

ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ВА
КОММУНИКАЦИЯЛАРИНИ РИВОЖЛАНТИРИШ ВАЗИРЛИГИ
ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ФАРҒОНА ФИЛИАЛИ

Телекоммуникация технологиялари ва касбий таълим факультети

“Телекоммуникация инжиниринги” кафедраси

“Электр занжирлар назарияси ”

фанидан

КУРС ИШИ

Бажарди:

630-14 гуруҳ талабаси

Бўтабоева Э

Қабул қилди:

Жўраева Г

Фарғона 2016

1.Кириш. Электр занжирларининг ривожланиши ва жамиятимизда

тутган ўрни.

Электр занжирларининг ривожланиши ва жамият ҳаётининг барча соҳаларига (саноат, транспорт, ахборот тизимлари, тиббиёт, маиший хизмат) жадал кириб бориши, унинг турли хил воситалар билан сигнал турини ўзгартириш, узоқ мософаларга етказиш, сигналлар ва ахборотни ўзгартириш ва узатиш муоммоларини ечишга имкон бериши билан изоҳлаш мумкин. Электрон ҳисоблаш машиналарининг жуда катта тезликда мураккаб математик амалларни, тенгламалар ва масалаларни ечишида, мураккаб ишлаб-чиқариш жараёнларини автоматик бошқаришда сигналлар, тасвир ва ахборотнинг бошқа ҳар хил турларини (телеграф, радио, телевидение) қайта ишлаш, узатиш жараёнларида электр сигналлардан фойдаланилади.

Ҳозирги замон ахборотни етказиш, қайта ишлаш тизимлари шундай мураккаб техник қурилмалар бўлиб, электр занжирлари назарияси, радиотехника, электроника ва ҳисоблаш техникасининг энг охирги илмий техник ютуқларини ўз ичида мужассамлантиргандир. Охирги йилларда дунёнинг бир қанча давлатларида, шулар қаторида бизнинг давлатимизда ҳам, рақамли автоматик коммутацион станциялар, узатишнинг рақамли, толали-оптик тизимлари, спутник алоқа тизимлари билан жиҳозланган ҳар хил харқаро телекоммуникацион тармоқлар ишлаб чиқилмоқда ва эксплуатация қилинмоқда.

XIX аср бошларида магнетизм ва электр соҳаларидаги бажарилган илмий тадқиқотлар электр ва магнит ҳодисаларининг муҳим хусусиятларини, яъни электр зарядланган заррачаларнинг ҳаракати доимо магнит ҳодисалари билан бирга содир бўлишини ва уларнинг мутлақ боғлиқлигини очиб берди. Бу билан 1600 йилда Гильберт томонидан таъкидланган электр ва магнит ҳодисаларининг ҳар бири мустақил ва ўзаро боғлиқ бўлмаган жараёнлар эканлиги ҳақидаги тушунча мутлақо ноўрин эканлиги исботланди. 1831 йилда Фарадей электромагнит индукцияси ҳодисасини очганлиги ҳақида хабар берди. У магнит майдони ёки токли контурга нисбатан ҳаракат қилаётган бошқа контурда ток ҳосил бўлишини аниқлади. Шундай қилиб, электр ҳодисалари ҳам магнит ҳодисалари жараёнининг натижасида ҳосил қилиниши мумкинлиги кўрсатиб берилди.

Бундан кейинги тадқиқотларда, жуда кичик узунликдаги электромагнит тўлқинлар ҳосил қилиниши ва тарқалиши, радио ихтиро қилиниши, радиоалоқанинг амалга оширилиши, амалий ва назарий радиотехниканинг шу каби кейинги ютуқлари Максвеллнинг электромагнит майдони назариясини экспериментал тасдиқлади .

Барча қилинган ихтиролар электр ва магнетизм ҳодисалари орасида чуқур боғлиқликлар мавжудлигини кўрсатади. Электромагнит ҳодисалар соҳасига тааллуқли бўлган назарий тушунчаларнинг умумий мажмуасида электр ва магнит занжирлари назарияси кўпроқ ривожланишга эришмоқда.

Электр занжирлар назариясининг пойдеворида Ом (1827 й.), Жоуль (1841 й.), Ленц (1842 й.) ва Кирхгоф (1847 й.) асос солган қонунлар ётади. Унинг кейинги ривожланишида кўпгина олимлар ўз ҳиссаларини қўшганлар.

Телекоммуникация ва электр ўлчаш техникаси, электроэнергетик тизимлари, тезкор электрон ҳисоблаш машиналари, ахборот технологиялари, автоматик бошқарув ва назорат тизимларининг мисилсиз мураккабланиши ва ривожланиши натижасида уларни таҳлил қилиш учун умумлаштирилган услубларни ишлаб чиқиш зарурати туғилмоқда. Улар воситасида шу мураккаб тизимларнинг алоҳида қисмлари бўлган ва маълум вазифани бажарувчи электр занжирларининг бир қанча элементлари ўзларининг умумлаштирилган параметрлари орқали қаралади. Занжирнинг бундай элементлари комплекси сифатида, масалан, симли алоқа тизимларидаги, радио-, телеузатишлардаги, электр ўлчашлар, автоматик бошқариш ва назоратидаги сигналлар генераторлари, кучайтиргичлари, энергия манбалари, электрон ҳисоблаш машиналаридаги мантиқий вазифаларни бажарувчи блоклар, дискрет рақамли ўзгарткичлари ва ҳ.к. бўлиши мумкин.

Бундай алоҳида комплекслар таркибига параметрлари токка боғлиқ бўлмаган занжирнинг чизиқли элементлари, масалан резисторлар, индуктивликлар, конденсаторлар ҳамда параметрлари ток ёки кучланишга боғлиқ бўлган занжирнинг ночизиқли элементлари, масалан электрон лампалар, транзисторлар, ферромагнит ўзакли индуктив ғалтаклар кириши мумкин. Занжирнинг бундай элементлари ўзаро турлича схемаларда уланган бўлади ва шу комплексларнинг таркибида етарли даражада мураккаб схемаларни ҳосил қилади. Комплекслар эса, ўз навбатида, у ёки бу усулда ўзаро уланиб, мураккаб тизимларни ҳосил қилади.

Мураккаб тизимларни таҳлил қилишнинг умумлаштирилган услублари, тизимнинг бир қисми бўлган ушбу алоҳида комплексларнинг ўзаро таъсирини тадқиқот қилиш имконини беради. Бундай умумлаштирилган услубларни қуришнинг бошланғич асослари сифатида, нисбатан мураккаб бўлмаган электр занжирларини ҳисоблашда қўлланилган, электр занжирларининг физик қонуниятлари ишлатилади.

Шунингдек, космик радиоалоқа ва радиоастрономия ҳамда янги электрофизик ва электротехнологик қурилмаларда электр, магнит майдонларини ва электромагнит нурланишларини янада тезкорлик ва кенг қўлланилиши натижасида электромагнит майдонлари ва электр занжирлар назарияларининг келгусидаги янада ривожланиши кутилмоқда.

Баён қилинган фикрлар ҳамма вақт, айниқса ҳозирги кунда, олий электротехник таълимнинг ниҳоятда юқори илмий даражада ташкил этилиши заруратини тақозо этади. Бу йўналишда ХХ асрда ЎФАнинг академиги Гофур Раҳимович Раҳимов асос солган ва ҳозирги кунда унинг шогирдлари ва давомчилари томонидан ривожлантирилаётган «Электротехника назарий асослари» ва «Электр занжирлар назарияси» фанларининг ўқитилиши катта аҳамиятлидир.

Электр занжирлари назарияси (ЭЗН) фани, бир томондан, физика (электр ва магнетизм) ва математика (тушунтириш усуллари) фанлари

асосида ташкил топган бўлса, иккинчи томондан, шу фанларнинг ривожини учун ҳам ўз ҳиссасини қўшди, яъни физиканинг электромагнит ҳодисаларини таҳлил қилиш қисмларига асос солди, ҳамда математика фанида тасвирлаш усулини ривожлантирди. Шу билан бирга, электр занжирлар назариясининг ривожланиши бир қатор янги физик тушунчалар, физик қонунларнинг янги талқини, махсус математик усулларнинг ривожланиши, айнан электр занжирларида ва ускуналарда содир бўладиган типик ҳодисаларни таҳлил қилиш ва таърифлашда янги физик-техник масалаларнинг қайта қўрилишига олиб келди.

Компьютергача бўлган даврда муҳандис минимал ҳисоблашлардан фойдаланиб, нисбатан содда бўлган занжирларни синтез қила олар эди. Бунда занжирнинг макети тузилиб, ўлчовлар бажарилиб, созлаш, синов ишлари ўтказилар ва натижавий вариант ҳосил қилинар эди. Интеграл микросхемалар ва нисбатан арзон ЭҲМнинг пайдо бўлиши электр занжирларини ЭҲМлар ёрдамида таҳлил қилиш имкониятини туғдирди. Электр занжирларини машинада моделлаштириш дастурлари тузилди.

Олий таълим жараёнларининг такомиллаштирилиши - талабалар томонидан билимни мустақил ўзлаштиришларига эътиборни кучайтирилиши, ахборот технологиялари тизимларининг муттасил ривожланиши натижасида ушбу фандаги маълумотларнинг кун сайин кескин ортиб бориши жараёнларини эътиборга олиб, дарсликнинг асос солувчи биринчи ва иккинчи қисмларини батафсил баён қилишга ҳаракат қилинди. Шунингдек, электр ва магнит майдонларининг узвий боғлиқлигини эътиборга олиб, келгусида магнит занжиридаги мураккаб физик жараёнларни электр занжирлар назариясида ўрганиладиган усуллар ёрдамида моделлаштириб, содда ҳолига келтириб таҳлил ва синтез қилишни ташкил этиш мақсадида, дарсликнинг биринчи қисмига электромагнит майдон тушунчаси ва қонунларининг умумийлигини ёритувчи боб киритилди. Унга асосланган ҳолда, кейинги бобларда ўзгармас ва гармоник токли занжирларнинг асосий қонунлари, резонанс ҳодисалари, уларни ҳисоблаш ва таҳлил қилиш усуллари тушуниш учун осон, батафсил ва мисоллар билан келтирилди; ўткинчи жараёнларни ҳисоблашнинг классик, оператор, вақт ва частотавий усуллари баён қилинди; тўртқутбликлар, тарқоқ параметрли ва ночизиқли занжирлар, оддий ва рақамли филтрларни таҳлил қилиш, ҳисоблаш масалалари тўлиқ келтирилди.

Дарслик радиотехника ва телекоммуникация технологиялари соҳалари бакалавриатура йўналишлари, магистратура талабалари ва аспирантлари учун мўлжалланган.

Асосий белгилашлар

- a* - кучсизланиш, ишчи кучсизланиш
- b* - фазавий тавсиф
- B* - ўтказувчанликнинг реактив ташкил этувчиси
- C* - сифим

E - электр юритувчи куч (эюк), таъсир этувчи қиймати
 \dot{E} - комплекс эюк
 E_m - гармоник эюк амплитудаси
 \dot{E}_m - гармоник эюкнинг комплекс амплитудаси
 f - тебраниш частотаси
 G - резистив ўтказувчанлик
 g - резистив ўтказувчанликнинг реактив ташкил этувчиси
 $g(t)$ - занжирнинг импульс тавсифи
 $H(j\omega)$ - комплекс узатиш функцияси
 $H(p)$ - оператор узатиш функцияси
 I - токнинг таъсир этувчи қиймати, ўзгармас ток қиймати
 \dot{I} - комплекс токи
 I_m - гармоник токнинг амплитудаси
 \dot{I}_m - токнинг комплекс амплитудаси
 $i, i(t)$ - токнинг оний қиймати $Im(a + jb) = c$
 j - мавҳум бирлик
 k - алоқа коэффиценти, кучайтириш коэффиценти
 $h(t)$ - занжирнинг ўткинчи тавсифи
 L - индуктивлик
 l - линия узунлиги
 M - ўзаро индуктивлик
 P - актив (ўртача) қувват
 p - комплекс ўзгарувчи, оний қувват, оператор белгиси
 Q - асиллик
 q - заряд
 R - резистив қаршилик
 r - актив қаршилик
 T - тебраниш даври
 t - вақтнинг оний қиймати
 U - кучланишнинг таъсир этувчи қиймати
 \dot{U} - комплекс кучланиш
 U_m - гармоник кучланиш амплитудаси

- $u, u(t)$ - кучланишнинг оний қийматлари
- X - қаршиликнинг реактив ташкил этувчиси
- $Y(p)$ - икки қутбликнинг оператор ўтказувчанлиги
- $Y(j\omega)$ - икки қутбликнинг комплекс ўтказувчанлиги
- $Z(p)$ - икки қутбликнинг оператор қаршилиги
- $Z(j\omega)$ - икки қутбликнинг комплекс қаршилиги
- Z_B - линиянинг тўлқин қршилиги
- α - линиянинг кучсизланиш коэффиценти
- β - линиянинг фаза коэффиценти
- γ - линиянинг тарқалиш коэффиценти
- $\Delta\alpha$ - фильтр ўтказиш оралиғи кучсизланиш тавсифининг коэффиценти
- $\delta(t)$ - бирлик импульс функцияси
- $\theta(t)$ - фаза-частотавий тавсиф
- ρ - линия (контур) тўлқин қаршилиги
- τ - ягона реактив элементли занжирнинг вақт доимийси
- Ψ - гармоник тебранишнинг бошланғич фазаси
- Φ - Магнит оқими
- φ - тебранишлар фазалари фарқи
- φ_B - линия тўлқин қаршилигининг аргументи
- φ_G - Гурвица комплекс полиномининг аргументи
- φ_p - қайтиш қуввати аргументи
- φ_Y - икки қутблик комплекс ўтказувчанлиги аргументи
- φ_Z - икки қутблик комплекс қаршилиги аргументи
- ω - тебранишлар (айланма) частотаси

Электромагнит майдони назарияси, электр ва магнит занжирлар масалаларининг умумий физик асослари

Электромагнит майдони сигналларни ва энергияни узатиш ва уларни қайта ўзгартириш учун техник ва физик қурилмаларда кенг қўлланиладиган асосий физик омил ҳисобланади. Электромагнит майдони билан боғлиқ бўлган жараёнлар шу билан характерланадики, улар електромагнит майдонини вақт ва фазо бўйича ифодалашни талаб этади. Бу эса електромагнит майдони назарияси услубларини ривожлантиришни тақозо этади. Муайян қурилмаларда електромагнит ҳодисаларини ифодалашнинг

мураккаблиги, бу жараёнларнинг вақтга боғлиқлигини ҳисоблашнинг услубларини излашга мажбур этади, бу эса электр занжирлари назариясини ривожлантириш билан боғлиқ.

Электромагнит майдонининг у ёки бу хусусиятларини электр занжирлари элементлари сифатида кўриш мумкин бўлган маълум курилмаларни аниқлаб, берилган функцияларни бажарувчи янги мураккаб асбоб ва курилмаларни ҳосил қилиш учун электр занжирлар назариясидан фойдаланиш имконига эга бўламиз.

Электромагнит жараёнларни содалаштириб ҳисоблаш имкониятини берганлиги учун ҳам, электр занжирлар назарияси фани мислсиз катта ривожланишларга эга бўлди. Бундай содалаштиришларнинг асосида бирнеча фаразлар ва таҳминлар мавжуд. Уларни англаш ва баҳолаш учун электромагнит жараёнларнинг асосий физик қонунларини аниқ ўрганиш ва уларни кенг миқёсда умумлаштира олишни билиш зарур.

Шу сабабли мазкур қисмнинг биринчи боби кейинги боблар учун физик пойдевор (асос) бўлишини таъминлашга қаратилган бўлиб, уларда электр, магнит занжирлари ва магнит майдонларини ҳисоблашнинг математик услублари кўрсатилади. Бундай пойдеворнинг мавжудлиги формал математик услубларнинг берилган ҳолатларига нисбатан танқидий муносабатда бўлишни таъминлайди ва уларни ташкил этишдаги хатоликларни бартараф этиш имкониятини беради.

Ўтказувчанлик, кўчириш ва силжиш тоқлари. Токнинг узлуксизлиги.

Эркин зарядларнинг йўналтирилган ҳаракат жараёни ва/ёки магнит майдони мавжудлигида электр силжиши векторининг вақт бўйича ўзгариши, *тўла электр тоқи* дейилади.

«Электр тоқи» атамаси на фақат ҳодисани тавсифлаш учун, балки шу ҳодисанинг жадаллигини аниқлаш учун ҳам «электр тоқи кучи» атамасининг синоними сифатида ишлатилади.

«Электр тоқи» атамасини икки хил таърифлашга барҳам бериш учун «Электр» атамасини фақат ҳодисани ифодалаш учун ишлатилади.

Тўла электр тоқини қуйидаги асосий турларга ажратиш қабул қилинган: ўтказувчанлик тоқи, кўчириш тоқи ва силжиш тоқи.

Ўтказувчанлик электр тоқи, бирор V ҳажмда ёки бўшлиқда $\sum q_i \cdot v_i \neq 0$ бўлгандаги электр зарядининг эркин ташувчиларининг йўналтирилган ҳаракати ҳодисасидир. Бунда q_i ва v_i – жисм V ҳажмининг N эркин зарядлар тўпламига кирувчи i -зарядининг қиймати ва ҳаракат тезлиги.

Баъзи моддалар электр ўтказувчанлик, деб номланган, вақт бўйича ўзгармайдиган электр майдон таъсирида вақт бўйича ўзгармайдиган ток ўтказиш хусусиятига эга бўладилар. Демак, бундай хусусиятга эга бўлган моддалар ўтказгичлар ёки ўтказгич моддалари, деб номланганлар. Улар учун асосий электрик хусусият - электр ўтказувчанликдир. Бир қатор моддалар мавжудки, улар учун электр ўтказувчанликнинг ташқи омилларга (масалан,

харорат, ёруғлик, электр ва магнит майдонлар ва ҳ.к.) боғлиқлиги характерлидир.

Ўтказувчанлик токи миқдори бирор юза s отқали вақт бирлигида ўтаётган заряд миқдори q билан ўлчанади. Вақтнинг ихтиёрий оннда ўтказувчанлик токи кўрилаётган s юзадан заряд ташувчилар билан кўчирилаётган электр зарядининг вақт бўйича ҳосиласига тенг, яъни

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

Электр токи скаляр қийматдир. Юза s нинг ҳар хил элементларида зарядланган заррачаларнинг ҳаракатланиш йўналишлари ҳар хил бўлиши мумкин. Бироқ, кўрилаётган юзанинг жуда кичик элементи Δs нинг барча нуқталарида зарядланган заррачалар йўналиши бир хил деб ҳисоблаш мумкин. Бу ҳолат Δs миқдорнинг камайиши билан, яъни $\Delta s \rightarrow 0$, янада қатъийлашади. Шу сабабли, текшириш жараёнига вектор қиймат киритилади – зарядланган заррачалар ҳаракати йўналишига нормал бўлган Δs юза элементи орқали оқаётган Δi токнинг шу элемент нолга интилаётгандаги нисбатининг лимитига, йўналиши заррачалар мусбат йўналиши билан мос келган ёки, мос равишда, манфий зарядланган заррачалар йўналиши билан мос келмаган

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

Агар J вектори (1.8,а-расм) юзага мусбат нормаль билан β бурчак ҳосил қилса, у ҳолда қуйидаги ифода мавжуд бўлади:

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

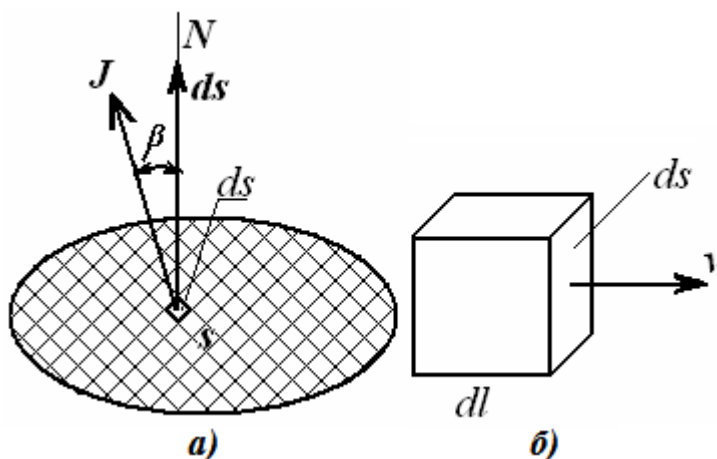
Ток чекли ўлчовлардаги s юзадан ўтганлиги учун

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

Фақат юзанинг барча нуқталарида ток зичлигининг қийматлари бир хил бўлиб, шу юзага нормаль билан бир хил бурчак ҳосил қилгандагина қуйидагини ёзиш мумкин

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

Бундан ташқари, агар токнинг йўналиши юзага нормаль бўлса, унда $i = Js$. Бундай шарт ток қиймати вақт бўйича ўзгармас ва ўтказгичнинг кесим юзаси ўлчовлари



унинг узунлигидан жуда кичик бўлгандагина бажарилади. Шунинг учун электр занжирларида чизикли ўтказгичлардаги жа-
раёнларни ўрганишда, аксарият занжирнинг у ёки бу қисмидаги барча токнинг йўналиши ҳақида гапирилади.

1.8-расм

Умумий ҳолда, ток линиялари деб, ток зичлиги векторлари шу линияга ҳамма ерда уринма бўлган ва ток трубкалари деб, ток линиялари ҳосил қилган трубкасимон юза билан чекланган соҳага айтилади.

Ток бирлиги сифатида *Ампер* (А) ва ток зичлиги бирлиги – *Ампер бўлинган квадрат метр* (A/m^2) ишлатилади.

Ўтказгичлардаги ўтказувчанлик токининг бошқа турдаги тоқлардан фарқи шундаки, ўтказгич ҳарорати ўзгармас бўлганда ўтказувчанлик токи зичлиги электр майдони кучланганлигига пропорционал бўлади. Бунда изотроп муҳитда ток зичлиги вектори \mathbf{J} йўналиши электр майдони кучланганлиги \mathbf{E} вектори билан мос бўлади ва ток чизиклари электр майдони кучланганлиги чизиклари билан мос бўлади. Шу сабабли ўтказувчанлик токи зичлиги учун ўтказгич муҳитида қуйидагини ёзиш мумкин

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}.$$

Бунда γ катталиқ *модданинг солиштирма ўтказувчанлиги* дейилади.

Унга тескари бўлган қиймат $\rho = 1/\gamma$ *модданинг солиштирма электр қаршилиги* дейилади.

Демак, электр майдон кучланганлиги ва ток зичлиги орасидаги боғланишни қуйидагича ёзиш мумкин

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J}.$$

Солиштирма қаршилиқнинг бирлиги *Ом·метр* ($Om \cdot m$). Дарҳақиқат,

$\rho = E/J$ боғланишдан, унинг бирлиги учун $1 \frac{V}{m} \cdot \frac{m^2}{A} = 1 \frac{V \cdot m}{A} = 1 Om \cdot m$,

чунки $1 V/A = 1 Om$ қаршилиқ бирлигидир. Шунингдек, солиштирма ўтказувчанликнинг бирлиги *Сименс метрга нисбати* (Cm/m) бўлади.

Ўтказувчи моддаларни бирор қиймат γ (ёки ρ) билан тавсифлаш имконияти шунинг натижасида пайдо бўлдики, ўтказувчи моддаларда берилган ҳароратда зарядланган заррачаларнинг ўртача тезлиги, демак ток зичлиги ўзгармас магнит майдонида ўзгармас бўлиб қолади, чунки бу заррачалар электр майдонида тезланишидан ҳосил бўлган кинетик энергия модда атомларига узатилади ва иссиқлик ҳаракатига айланади.

Металларда электр токи ўтказувчанлик электронларининг ҳаракатини тасвирлайди. Металлардан ташқари, ўтказувчи моддаларга кўмир ва электролитлар ҳам киради. Электролитларда ўтказувчанлик мусбат ва манфий ионлар билан амалга оширилади.

Ўтказувчи моддаларда солиштирма ўтказувчанлик γ ва, демак, солиштирма қаршилиқ ρ модда ҳароратига боғлиқ.

Кўчириш электр токи деганда электр зарядларини эркин фазода ҳаракатланаётган зарядланган заррачалар ёки жисмлар билан кўчириш ҳодисаси тушунилади. Кўчириш токи ўтказгичлардаги ўтказувчанлик токидан шу билан фарқланадики, унинг зичлигини $J = \gamma E$ боғланиш билан ифодалаб бўлмайди, ундаги солиштирма ўтказувчанлик γ ток ўтказувчи муҳитни характерловчи катталик. Электр зарядли заррачалар ёки жисмларнинг электр майдонида эркин ҳаракатида уларнинг тезликлари E майдон кучланганлигига пропорционал эмас. Дарҳақиқат, электр майдонида q зарядли заррачага таъсир этаётган куч qE га тенг. Бундай заррачанинг тезланиши майдон кучланганлигига пропорционал. Демак, унинг эркин фазодаги ҳаракати текис тезланувчан бўлади, чунки муҳитнинг қаршилиги бўлмайди.

Кўчириш электр токининг муҳим турларидан бири – зарядга эга бўлган элементар заррачанинг бўшлиқдаги ҳаракатидир. Кўчириш электр токининг яна бир тури – газдаги электр токидир. Кўчириш токи зичлигини v тезликда ҳаракатланаётган зарра-чалар ўртача ҳажм заряди ρ билан ифодалаймиз. Шу мақсадда фазода ҳажми $dl \cdot ds$ (1.8,б-расм) бўлган тўғри бурчакли параллелепипед ажратамиз. Унинг dl қирраси тезлик векторига параллель бўлсин. Параллелепипед ичидаги заряд $dq = \rho \cdot dl \cdot ds$. Шу заряднинг барчаси ds юзадан шундай dt вақт оралиғида ўтадики, бу вақт оралиғида зарядланган элементар заррачалар dl масофани ўтсин. Бу вақт оралиғи $dl = v dt$ шартли орқали аниқланади. Демак, ds юза орқали оқаяётган ток $di = dq/dt = \rho v ds$, ва ток зичлиги қуйидагича бўлади $J = di/ds = \rho v$. Манфий зарядли заррачалар ҳаракатида ($q < 0$), токнинг шартли мусбат йўналиши ҳаракат йўналишига қарама-қарши бўлади, ва J билан v орасида $J = -\rho v$ боғланиш мавжуд бўлади. Иккала ифода ρ нинг ихтиёрий ишорасида қуйидаги вектор шаклда бирлаштирилади:

$$J = \rho v.$$

Агар $\rho > 0$ бўлса J ва v векторлар йўналишлари мос бўлади. Агар $\rho < 0$ бўлса, улар қарама-қарши.

Агар бир вақтнинг ўзида зарядларнинг ρ_+ ҳажм зичлиги, v_+ тезликда мусбат зарядланган заррачалар ҳаракати ва зарядларнинг ρ_- ҳажм зичлиги, v_- тезликда манфий зарядланган заррачалар ҳаракати мавжуд бўлса, у ҳолда кўчириш токи зичлиги

$$J_{\text{кўч}} = \rho_+ v_+ + \rho_- v_- .$$

Силжиш электр токини диэлектрикларда ўзгарувчан электр майдони мавжуд бўлганда эътиборга олиш зарур бўлади.

Электр майдонининг вақт бўйича ҳар қандай ўзгаришида диэлектрикнинг қутбланганлиги P ўзгаради. Бунда диэлектрик моддасида модда атомлари ва молекулалари таркибига кирувчи электр зарядли элементар заррачалар ҳаракатланадилар. Диэлектрикдаги электр токининг бу тури *қутбланганлик (поляризация) электр токи* дейилади. Диэлектрикда зарядланган заррачалар эркин бўлмаганлиги ва электр майдони таъсирида

силжиши мумкинлиги учун, кутбланганлик токини силжиш электр токи ҳам деб аталади, аниқроғи, у силжиш токининг бир ташкил этувчисидир. Бу токнинг силжишини J' модда кутбланишининг ўзгариши P билан боғлаш қийин эмас.

Агар (1.1) да юза элементи ds зарядланган заррачалар силжиш йўналишида ихтиёрий ўрнатилган бўлса, у ҳолда $P_n = dQ'/ds$, бунда P_n – юқоридаги P векторининг ds юза элементиға нормаль ўтказилган ташкил этувчиси.

P вектори вақт бўйича ўзгаришида ds юза элементидан қуйидаги ток ўтади

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

Иккинчи томондан, $di = J'_n ds$, бунда J'_n - ток зичлиги J' векторининг ds элементиға нормаль ташкил этувчиси. Шундай қилиб,

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

Юза элементи ds нинг вазиятини ихтиёрий олиш мумкин бўлганлиги учун, ток зичлиги вектори J' нинг ташкил этувчиси бирор йўналишда модда кутбланганлиги P векторининг вақт бўйича ҳосиласига тенг бўлади, деган ҳулосаға келамиз. Хусусан, J' нинг Ox , Oy , Oz ўқларига проекциялари қуйидагича:

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

Ток зичлиги вектори

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

бунда i, j, k – координата Ox, Oy, Oz ўқлари бўйлаб йўналган векторлар.

$iP_x + jP_y + kP_z = P$, бўлганлиги учун

$$J' = dP/dt.$$

Демак, силжиш электр токи векторининг кўрилаётган қисми модда кутбланганлиги векторининг вақт бўйича ҳосиласига тенг экан.

Юқорида таъкидланганидек, модда кутбланганлигининг ўзгариши сабабли ҳосил бўлган силжиш токи ва, демак, силжиш токи зичлиги J' , диэлектрикдаги тўла силжиш токи ва, демак, тўла силжиш токи зичлигининг бир қисмини ташкил этади. Дарҳақиқат, диэлектриклардаги электр силжиш вектори D икки D_0 ва P ташкил этувчилардан иборат:

$$D = D_0 + P,$$

бунда $D_0 = \epsilon_0 E$. Электр майдони ўзгарганда иккала ташкил этувчилар ҳам ўзгаради. Шундай қилиб,
 $dD/dt = dD_0/dt + dP/dt$.

Кейинги ифоданинг иккинчи ташкил этувчиси, юқорида ҳозиргина аниқланганидек, диэлектрик моддасида зарядланган элементар заррачалар ҳаракати натижасида ҳосил бўлган силжиш электр токи зичлиги векторидир. Ифоданинг биринчи ташкил этувчиси ҳам ток зичлиги бирлигига эга. У электр майдони вақт бўйича ўзгаргандаги физик жараёни характерлайди. Юқорида, материянинг майдон сифатида мавжудлик шаклини ифодалайдиган фазони, яъни бизга маълум бўлган материя зарралари бўлмаган соҳани бўшлиқ, деб атаган эдик. Шу сабабли, биринчи ташкил этувчини *бўшлиқдаги силжиш токининг зичлиги*, деб номлаш мумкин. Унинг белгиланиши

$$dD_0/dt.$$

Шундай қилиб, диэлектрикдаги *тўла силжиш токи* зичлигининг $J_{сж}$ вектори:

$$J_{сж} = dD/dt = J_0 + J' = dD_0/dt + dP/dt.$$

Электр силжиши D векторининг вақт бўйича ҳосиласини вектор тушунча сифатида кўриш шарт.

Силжиш токи зичлиги векторининг ташкил этувчилари учун барча ҳолатларда

$$J_{сж,x} = \frac{dD_x}{dt}; J_{сж,y} = \frac{dD_y}{dt}; J_{сж,z} = \frac{dD_z}{dt}.$$

Ўзгарувчан ток бўлганда силжиш токи, на фақат диэлектрикларда мавжуд бўлади, балки ярим ўтказгич ва ўтказгич моддаларда ҳам пайдо бўлади. Дарҳақиқат, ташқи майдон таъсирида ушбу моддалар молекулалари, диэлектриклардагидек қутбланиши зарур. Бундан ташқари, бўшлиқдаги силжиш ҳам пайдо бўлиши шарт. Ярим ўтказгич моддаларда силжиш тоқларини юқори частота билан ўзгарадиган майдонларда эътиборга олиш зарур. Ўтказгич моддаларда эса, жуда катта частоталарда ҳам, силжиш тоқлари ўтказувчанлик тоқларига нисбатан шунчалар кичик бўладики, силжиш тоқларини эътиборга олмаса ҳам бўлади.

Юқоридаги фикрлар асосида қуйидагини таъкидлаш мумкин: электр токининг энг муҳим хусусияти – у билан боғлиқ бўлган магнит майдонининг ҳосил бўлишини – токнинг иккала ташкил этувчилари учун ҳам бир хил таътиқ этиш мумкин. Бу фикрлар тажрибада тўлалигича тасдиқланди.

Ушбу фикрлар биринчи бўлиб Максвелл томонидан баён қилинган ва унинг электромагнит майдони назариясини яратишига олиб келган. Дарҳақиқат, бу фикрларга кўра, электр майдонининг ҳар қандай ўзгаришида, унда модда заррачалари йўқ ($P = 0$), деб фараз қилинганда ҳам, шу муҳитда электр майдони билан боғлиқ бўлган магнит майдони пайдо бўлади, яъни

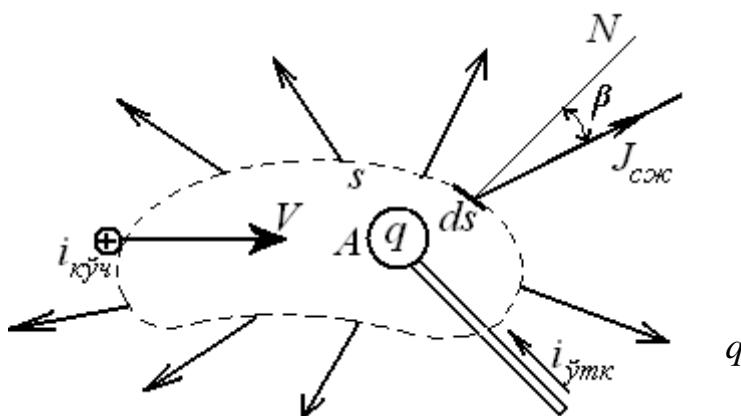
ягона электромагнит майдони пайдо бўлади. Ушбу муҳим маълумотлар кейинги бобларда батафсилроқ келтирилади.

Юқорида келтирилган мулоҳазалар асосида тўла электр токи, ёки тўла ток скаляр қиймат бўлиб, кўрилатган юза орқали ўтаётган ўтказувчанлик токи ва силжиш токи йиғиндиларига тенг, яъни

$$i = \frac{dq}{dt} + \frac{d}{dt} \int_S D_0 ds.$$

Ушбу ифодада q нинг таркибига эркин ташувчиларнинг зарядлари ҳам, модда кутбланганидаги юзадан ўтаётган йиғинди боғланган зарядлар ҳам киради.

Диэлектрикда бирор s берк юзани тасаввур қилайлик (1.9-расм) ва шу юза ичида жойлашган A жисм зарядланаяпти, деб фараз қилайлик. Жисмнинг заряди q ортганда уни ўраб турган электр майдони кучаяди ва диэлектрикда электр силжиши ортади. Шунинг учун s юза орқали ичкаридан таш-қарига томон силжиш токи оқади. Юза s орқали сил-жиш векторининг оқими юза ичида жойлашган эркин зарядга тенг



$$\int_S (dD/ds) dt = q.$$

1.9-расм

Шу тенгликдан вақт бўйича ҳосила оламиз

$$\int_S (dD/ds) dt = \frac{dq}{dt}.$$

Қиймат $\int_S (dD/ds) dt = \int_S J_{сжж} ds = i_{сжж}$ юза s ичкарисидан ташқарига

томон оқаётган силжиш токидир.

Қиймат dq/dt юза s ичида жойлашган эркин заряднинг тезлиги. Юза s билан чекланган фазо ҳажмидаги мусбат эркин заряднинг ортиши фақат ташқи фазодан ҳажм ичига мусбат зарядларнинг киритилиши ёки манфий зарядларнинг тескари йўналишда узатилиши билан бажарилиши мумкин. Бу узатиш ёки s юзани кесиб ўтувчи ўтказгичлардаги ўтказувчанлик токи $i_{ўтк}$ ёрдамида, ёки юза орқали зарядланган жисмларда ёки фазода ҳаракатланаётган зарядланган заррачалар ёрдамида кўчириш токлари $i_{кўч}$ билан амалга ошириш мумкин. Агар $dq/dt > 0$ бўлса, мусбат зарядлар ташқи фазодан s юза билан чегараланган ҳажм ичига олиб кирилади, демак, ($i_{ўтк} +$

$i_{кўч}$) тоқлар йиғиндиси манфий ишорали бўлади, чунки мусбат ишорали деб ташқи нормаль қабул қилинган эди. Шундай қилиб,

$$dq/dt = - (i_{ўтк} + i_{кўч}).$$

Тенглик $\oint_S (d\mathbf{D}/ds)dt = \frac{dq}{dt}$ қуйидагича қайта ёзилиши мумкин

$$i = - (i_{ўтк} + i_{кўч}) \text{ ёки } i + i_{ўтк} + i_{кўч} = 0.$$

Демак, *ихтиёрий берк юза орқали барча турдаги тоқлар йиғиндиси (ўтказувчанлик, кўчириш ва силжиш тоқлари) нолга тенг экан.*

Агар δ орқали тўла ток зичлигини ($\delta = \mathbf{J} + \mathbf{J}_{см}$) ҳамда i билан юзадан ўтаётган барча токни белгиласак, у ҳолда ихтиёрий берк юза учун қуйидаги қиймат

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

электр тоқи узлуксизлик принципнинг умумий ифодаси дейилади. Ушбу муҳим принцип қуйидагича таърифланади: *ихтиёрий муҳитда олинган берк юза орқали ўтган тўла электр тоқи нолга тенг.* Бунда юзадан чиқаётган ток мусбат, қираётган – манфий ҳисобланади.

Шундай қилиб, ток чизикларининг ҳақ қаерида на бошланиши ва на охири бўлмайдиган, принципиал равишда берк чизиклардир. Электр тоқи ҳар доим берк йўлдан оқади.

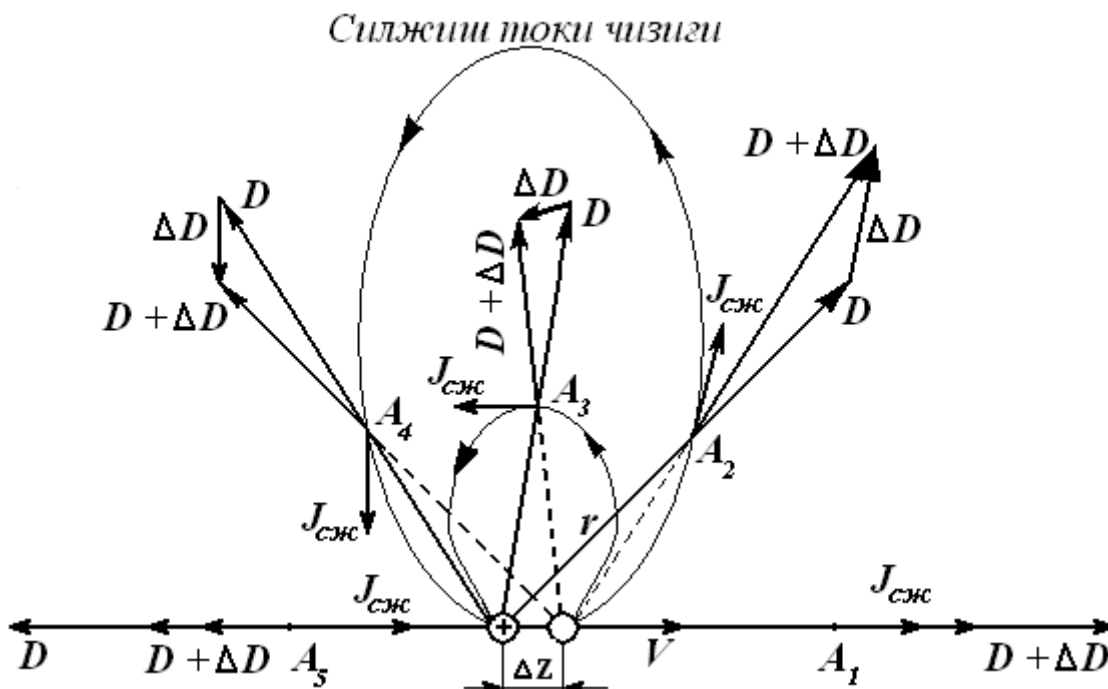
Барча келтирилган фикрлардан шу аён бўладики, токнинг узлуксизлик принципи, ёки берклик принципи фақатгина диэлектриклардаги силжиш тоқи ва айнан бўшлиқдаги силжиш тоқи тушунчасини киритиш билан умумтатбиқ аҳамиятини эгаллайди.

Мисол сифатида, кўчиш тоқи чизикларининг, яъни ҳаракатланаётган зарядланган жисм ёки заррачанинг берклиги қандай амалга оширилишини кўрайлик. Бу ҳодиса чуқур принципиал аҳамиятга эга, чунки бўшлиқдаги силжиш тоқидан ташқари, ҳар қандай электр тоқи, катта миқдордаги зарядланган элементар заррачалар ҳаракатини акс этади.

Бўшлиқда v тезлик билан ҳаракатланаётган яқка нуқтавий заряд q ни кўрайлик (1.10-расм). Вақтнинг ҳар онда фазонинг ихтиёрий нуқтасида вектор \mathbf{D} заряднинг марказидан чиқаётган радиал чизик бўйлаб йўналган ва унинг қиймати $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} = q/(4\pi r^2)$ (v нинг қиймати ёруғлик тезлигига нисбатан анчагина кичик ва, шу сабабли, майдон кўзғолмас заряддагидек шаклда бўлади, деб фараз қиламиз).

Вақтнинг Δt оралиғида заряд $\Delta z = v\Delta t$ масофага ўзгаради. Заряднинг янги ҳолати учун вектор фазонинг ҳар бир нуқтасида силжийди ва янги қийматлар $\mathbf{D} + \Delta\mathbf{D}$ қабул қилади. Силжиш тоқи зичлиги вектори $\mathbf{J}_{см} = d\mathbf{D}/dt$ йўналиши ҳамма вақт $\Delta t \rightarrow 0$ бўлгандаги $\Delta\mathbf{D}$ вектори йўналиши билан мос келади. 1.10-расмда силжиш тоқи зичлигининг векторлари фазонинг бирор $A_1 - A_5$ нуқталарида қуриб кўрсатилган. Агар биз шу векторларни фазонинг

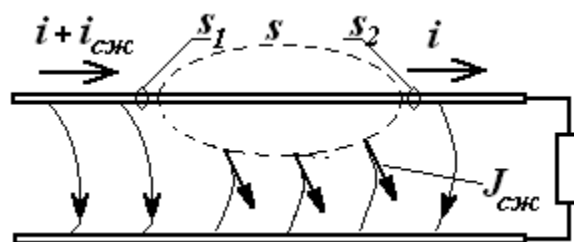
жуда кўп нуқталари учун курганимизда эди, силжиш токи чизикларини чизиш имкониятига эга бўлар эдик. Уларнинг шакли расмда келтирилгани каби бўлар эди. Бундан кўрамизки, силжиш токи кўчириш токининг давоми экан ва ток чизиклари берк экан.



1.10-расм

Зарядланган элементар заррачаларнинг сони катта бўлганда силжиш токи чизикларининг шакли мураккаблашади, аммо, илгаригидек ток чизиклари берк бўлиб қолаверади, чунки бу мураккаб шакл 1.10-расмда тасвирланган содда қурилмаларнинг устланишидан ҳосил бўлади.

Бошқа мисол сифатида сигналларни узатиш линиясини кўрайлик (1.11-расм). Ўзгарувчан кучланиш бўлганда ўтказгичлар орасидаги диэлектрикда силжиш токлари бўлади. Берк юза s ни шундай ўтказамизки, у линиянинг битта ўтказгичини қамраб олсин.



1.11-расм

Ўтказгичдаги тоқлар $-s$ юзага кирувчи $(i + i_{сж})$ ва ундан чиқувчи $(i) - s$ юза орқали диэлектрикдаги силжиш токи миқдори билан ўзаро фарқланадилар. Шу сабабли ўтказгичдаги ўзгарувчан ток ўтказгичнинг ҳар хил кесим юзаларларида [масалан, s_1 юзадаги ток $(i + i_{сж})$, s_2 юзадаги ток (i)] вақтнинг бир онида ҳар хил бўлади. Ушбу физик жараённи ўтказгичлар орасидаги кучланиш тез ўзгарадиган (катта частотали) занжирларда ва узун линияларда эътиборга олинади.

Электр кучланиш, потенциаллар фарқи, сиғим. Электр юритувчи куч

Электр занжирлари ва электр майдони билан боғлиқ бўлган энг муҳим кийматлардан бўлган электр кучланиши, электр потенциаллари фарқи ва электр юритувчи кучларни ўрганишга ўтамиз.

Агар q зарядли заррача электр майдонида бирор масофа бўйлаб кўчирилса, у ҳолда унга таъсир этувчи кучлар иш бажаради. Бу ишнинг кўчирилатган зарядга нисбати *электр кучланиши* деб аталмиш, физик кийматга тенг бўлади. Заррача q нинг dl масофага (1.12-расм) кўчирилишини кўрайлик, бунда майдон кучлари қуйидаги ишни бажаради:

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

Йўналиши T уринмага мос, узунлиги dl йўл элементи га тенг бўлган миқдор dl вектори билан белгиланган. Бунда α векторлар E ва dl орасидаги бурчакдир.

А нуктадан (1.12-расм) В нуктагача масофа бўйлаб заррачани кўчиришда майдон кучлари бажараётган иш қуйидагига тенг:

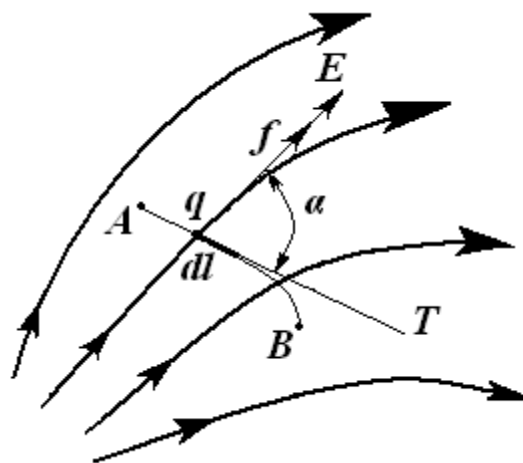
Электр занжири элементлари.

Электр занжирларининг асосий элементларига электромагнит энергияси манбалари, электромагнит энергияни узатиш, қайта ишлаш ва қабул қилувчи қурилмалар киради.

Электромагнит энергиясининг манбаларига энергиянинг у ёки бу туридан – иссиқлик, кимъёвий, ядро, қуёш, шамол, механик ҳаракат энергияси ва ҳ.к. – электромагнит энергиясига айлантирувчи генератор қурилмалари киради. Буларга, масалан, айланувчи электр генераторлари, гальваник элементлар, аккумуляторлар, термоэлементлар ва ҳ.к. киради. Ҳозирги кунда иссиқлик, ядро, кимъёвий энергияларни электромагнит энергиясига айлантирувчи янги ускуналар яратилмоқда, масалан, магнитогидродинамик генераторлар, иссиқлик элементлари, қуёш батареялар ва ҳ.к.

Электромагнит энергияни узатиш элементларига алоқа линиялари, электр узатиш линиялари, электр тармоқлари киради.

Электромагнит энергияни қайта ишлашга ток ва кучланишни ўзгартирувчи трансформаторлар, частота ўзгарткичлари, кучайтиргичлар, шунингдек, ўзгармас токни ўзгарувчан токка айлантирувчи ионли ва ярим



1.12-расм

ўтказгичли инверторлар, ўзгарувчан токни ўзгармас токка айлантирувчи тўғрилагичлар ва ҳ.к.лар киради.

Электр занжирларидаги *истеъмолчилар* ёки *юкламалар* қаторига электр энергиясини бошқа турдаги энергияга айлантирувчи қурилмалар киради, масалан, радио ва телевизион жиҳозлар, электр моторлар, электролиз ускуналари, аккумуляторлар, иситкич жиҳозлари ва ҳ.к.

Доимо, у ёки бу қурилма – электр занжири элементининг – асосий вазифаси электромагнит энергиянинг генерацияси, уни узатиш, қайта ишлаш ёки истеъмол қилиш сифатида тайинланган бўлса, биринчи ўринга унинг фойдали иш коэффиценти юқори бўлиши талаби қўйилади.

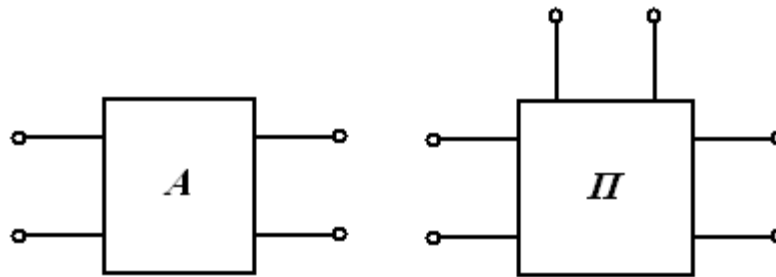
Кўпгина ҳолларда электр занжиридаги у ёки бу элементнинг асосий вазифаси қилиб - электр сигналларини узатиш ёки қайта ишлаш, шунингдек у ёки бу катталикларни ўлчаш операциясини бажариш, у ёки бу жараёнларнинг сифатини бошқариш белгиланади. Бу элементлар қаторига телекоммуникация тизимлари, телефон ва телеграф алоқа линиялари ва уларнинг учларидаги қурилмалар, автоматика қурилмаларининг ҳар турдаги элементлари, электр ўлчаш қурилмалари, электрон ҳисоблаш машиналарининг ҳисоблаш ва бошқариш қурилмалари, ҳар турдаги радиотехник қурилмалар ва ҳ.к.лар киради. Уларнинг барчаси учун энг муҳим талаб – узатилаётган ва қайта ишланаётган сигналларнинг маълум сифатда бўлишидир. Табиийки, бу ҳолатлар учун ҳам электромагнит энергиясининг узатилиши ва қайта ишланиши амалга оширилади ва асосий бўлмаса ҳам, имкон қадар юқори фойдали иш коэффицентиغا эришиш мақсади қўйилади.

Келтирилган талаблар билан биргаликда, электр занжири элементлари бир қатор талабларни қониқтириши зарур – ишлашининг ишончилиги, кўпга чидамлилиги, зарур бўлса – тез ишловчанлиги, ишдаги барқарорлиги, амалдаги аниқлиги ва ҳ.к.

Шунга мувофиқ, ҳозирги замон электротехник қурилмаларининг электр занжирлари жуда мураккабдир. Шу сабабли ҳам электр занжирлар назарияси доимий ривожланишда ва унга янада умумлаштирилган усуллар хос бўлмоқда. Ушбу дарсликда энг содда электр занжирларининг тадқиқотидан бошлаб, аста - секин мураккаб занжирларни ҳисоблашнинг умумий усулларига ўтамыз.

Актив ва пасив қисмлар.

Электр занжирининг электромагнит энергияси манбалари таъсир этаётган қисмини *занжирнинг актив қисми*, қисқача – актив занжир деб номлаймиз. Аксарият, уни ўртасида *A* ҳарфи бўлган тўғри тўртбурчак шаклида ва занжирнинг қолган қисмига улаш учун зарур бўлган сондаги клеммалар (ўтказгичлар) билан чизилади (2.1-расм).



2.1-расм

2.2-расм

Электр занжирининг электромагнит энергияси манбалари бўлмаган қисмини *занжирнинг пассив қисми*, ёки қисқача – *пассив* занжир деб атаймиз. Уни эса ўртасида **II** ҳарфи бўлган тўғри тўртбурчак шаклида ва занжирнинг қолган қисмига улаш учун зарур бўлган сондаги клеммалар билан белгилаймиз (2.2-расм). Бу тўғри тўртбурчаклар ичида занжирдаги кўрилаётган қисмининг барча элементлари, ўзаро барча уланишлари билан жойлаштирилади.

Электр занжирларининг реал ва идеаллаштирилган элементлари. Улардаги физик жараёнлар.

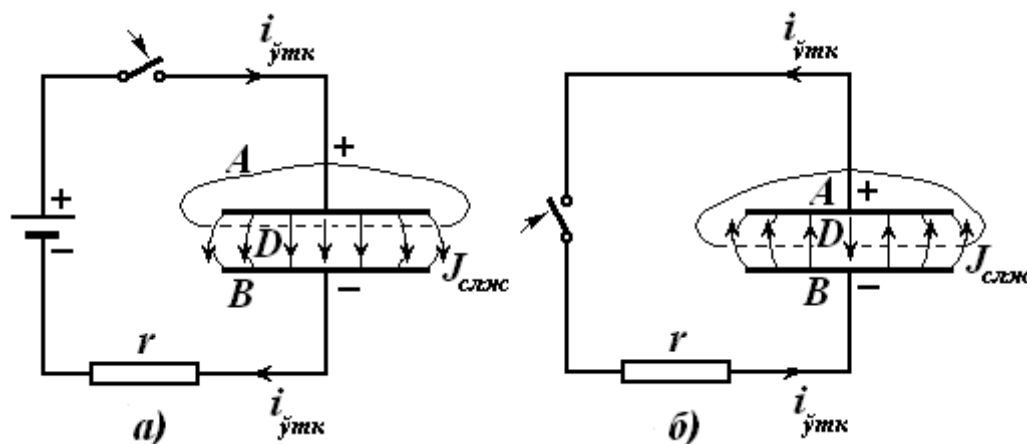
Нисбатан соддароқ физик жараёнлар ўзгармас ток занжирларида содир бўлади. Ўзгармас ток электр занжиридаги узоқ вақт давом этадиган ток, ёки ўтказувчанлик токи, ёки кўчириш токи бўлиши мумкин. Диэлектрикдаги силжиш токи ўзгармас ва узоқ вақт давомли бўла олмайди, чунки диэлектрикнинг электр чидамлилиги бузилмаган ҳолда, электр силжиш ва диэлектрикнинг поляризацияси чексиз ортиши мумкин эмас. Шу сабабли, ўзгармас ток занжири таркибига тоқлари фақат ўтказувчанлик токи шаклида мавжуд бўлган, масалан, узатиш линиялари ўтказгичлари, индуктивликларнинг чулғамлари, электролитик ванналар, гальваник элементлар, аккумуляторлар ва ҳ.к., ёки тоқлари фақат кўчириш токи шаклида бўлган, масалан, электрон лампалар ва ҳ.к. қурилмалар кириши мумкин. Солиштирма ўтказувчанлиги нолга тенг деб эҳтимол қилинган идеал диэлектрикли конденсатордан ўзгармас ток оқиб ўтмайди.

Ўзгармас ток занжири атрофида магнит майдони мавжуд бўлса ҳам, у вақт бўйича ўзгармайди, демак, ўзгармас ток занжирида *ЭЮК* индуктивланмайди.

Агар ўтказгичлар орасидаги изоляцияловчи муҳит кичик бўлса ҳам, чекли солиштирма ўтказувчанликка эга бўлса, у ҳолда ўтказгичлар орасидаги ўзгармас кучланиш таъсирида диэлектрик орқали силжиш токи оқиб ўтади. Силжиш токи изоляцияловчи муҳитга унга туташган барча ўтказгич элементларидан ўтади, натижада ўтказгич бўйлаб ток ҳар хил қийматларга эга бўлади. Бунда биз шундай содда занжирга эга бўламизки, унда параметрлари тарқоқ, яъни занжир бўйлаб силжиш ўтказувчанлиги тарқоқ бўлади.

Ўзгарувчан тоқлар ва кучланишларда электр занжиридаги ҳодисалар жуда мураккаблашган бўлади. Ўзгарувчан ток, яъни вақт бўйича ўзгарадиган

ток диэлектрикда ҳам силжиш токи сиқатида мавжуд бўлади. Шунинг учун ўзгарувчан токли электр заржири таркибига қопламалари диэлектрик билан ажратилган конденсатор ҳам кириши мумкин. Ўзгарувчан кучланиш бўлганда конденсаторнинг металл қопламалари орасида ўзгарувчан электр майдони пайдо бўлади, демак, қопламаларни ажратиб турувчи диэлектрикда силжиш токи содир бўлади. Электр силжиш токини эътиборга олиб, §1.7да таъкидланганидек, ток чизиқлари доимо берк бўлади.



2.3-расм

Кетма-кет уланган конденсаторли электр занжиридаги конденсаторнинг зарядланиши ва разрядланишидаги жараённи кўрайлик. Агар силжиш тоklarини эътиборга олмасак, бу занжир узилгандек кўринади. K калит ёрдамида вақтнинг бирор онда зарядланмаган конденсатор ўзгармас ЭЮК занжирига уланаяпти, деб фараз қилайлик (2.3,а-расм). Конденсатор зарядланади; ЭЮК манбасидан ўтказгич симлари орқали конденсатор қопламаларига ўтказилаётган электр зарядлари шу қопламаларда йиғила бошлайди. Қопламалардаги зарядларнинг ортиши натижасида қопламалар орасидаги электр майдони ортиб боради ва диэлектрикда силжиш токлари содир бўлади. Агар қопламалардан бирини, масалан A қопламани, s юза билан қамраб олсак, бу юзани кесиб ўтган ўтказгичдан A қопламага ўтказувчанлик i_{utm} токи оқиб ўтиши содир бўлади, диэлектрикда s юза орқали ичкаридан ташқарига йўналган ва айнан ўтказувчанлик i_{utm} токига тенг бўлган силжиш токи пайдо бўлади. Диэлектрикдаги силжиш токи чизиқлари ўтказгичдаги ўтказувчанлик токининг давоми бўлади. Дарҳақиқат, электр майдон мусбат A қопламадан манфий B қопламага йўналган ва ортувчи бўлади. Демак, силжиш токи чизиқлари ҳам мусбат қопламадан манфий қопламага йўналган бўлади. Ўтказгичдан мусбат қоплама томон оқаётган ўтказувчанлик токи, диэлектрикда силжиш токи сифатида оқишда давом этади ва манфий қопламага етганда яна ундан ўтказгич орқали ўтказувчанлик токи сифатида оқишда давом этади. Шундай қилиб, электр токи занжири берк контур ҳосил қилади.

Агар зарядланган конденсаторни ЭЮК манбасидан узиб, қаршилиги r бўлган резисторга K калит ёрдамида берк уланса (2.3,б-расм), у ҳолда конденсатор разрядлана бошлайди; бунда ўтказгичдаги i_{utm} ток A мусбат қопламадан B манфий қопламага томон оқа бошлайди. Диэлектрикдаги

электр майдони аввалгидек A мусбат қопламадан B манфий қопламага томон йўналган бўлади. Бироқ, энди майдон сусая бошлайди, демак ток зичлиги вектори силжиш вектори D йўналишига тескари бўлади. Силжиш токи чизиклари манфий қопламадан мусбат қоплама томон йўналади ва ўтказгичдаги ток чизикларининг давоми бўлади.

Электр токининг узлуксизлиги принципига мувофиқ (§1.7), вақтнинг ихтиёрий онда, конденсаторнинг зарядланаётганида ҳам, ёки унинг разрядланаётганида ҳам, конденсатор қопламаларининг орасида жойлашган диэлектрикдаги силжиш токи ўтказгичлардаги $i_{\text{тк}}$ ўтказиш токига айнан тенг бўлади.

Ўзгарувчан кучланиш бўлганда силжиш токи, на фақат конденсаторларда, яъни сиғимларини ишлатиш учун махсус тайёрланган қурилмаларда содир бўлади, балки ўзгарувчан ток занжирининг ихтиёрий элементининг атофидаги диэлектрикда ҳам вужудга келади, чунки шу элементлар орасида ўзгарувчан кучланиш мавжуд, яъни ўзгарувчан электр майдони мавжуд. Масалан, агар электр узатиш линиясида ўтказгичлари орасидаги кучланиш вақт бўйича ўзгарса, ўтказгичлар орасидаги диэлектрикда силжиш токи (1.16-расм) вужудга келади. Шу сабабли, диэлектрикнинг солиштирма ўқазувчанлиги нолга тенг бўлганда ҳам, линия узунлиги бўйлаб ўтказгичлардан ток диэлектрик орқали силжиш токи сифатида тармоқланади (1.16-расм) ва линиянинг ҳар хил нуқталарида ўтказгичлардаги ток қиймати бир хил бўлмайди. Шу сабабли, линиянинг ўтказгичлари бир-бирига нисбатан, конденсаторга ўхшаб, сиғимга эга бўлади. Бу таъкидлашлар ўзгарувчан токдаги ихтиёрий қурилма учун тааллуқлидир. Масалан, ўзгарувчан токдаги реостатда ўзгарувчан кучланишлар пасаюви вужудга келади, яъни реостат ўтказгичи (сими)да ва уни ўраб турган диэлектрикда ўзгарувчан электр майдони ҳосил бўлади. Шунинг учун, реостатнинг алоҳида қисмлари орасида диэлектрик орқали силжиш токи оқиб ўтади, натижада реостатнинг ҳар хил жойларидаги ток миқдори ҳар хил бўлади. Шу сабабли, реостатнинг алоҳида қисмларида бир-бирларига нисбатан электр сиғими мавжуд.

Агар энди индуктивлик ғалтагидан ўзгарувчан ток оқиб ўтса, у ҳолда ғалтакнинг алоҳида ўрамларида $ЭЮК$ индуктивланади. Ғалтакнинг клеммаларида ва унинг ўрамлари орасида ўзгарувчан кучланиш, яъни ўзгарувчан электр майдони ҳосил бўлади у, ўз навбатида, ғалтак ўрамлари орасидаги диэлектрикда силжиш токининг пайдо бўлишига сабаб бўлади. Бу ҳолатда ҳам, ғалтак ўтказгичининг ҳар хил жойларида ток ҳар хил қийматга эга бўлади. Шу сабабли, ғалтак ўрамлари орасида электр сиғими мавжуд бўлади.

Демак, *электр сиғими занжирнинг узунлиги бўйлаб доимо тақсимланган бўлади.*

Занжирнинг индуктивлиги ҳақида ҳам шу фикрларни келтириш мумкин. Занжирдан ток оқиб ўтганда магнит майдони ҳосил бўлмайдиган унинг бирорта қисмида йўқдир. Шунинг учун ўзгарувчан токда занжирнинг ҳар бир қисмида ўзиндукция ва ўзаро индукция $ЭЮК$ лари индуктивланади. Шу

сабабли занжирнинг ҳар бир қисми, ҳар бир элементи индуктивликка эга. Индуктивликка на фақат ғалтаклар эга бўлади, балки линиянинг ўтказгичлари, реостатлар ва ўзгарувчан ток занжирининг ихтиёрий бошқа элементлари ҳам эга. Ҳатто конденсатор ҳам, жуда кичик бўлса ҳам, индуктивликка эга бўлади. Шундай қилиб, *индуктивлик ҳам доимо занжир бўйлаб тақсимланган бўлар экан.*

Шунга ўхшаш, ўзгарувчан токда электромагнит энергиянинг ютилиши ва унинг иссиқлик энергиясига айланиши, занжирнинг барча элементларида содир бўлади. На фақат реостатлар, балки индуктив ғалтаклар ҳам, линияларнинг ўтказгичлари ҳам ва занжирнинг бошқа элементлари ҳам нолдан фарқланувчи электр қаршиликларига эга, улардан ток оқиб ўтганда электромагнит энергия ютилиши содир бўлади ва иссиқлик ажралиб чиқади. Агар ғалтак ферромагнит материалли ўзакка эга бўлса, у ҳолда ғалтак чулғамида энергия исрофидан ташқари, ўзакда гистерезис ва уюрма тоқларнинг энергия исрофи ҳам мавжуд бўлади. Ўзгарувчан кучланиш бўлганда конденсаторларда диэлектрикдаги қувват исрофи мавжуд бўлади. Электрон лампаларда иссиқлик анодда ажралиб чиқади, чунки электр майдонида тезлатилган электронлар бу ерда ўзининг тезлигини йўқотадилар. Ионли асбобларда электромагнит энергия иссиқлик энергиясига на фақат электродларда, балки электродлар орасидаги газ муҳитида ҳам айланади.

Занжирнинг бирор қисмидан ток ўтиши натижасида шу қисм электр қаршилигининг электромагнит энергияни ютиш қобилияти мавжудлигини таъкидлаш билан бирга, шуни эътироф этишимиз зарурки, *электр қаршилик электр занжирининг ҳамма жойида тақсимлангандир.*

Электр қаршиликлари ва ўтказувчанликлари, индуктивликлари ва электр сизимлари занжир бўйлаб тақсимланган электр занжирлари, параметрлари тақсимланган электр занжирлари деб аталади. Шунга мувофиқ, бундай занжирлардаги ток ва кучланишлар вақтга боғлиқ равишда ва бирор фазовий координатага боғлиқ равишда ўзгаради, демак, икки ўзгарувчининг функциясидир. Бу вазият электр занжирлари физик жараёнларини таҳлил қилишни тубдан мураккаблаштиради.

Баъзи электр занжири қисмларида электромагнит энергия, на фақат иссиқликка, балки бошқа турдаги энергияга ҳам ўзгартирилиши мумкин, масалан аккумуляторларнинг зарядланишида - кимъевий энергияга, электр моторларида – механик энергияга ўзгартириш амалга оширилади. Бироқ, электр занжирининг барча элементларида бундай энергия ўзгартирилиши амалга оширилиши шарт эмас.

2. Электр занжирида ток манбаини ЭЮК манбаига алмаштириш ва занжир учун Кирхгоф қонунлари бўйича тенгламалар тузиш

Ўқитувчи томонидан берилган вариант бўйича электр занжир параметрларини 1-жадвалга ёзамиз ва ҳисобланадиган схемани чизамиз. Схема 2.1-расмда келтирилган.

1-жадвал

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	E_2	E_3	$I_{\kappa 2}$	$I_{\kappa 3}$
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	В	В	А	А
20	80	100	35	150	40	100	150	0	1

$I_{\kappa 2}$ токлитокманбасини ЭЮК манбаига алмаштирамиз ва уни E_2 ЭЮК билан қўшиб, $E_{2,0}$ ни топамиз:

$$E_2 = I_{\kappa 2} \cdot R_2 = 0$$

$$E_{2,0} = E_2 + E'_2 = 181 \text{ В}$$

$I_{\kappa 3}$ токли ток манбасини ЭЮК манбаига алмаштирамиз ва уни E_3 ЭЮК билан қўшиб, $E_{3,0}$ ни топамиз:

$$E_3 = I_{\kappa 3} \cdot R_3 = 0 \text{ В}$$

$$E_{3,0} = E_3 + E'_3 = 150 \text{ В}$$

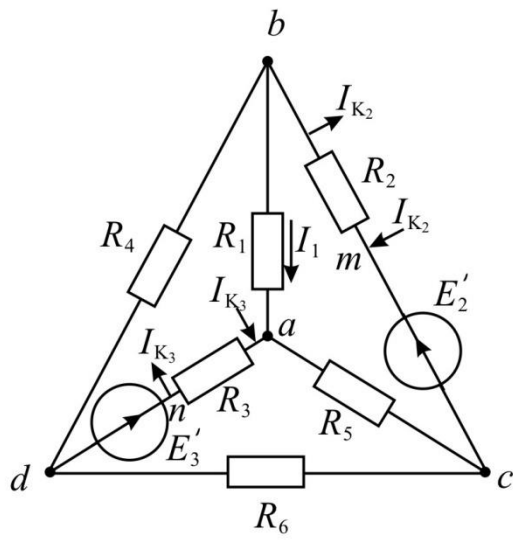
Энди схема 2.2-расмдаги ҳолатга келади.

Занжирни ҳисоблашда Кирхгоф қонунлари асосида тенгламалар системасини тузиш учун қуйидагиларни бажарамиз:

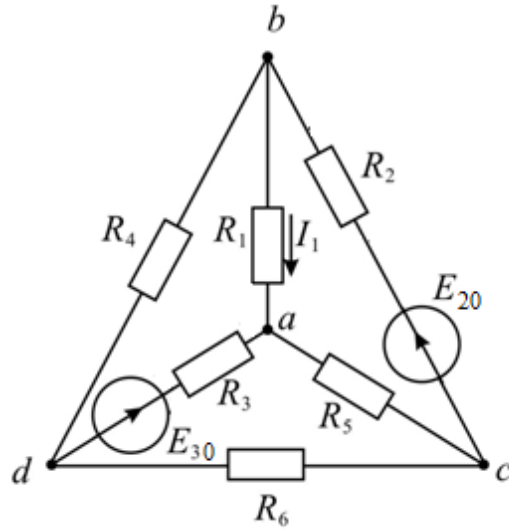
а) 2.2-расмдаги схема тармоқ тоқлари мусбат йўналишини ихтиёрий қўямиз.

б) контурни айланиш йўналишини танлаймиз, одатда соат стрелкаси бўйича йўналиш мусбат йўналиш деб қабул қилинади;

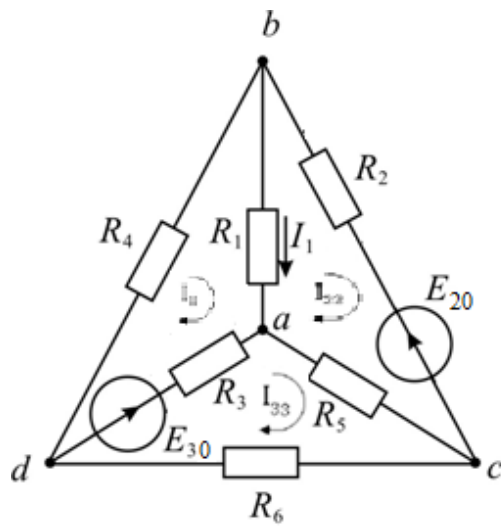
в) Кирхгофнинг 1-қонуни бўйича тугунлар сонидан битта сонга кам мустақил тенгламалар системасини тузамиз. Бизнинг схемада тугунлар сони 4 та, шунинг учун Кирхгофнинг 1-қонунига биноан 3 та тенглама тузамиз:



2.1-расм



2.2-расм



2.3-расм

$$\begin{aligned}
\text{«a» тугун учун} & \quad I_4 + I_3 + I_6 = 0 \\
\text{«b» тугун учун} & \quad I_4 + I_2 - I_1 = 0 \quad (2.1) \\
\text{«с» тугун учун} & \quad -I_5 + I_6 - I_2 = 0
\end{aligned}$$

Кирхгофнинг иккинчи қонунига асосан в-(у-1) та тенглама тузамиз; бу ерда в- тармоқлар сони, у- тугунлар сони.

Бизнинг схема учун $6 - (4 - 1) = 3$. Демак,

$$\begin{aligned}
\text{«dac» контур учун} & \quad -I_6 R_6 + I_3 R_3 - I_5 R_5 = E_{30} \\
\text{«abd» контур учун} & \quad -I_3 R_3 - I_1 R_1 + I_4 R_4 = -E_{30} \quad (2.2) \\
\text{«bca» контур учун} & \quad -I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_5 R_5 = -E_{20}
\end{aligned}$$

(2.1) ва (2.2) тенгламалар системасини биргаликда ечими схема тармоқ тоқларини аниқлашга имкон беради.

3. Электр занжирини контур тоқлари усули билан ҳисоблаш

Контур тоқлари усули билан схема тармоқ тоқларини аниқлаш учун 2.2-расмдаги схемани тармоқ тоқлари йўналишини кўрсатмаган ҳолда 2.3-расмдаги кўринишда қайта чизамиз. Бу ерда ҳар бир мустақил контурда ўз контур тоқи оқади деб фараз қиламиз.

Дастлаб контур тоқлари учун тенгламалар тузиб, уларни биргаликда ечиб, сўнг контур тоқлари орқали тармоқ тоқларини аниқлаймиз.

Номаолумлар сони Кирхгофнинг 2-қонуни бўйича тузилган тенгламалар сонига тенг бўлиши керак. 2.3-расмда кўрсатилганидек, уч мустақил контур учун контур тоқларини I_{11} , I_{22} , I_{33} орқали белгилаймиз. Уларнинг йўналишини ихтиёрий танлаш мумкин. Биз қараётган ҳолда контур тоқлари ва контурлар учун айланиш йўналишини соат стрелкаси бўйича оламиз. Унда Кирхгофнинг 2-қонунига биноан:

$$\begin{aligned}
I_{11}(R_4 + R_1 + R_3) - I_{22}R_1 - I_{33}R_3 &= -E_{30} \\
-I_{11}R_1 + I_{22}(R_1 + R_2 + R_5) - I_{33}R_5 &= -E_{20} \\
-I_{11}R_3 - I_{22}R_5 + I_{33}(R_3 + R_5 + R_6) &= E_{30}
\end{aligned} \quad (3.1)$$

Энди қуйидагича белгилаш киритамиз:

$$I_{11} = X_1; \quad I_{22} = X_2; \quad I_{33} = X_3.$$

ЭЮК ва қаршиликларнинг сон қийматларини (3) га қўйиб қуйидаги тенгламалар системасини ҳосил қиламиз:

$$155X_1 - 20X_2 - 100X_3 = -150$$

$$-20X_1 + 250X_2 - 150X_3 = -181 \quad (3.2)$$

$$-100X_1 - 150X_2 + 290X_3 = 150$$

$$X_1 = -1,55$$

$$X_2 = -1,24$$

$$X_3 = -0,66$$

Демак, $I_1 = I_{11} - I_{22} = -0,31 \text{ А}$

$$I_2 = I_{22} = -1,24 \text{ А}$$

$$I_3 = I_{11} - I_{33} = -0,89 \text{ А}$$

$$I_4 = I_{11} = -1,55 \text{ А}$$

$$I_5 = I_{33} - I_{22} = -0,58 \text{ А}$$

$$I_6 = I_{33} = -0,66 \text{ А.}$$

Тармоқ тоқларини аниқлашда ҳосил бўлган манфий ишоралар тармоқ тоқларининг ҳақиқий йўналиши контур тоқларининг мусбат йўналишига нисбатан тескари эканлигини билдиради.

4. Электр занжирини тугун потенциаллари узули билан ҳисоблаш

Номаолум миқдор сифатида схема тугунларининг потенциаллари олиниб ва улар орқали электр занжирини ҳисоблаш тугун потенциаллари узули дейилади.

Бизнинг схемамизда 4 та тугун бор, «с» тугунни ерга уланган деб фараз қиламиз ва бу тугун потенциали «0» га тенг деб қабул қиламиз. У ҳолда номаолумлар сони «3» га тенг бўлади. Тугун потенциаллари узули билан ҳисоблашда номаолумлар сони Кирхгофнинг биринчи қонуни бўйича тузилган тенгламалар сонига тенг (4-расм).

Тармоқ тоқлари йўналишини ихтиёрий танлаб Кирхгофнинг 1-қонунига асосан *a*, *b*, *d* тугунлар учун тенгламалар тузамиз:

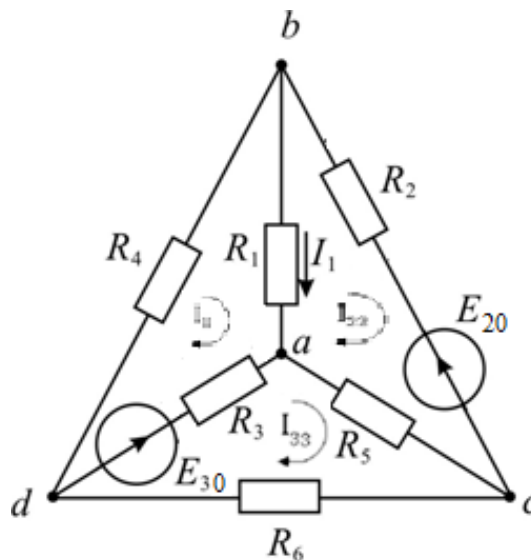
«a» тугун учун	$I_4 + I_3 + I_6 = 0$
«b» тугун учун	$I_4 + I_2 - I_1 = 0$
«с» тугун учун	$-I_5 + I_6 - I_2 = 0$

Бунда

$$\begin{aligned}
 I_1 &= (\varphi_b - \varphi_a)g_1 \\
 I_2 &= [(\varphi_c - \varphi_b) + E_{20}]g_2 \\
 I_3 &= [(\varphi_d - \varphi_a) + E_{30}]g_3 \\
 I_4 &= (\varphi_d - \varphi_b)g_4 \\
 I_5 &= (\varphi_c - \varphi_a)g_5 \\
 I_6 &= (\varphi_d - \varphi_c)g_6
 \end{aligned}$$

Бу ерда φ - тугун потенциали; $g = 1/R$ тармоқ ўтказувчанлиги. Токларнинг бу ифодаларини юқоридагитенгламаларга қўйиб, математик алмаштиришлардан сўнг ва $\varphi_a = 0$ эканини ҳисобга олиб, қуйидаги тенгламалар системасини оламиз:

$$\begin{aligned}
 -\varphi_d(g_4 + g_3 + g_6) + \varphi_b g_4 + \varphi_c g_6 &= -E_{30}g_3 \\
 \varphi_c g_2 - \varphi_b(g_4 + g_1 + g_2) + \varphi_d g_4 &= E_{20}g_2 \\
 \varphi_d g_6 + \varphi_b g_6 - \varphi_c(g_6 + g_2 + g_5) &= -E_{20}g_2
 \end{aligned} \tag{14}$$



4.1-расм

Бу системадаги ўтказувчанлик, ЭЮК сон қийматларини қўйиб, ҳамда $\varphi_d = X_1$; $\varphi_b = X_2$; $\varphi_c = X_3$ белгилаш киритиб, қуйидагини ёзамиз:

$$-0,055X_1 + 0,02X_2 + 0,025X_3 = -1,5$$

$$0,02X_1 - 0,08X_2 + 0,01X_3 = 2,26 \quad (15)$$

$$0,025X_1 + 0,01X_2 - 0,041X_3 = -2,26$$

Тенгламалар системасини илова-1 даги дастур бўйича компютерда ечиб, d, b, c тугунлар потенциали сон қийматларини топамиз:

$$X_1 = 4,37 \quad (16)$$

$$X_2 = -20,55 \quad (17)$$

$$X_3 = 52,77 \quad (18)$$

Тармоқ токлари миқдорини аниқлаш учун потенциаллар сон қийматини (16), (17), (18) ва $\varphi_c = 0$ эканлигини ҳисобга олиб (8)-(13) ифодаларга қўямиз ва токларнинг қийматини топамиз.

$$I_1 = 0.35 \text{ A}$$

$$I_2 = 1.20 \text{ A}$$

$$I_3 = 0.91 \text{ A}$$

$$I_4 = 1,65 \text{ A}$$

$$I_5 = 0,61 \text{ A}$$

$$I_6 = 0.65 \text{ A}.$$

«Минус» ишораси токнинг ҳақиқий йўналиши, ихтиёрий олинган йўналишга тескари эканлигини кўрсатади.

5. Ҳисоблаш натижаларини таққослаш ва

ҳисоблаш аниқлигини баҳолаш

Контур токлари ва тугун потенциаллари усуллари билан олинган ҳисоблаш натижаларини 2-жадвалга киритамиз ва токнинг ўртача қийматларини топиб, жадвалга ёзиб қўямиз.

2-жадвал

Токлар →	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
Усул ↓	A	A	A	A	A	A
Контур токлари	0.31	1.24	0.89	1.55	0.58	0.66
Тугун потенциаллари	0.35	1.20	0.91	1.65	0.61	0.65

Токларнинг ўртача қиймати	0.33	1.22	0.88	1.57	0.57	0.65
---------------------------	------	------	------	------	------	------

2-жадвалда келтирилган натижаларни солиштириш шуни кўрсатадики, ҳар икки усул билан ҳисобланган ток қийматлари амалда бир-бирига тенг, бу ҳисоблаш тўғри бажарилганлигини кўрсатади.

Ҳисоблаш аниқлигини баҳолаш учун қувват балансини тузиш зарур. Бунда манбалар ва истеомолчилар қуввати алоҳида ҳисобланади. Ҳисоблашда ҳар бир тармоқ токининг ўртача қиймати олинади.

а) ЭЮК манбалари бераётган қувват:

$$P_M = E_{10}I_1 + E_{20}I_2 = 353\text{Вт}$$

б) схемада истеомол қилинаётган қувват:

$$P_{\text{ист}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 = 354\text{Вт}$$

в) нисбий хатолик

$$\gamma = \frac{P_M - P_{\text{ист}}}{P_M} \cdot 100\% = \frac{353 - 354}{353} \cdot 100\% = 0,25\%$$

шуни кўрсатадики, бажарилган ҳисоблар етарли даражада тўғридир. Хатолик арифметик амалларни бажаришда вергулдан кейинги рақамларнинг чекланганлиги туфайли ўсил бўлган. Ҳисоблашлардаги нисбий хатоликка 2% гача рухсат берилади.

АДАБИЁТЛАР

1. Новгородцев А.Б. 30 лекция по теории электрических цепей : Учебник для вузов СПб: Политехника, 1995. -519 с.
2. Бирюков В.Н., Попов В.П., Семенцов В.И. Сборник задач по теории цепей.- М: Высшая школа 1990. – 238 с.
3. Электр занжирлар назарияси. Лаборатория машғулотларини бажариш учун услубий қўлланма .(Ўзбек ва рус тилларида). Тошкент . 2010.
4. Электр занжирлар назарияси. Лаборатория (виртуал) машғулотларини бажариш учун услубий қўлланма. (Ўзбек ва рус тилларида). Тошкент . 2008.
5. Электр занжирлар назарияси. Амалий машғулотларни бажариш учун услубий қўлланма. (Ўзбек ва рус тилларида). Тошкент . 2008.
6. Электр занжирлар назарияси. Курс ишларини бажариш учун услубий қўлланма. (Ўзбек ва рус тилларида). Тошкент . 2008.
7. Электр занжирлар назарияси. Мустақил ишларини бажариш учун услубий қўлланма. (Ўзбек ва рус тилларида). Тошкент . 2008.
8. Давидов С.Р., Дмитриев В.Н., Тулаганова В.А. Электр занжирлар назарияси. Тест синовлари учун вазифалар тўплами. Т .ТЭАИ, 1-қисм ,1997.-172 б: 2-қисм.
- 9.Бакалов В.П., Воробьенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей.: Учебник для ВУЗов; Под ред. В.П. Бакалова, -М.: Радио и связь, 1998. -444 с.
- 10.Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи: Учебник для ВУЗов. -3-е изд., -М.: Высш. шк., 1990. -400 с.

11. Методические указания по расчету контрольных заданий по курсу «ТОЭ»(Линейные цепи постоянного тока). Учебно-производственная типография ФерПИ, 1985 (составители: Нигматов Ж.М. и др.).
12. Каримов А.С., Миръайдаров М.М. ва бошқалар. Электротехника ва электроника асослари (масалалар тўплами ва лаборатория ишлари). Тошкент, «Ўқитувчи», 1989.
13. Каримов А. С. Назарий электротехника. 1-том. Т.: Ўқитувчи, 2003.
14. Сборник задач по теоретическим основам электротехники. Под. ред. Л.А. Бессонова. М.: Высшая школа, 1988.
15. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том 1. Ленинград, 1982.
16. Шебес М.Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1982.
17. Сборник программированных задач по теоретическим основам электротехники. Под. ред. Н.Г. Максимовича и И.Б. Куделко. Лвов, «Высшая школа», 1976.

