</i>
Texnik muharrir	<i>A. Salihov</i>
Kompyuterda tayyorlovchi	<i>Ye. Gilmudinova</i>

Bosishga 22.07.2008. da ruxsat etildi. Bichimi 60x84^{1/16}. Ofset bosma usulida bosildi.
Shartli b.t. 8,37. Nashr t. 9,0. Adadi 1000 nusxa. Bahosi shartnoma asosida.
Shartnoma № 19/08. 228-sonli buyurtma.

«Talqin» nashriyoti, 100129. Toshkent, Navoiy ko‘chasi-30.

«Arnaprint» MChJda sahifalanib chop etildi.
Toshkent, H. Boyqaro ko‘chasi, 41.