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 гурух талабаси

Олимжонов Х

Қабул қилди: Жўраева Г

Фарғона 2016

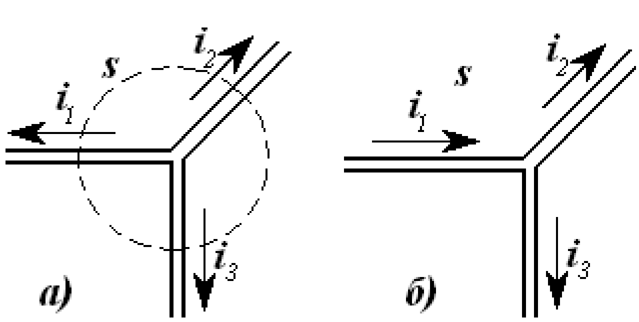
1.Электр занжирлари назарияси асосий қонунлари

Электр занжирларини ҳисоблаганда Кирхгофнинг икки қонуни, Ом қонуни, алмаштириш теоремаси қўлланилади. Уларни мужассамланган параметрли занжирларни ҳисоблашда кўриб чиқамиз.

Кирхгофнинг биринчи қонуничет тиллардаги адабиётларда ҳар хил номларда учрайди, шулардан иккинчи номи ***Кирхгофнинг токлар қонуни***, учинчиси ***Кирхгофнинг тугунлар учун қонуни*** – электр занжирининг тугунлари учун қўлланилади ва электр токининг узлуксизлиги принципига асосланади (§ 1.7 га қаранг).

Кирхгофнинг биринчи қонуни- электр (заряд) миқдори сақланиш қонунидан келиб чиқувчи натижадир; унданда кўра аҳамиятлироқ қилиб айтганда - бу *энергия сақланиш қонуни*нинг электр занжирлари «тилидаги» ифодасидир: занжирнинг *бир тугунига шохобчалардан келувчи барча токлар йиғиндиси, ушбу тугундан чиқиб кетаётган барча токлар йиғиндисига тенг.*

Занжирнинг тугунини берк юза *s* билан ўраб оламиз (1.1,*а*-расм). Қабул қилинган фаразларга мувофиқ, мужассамланган параметрли занжирлардаги барча сиғимлар занжирдаги мавжуд конденсаторларда мужассам бўлган. Бу уланган ўтказгичлардан занжирнинг бошқа қисмларига электр силжиш токларининг ўтишини эътиборга олмасликка мос келади. Шундай қилиб, берк юза *s* орқали шу юзани кесиб ўтаётган ўтказгичлардаги фақат ўтказувчанлик токлари оқиб ўтади.



1.1-расм

Токнинг узлуксизлиги принципи асосида, бу ҳолат учун қуйидаги ифодага эга бўламиз:

$$\oint_S \boldsymbol{J}d\boldsymbol{s} = i_1 + i_2 + i_3 = 0.$$

Занжирнинг тугунига уланган ихтиёрий n шохобча учун

$$\sum_{k=1}^{n} i_k = 0, \qquad (1.1)$$

яъни, *электр занжирининг тугунидан чиққан токлар йиғиндиси нолга тенг,* мана шу Кирхгоф биринчи қонунининг таърифидир.

Кирхгоф биринчи қонунининг ҳар хил номлари ичида, унинг моҳиятини аниқроқ ифодалайдигани - Кирхгофнинг токлар қонуни (КТҚ) номидир. Келгусида бу қонунни мана шу номда ишлатамиз.

КТҚ асосида тенгламалар тузишни барча шохобчаларда токларнинг шартли-мусбат йўналишини аниқлаш ва уларни схемада стрелкалар билан белгилашдан бошлаш зарур. Токларнинг мусбат йўналиши тугундан бошланса, (1.1) тенгламанинг чап томонидаги токларнинг ҳарфли белгиларига «плюс» ишорасини, мусбат йўналиши тугун томон йўналган бўлса, токларнинг ҳарфли белгиларига «минус» ишорасини қўйилади. 1.1*,а*-расмдаги ҳолат учун тенгламанинг барча токлари учун «плюс» ишора, 1.1*,б*-расмдаги ҳолат учун эса қуйидагича ёзиш керак:

$$-i_1 + i_2 + i_3 = 0.$$

Агар ҳисоблашлар натижасида бирор ток вақтнинг бирор они учун мусбат ишорали ($i_k > 0$) бўлса, демак шу онда токнинг йўналиши стрелка кўрсатишига мос бўлади. Агар натижа $i_k < 0$ бўлса, демак бу токнинг йўналиши аслида стрелкага тескари йўналишда бўлади.

Кирхгофнинг иккинчи қонуни, ёки бошқа номлардаги ***Кирхгофнинг контурлар учун қонуни***, ёки ***Кирхгофнинг кучланишлар қонуни*** электр занжирларининг контурлари учун қўлланилади.

$$\oint \boldsymbol{E}\, d\boldsymbol{l} = \oint \boldsymbol{E}_{инд} d\boldsymbol{l} + \oint \boldsymbol{E}_{ташқ} d\boldsymbol{l} \qquad (1.2)$$

$\oint \boldsymbol{E}_{ташқ} d\boldsymbol{l}$ қиймат контурга таъсир этаётган ташқи манбалар *ЭЮК*ларининг $\Sigma e_{ташқ}$йиғиндисидир. Тенгламанинг $\oint \boldsymbol{E}_{инд} d\boldsymbol{l}$ ташкил этувчиси таркибига контурдаги барча индуктивланаётган *ЭЮК*лар – ҳам электромагнит индукцияси, ҳам ўзиндукция, ҳам ўзаро индкция асосидаги *ЭЮК*лар киради. Масалан, ғалтакдаги $e_L = L\, di / dt$ ни олайлик. Агар (1.2) нинг биринчи ташкил этувчисига энергия манбаси сифатида фақат генераторлардаги *ЭЮК*ларининг йиғиндиси $\Sigma e_{инд}$ ни киритсак, у ҳолда ғалтаклардаги индуктивланаётган ўзиндукция ва ўзаро индукция ЭЮКларини тенгламанинг чап томонига ўтказилиши ва $\oint \boldsymbol{E}\, d\boldsymbol{l}$ нинг таркибига киритилиб, ғалтак клеммаларидаги кучланишлар пасаюви сифатида эътиборга олиниши шарт. Масалан, ғалтак учун тенгламанинг чап томонида $u_L = +L\, di / dt$ пайдо бўлади. Чап томондаги $\oint \boldsymbol{E}\, d\boldsymbol{l}$ таркибига, яна контурга кирувчи реостатдаги кучланишлар пасаюви ri ҳам, конденсатордаги $u_C = q/C$ кучланишлар пасаюви ҳам киради. Контурнинг барча n шохобчаларидаги энергия манбалари *ЭЮК*ларининг йиғиндисини қуйидагича белгилаймиз

$$\sum_{k=1}^{л} e_k = \sum_{k=1}^{k=n} e_{k.таш} + \sum_{k=1}^{k=n} e_{k.инд}$$

ундан

$$\sum_{k=1}^{л} u_k = \sum_{k=1}^{k=n} e_k \ . \qquad (1.3)$$

Шундай қилиб, Кирхгофнинг иккинчи қонуни қуйидагича талқин этилади: *электр занжирининг ихтиёрий берк контурдаги барча шохобчалари кучланишлар пасаювининг йиғиндиси шу контурга таъсир этаётган энергия манбалари ЭЮКларининг йиғиндсига тенг*.

Агар k – шохобчада, умумий ҳолда, актив қаршилик i_k қаршилиги, i_L индуктивлик ғалтаги C сиғимли конденсатори (1.2,*а*-расм) бўлса, у ҳолда ушбу шохобча бўйлаб кучланишлар пасаюви шу элементларнинг шу элементлар кучланишлар пасаювлари йиғиндисига $u_k = u_{rk} + u_{Lk} + u_{Ck}$ тенг. Унда

$$u_k = r_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + \frac{q}{C_k} = r_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t i_k dt + u_{Ck}$$

Кирхгофнинг иккинчи қонуни асосида тенгламалар тузиш учун барча шохобчаларнинг i_k токлари ва энергия манбалари *ЭЮК*лари e_k нинг мусбат йўналишлари берилган бўлиши шарт. Кучланишлар пасаюви u_k мусбат йўналишлари i_k токларнинг мусбат йўналишларига мос деб ҳисоблаймиз. Шундан сўнг контурни айланиб чиқишнинг бирор йўналишини танлаб, кучланишлар пасаюви $\sum_{k=1}^{л} u_k$ йиғиндиси ва *ЭЮК*лар $\sum_{k=1}^{k=n} e_k$ йиғиндисини тузишда u_k ва e_k нинг ҳарфли белгилари олдига «плюс» ёки «минус» ишораларини қўйиш лозим. Агар u_k ва e_k қийматлар мусбат йўналишари айланиш йўналиши билан мос келса «плюс», акси бўлса «минус» ишораси қўйилади.

Мужассамланган параметрли электр занжирларида Кирхгофнинг иккинчи қонуни электр занжирини қуршаб олган фазо орқали бир тугундан иккинчи тугунга ўтадиган контур учун ҳам ёзилиши мумкин. Мужассамланган параметрли электр занжирлари назариясини қуришда қабул қилинган илмий абстракциялар асосида шуни эътиборга олишимиз зарурки, бу занжирни қуршаб олган фазода магнит ва ташқи майдонлар бўлмаслиги зарур, демак, $e_{ташқ}$ ва $e_{инд}$ *ЭЮК*лар нолга тенг бўлиши шарт. Контурни бундай айланиш йўналишини танлаганда қуйидагини ёзим мумкин

$$\oint \boldsymbol{E}\, d\boldsymbol{l} = \sum u_{mn} = 0, \qquad (1.4)$$

бунда u_{mn} - mва n тугунлар орасидаги кучланишлар.

Шунга эътибор берайликки, мужассамланган параметрли занжирнинг ташқи фазосида ҳам электр майдони мавжуд деб ҳисобланса, интеграл айрим маънога эга бўлади. Аммо бундай майдон энергияси ва силжиш токлари жуда кичик ва эътиборга олмаса ҳам бўлади, деб ҳисобланади.

Шохобча k да (1.2,*б*-расм) энергия манбаларининг мавжудлиги шу шохобчанинг графига (1.2,*в*-расм) ҳеч қандай таъсир этмайди. Шохобча графидаги ток ва кучланишларни $\tilde{i}_k$ ва $\tilde{u}_k$ каби белгилаймиз. Ток $\tilde{i}_k$ ва кучланиш $\tilde{u}_k$, ток манбаси ва *ЭЮК* (1.2,*б*-расм) манбасига эга бўлган, бирор *умумлаштирилган шохобчага* тааллуқлидир. КТҚга асосан, 1.2,*б*-расмдаги m' (ёки n') тугунига нисбатан қуйидагиларни ёзиш мумкин бўлади

$$\tilde{i}_k = i_{mn} + J_k .$$

Кирхгофнинг иккинчи қонунига мувофиқ, k шохобча ўтказгичларидан m тугундан n тугунга ўтаётган ва ташқи фазодан – n тугундан m тугунга ўтаётган контур учун қуйидагини ҳосил қиламиз

$$u_{mn} = \tilde{u}_k = u_k - e_k = r_k i_k + \frac{d}{dt}(L_k i_k) + \int_0^t \frac{i_k}{C_k} dt + u_{Ck}(0) - e_k .$$

Кейинги ифода берилган схемада мавжуд бўлган ва схема графида шохобчалар токлари ва кучланишлари, ток ва *ЭЮК* манбалари кесмалар билан тасвирланган бўлса, графнинг умумлаштирилган шохобчаларидаги ток ва кучланишларни боғлайди.

Кирхгоф қонунлари бўйича схема графи учун тенгламалар ёзилганда шуни кўзда тутамизки, бу тенгламалар таркибига схеманинг умумлаштирилган шохобчаларидаги ток ва кучланишлар киради. Демак, схема графи учун қуйидагини ёзиш мумкин:

$$\sum_{k=1}^{p} \tilde{i}_k = 0 \text{ ва } \sum_{k=1}^{p} \tilde{u}_k = 0 \text{ ёки } \sum_{k=1}^{p} \tilde{u}_k = \sum_{k=1}^{p} e_k . \qquad (1.5)$$

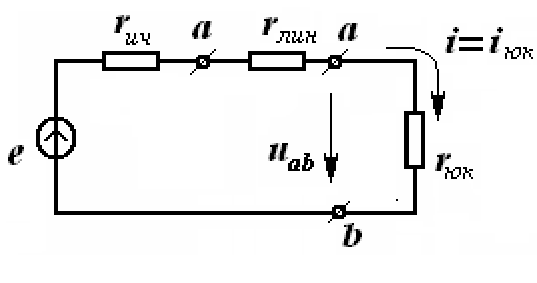
Кирхгоф иккинчи қонунининг ҳар хил номлари ичида, унинг моҳиятини аниқроқ ифодалайдигани - Кирхгофнинг кучланишлар қонуни (ККҚ) номидир. Келгусида бу қонунни мана шу номда ишлатамиз.

Ом қонуни. Резистив қаршиликлари бўлган занжирлар учун силжиш ва кўчиш токлари нолга тенг деб фараз қиламиз. Натижада, фақат ўтказувчанлик токлари учун юқорида 1.9,*а*-расмдаги занжир учун келтирилган (1.8) математик ифода манбанинг *еЭЮК* билан ундаги i юклама токи орасидаги боғланишни белгилаган бўлса, ундаги ихтиёрик кетма-кет қаршиликлар

$\Sigma r = r_{ич} + r_л$

учун юклама кучланиши

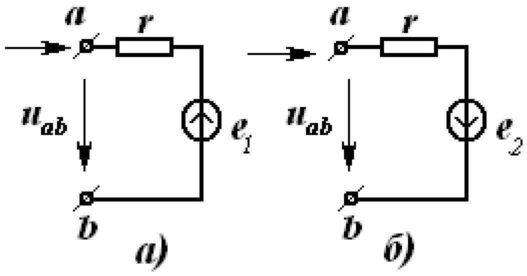
$u_{ab} = r_{юк} \cdot i$



1.2-расм

бунда $r_л$ – манбадан юкламагача бўлган ихтиёрий узунликдаги линия ўтказгичининг қаршилиги. Буларни (1.8)га қўйсак юклама кучланишининг бошқача кўринишини оламиз:

$u_{ab} = e - \Sigma r \cdot i \qquad (1.6)$



Бундан токни аниқласак,

$i = (e - u_{ab}) /\Sigma r$ (1.7) 1.3-расм

Кейинги тенглама *Омнинг умумлаштирилган қонуни* деб аталади. Танланган мусбат йўналишлар ўзгартирилганда, (1.7) даги барча ҳадларнинг ёки баъзи ҳадларининг ишоралари ўзгариши мумкин; масалан, 1.3,*а,б*-расмларда тасвирланган занжирларда, мазкур тенгламалар қуйидагича ёзилади:

$u_{ab} = e_1 + ir$ ёки $i = (u_{ab} - e_1)/r;$ (1.8)

$u_{ab} = - e_2 + ir$ ёки $i=(u_{ab} + e_2)/r;$ (1.9)

Ўзгарувчиларнинг харфли белгиланиши мусбат ёки манфий қийматларини ифодалаши хам мумкинлигини эслатиб ўтамиз.

Кучланиш u_{ab} ни a ва b нуқталари орасидаги потенциаллар фарқи эканлигини эътиборга олинса, яъни уни φ_a ва φ_b орқали ифодаласак, унда *умумлаштирилган Ом қонуни* бошқа кўриниш, масалан (1.9) учун қуйидаги кўриниш олади:

$$i=(\varphi_a - \varphi_b + e_2)/r.$$

Электр занжири элементидаги ток ва кучланиш орасидаги боғланиш

$u_{ab}=r \cdot i$

занжирнинг бир қисми учун Ом қонуни дейилади.

Бир контурли занжир учун Ом қонуни

$i=\Sigma e/\Sigma r,$ ёки $\Sigma r \cdot i=\Sigma e$ (1.9,*а*)

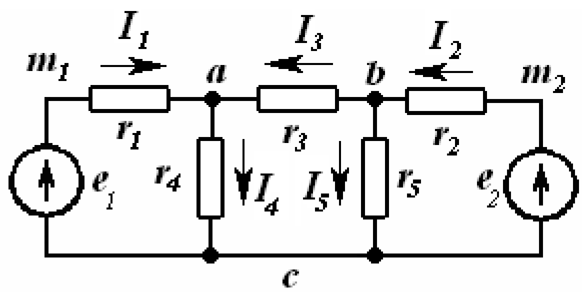
бунда Σe – контурдаги ЭЮКлар йиғиндиси; Σr – контурдаги қаршиликлар йиғиндиси.

Масалан, 1.4-расмдаги ташқи контур учун уни соат мили йўналиши бўйлаб ўтилганда (1.9) тенглама қуйидагича ёзилади:

$r_1 i_1 - r_3 i_3 - r_2 i_2 = e_1 - e_2 .$

Харфлар билан белгиланаётган қийматлар, ўз ўрнида, мусбат ёки манфий бўлиши хам мумкин.

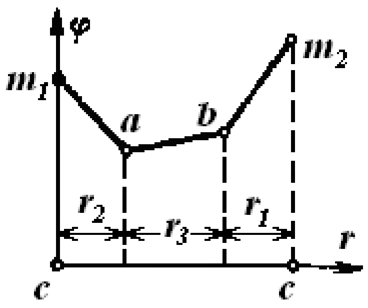
Кирхгофнинг иккинчи қонуни ифодасидаги $\Sigma r \cdot i$ ва Σe йиғиндилар контурнинг бир қисми учун хам, яъни a ва b нуқталар орасида узилиш пайдо бўлганда хам қўлланилиши мумкин. Бундай холда тенгламанинг чап томонига узилган нуқталар орасидаги потенциаллар фарқи кирилади:



1.4-расм

$\Sigma r \cdot i+U_{ab}= \Sigma e,$ (1.10) бунда юқорида кўрилган ишоралаш қоидасидага амал қилинади.

Кейинги ифодани ташқи контур (1.4-расм) учун қўллаб, соат мили йўналиши билан ўтилганда, *a* нуқтасида ўтишни узиб *b* нуқтасида ўтишни давом эттириб, қуйидагини аниқлаймиз:



$r_1 i_1 - r_2 i_2 + U_{ab} = e_1 - e_2$.

Потенциал диаграммаси. Электр занжири шохобчалари бўйлаб потенциалнинг ўзгаришини тўғри тушуниш учун потенциаллар диаграммасидан фойдаланиш зарур. Потенциаллар диаграммаси – шундай графикки, унинг бир (вертикал ёки ордината) ўқида потенциалнинг қийматлари, иккинчи (горизонтал ёки абсцисса)1.5–расм ўқида – занжирнинг танланган контури бўйлаб ўтишдаги кетма–кет қаршиликлар қийматлари қўйилади. 1.4–расмдаги занжирнинг ташқи контури бўйлаб ўтишдаги потенциал диаграммаси 1.5–расмда келтирилган. У *c* нуқтадан бошланиб, *c* нуқтада тугайди. Шу нуқтанинг потенциали нолга тенг деб ихтиёрий қабул қилинган. Графикнинг бошида ва кетида учрайдиган потенциаллар сакраши e_1 ва e_2 кучланиш манбаларининг уланган ҳолатига мос келади.

2 Соддалаштирилган электр занжирлари

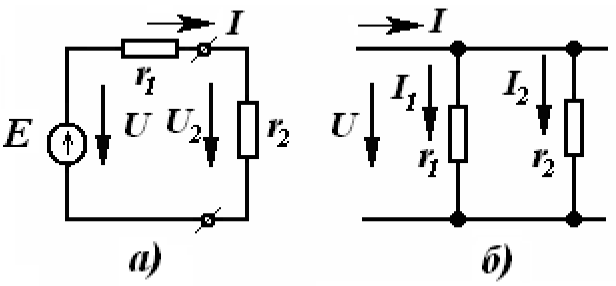
Кирхгоф, Ом ва Жоуль-Ленц қонунларини оддий электр занжирларига қўллаш ҳеч қандай қийинчилик уйғотмайди. Аммо кетма-кет ва параллел уланишлардаги, ҳамда оддий параллел кетма-кет уланишлардаги ток ва потенциалларнинг тақсимланишини тўғри идрок этишни ***алифбе ёки кўпайтириш жадвалини билгандек пухта ўзлаштириш зарур***.

Кетма-кет улаш. Кучланиш манбаси билан икки қаршилик кетма-кет уланганда (1.6,*а*-расм) улардан фақат биргина ток оқиб ўтади

$i = I = E / (r_1 + r_2)$.   (1.11)

Бир қатор резисторлар кетма-кет уланган бўлса уларни битта эквивалент қаршилик билан алмаштириш мумкин:

$r_э = r_1 + r_2 + r_3 + \dots$ (1.12)



1.6-расм

Уларнинг хар бири орқали оқаётган ток $I = U / r_Э$,
бунда

$U = E = r_1 I + r_2 I_2 + r_3 I_3 + \dots$

кучланишлар йиғиндиси.

[Бундан сўнг, ўзгармас ток занжирлари учун (турғунлик режимида) ток ва кучланишлар лотинча бош харфлар *I* ва *U* билан белгиланади].

Параллел улаш. Хар бири ўзаро параллел бўлган шохобчаларда кучланиш U бир хилдир, яъни тенгдир (1.6,*б*-расм). Агар U берилган бўлса, у холда хар бир шоҳобча учун ток қийматини Ом қонуни асосида аниқланади:

$$I_1 = g_1U; \quad I_2 = g_2U; \ldots \qquad (1.13)$$

бунда $g_k = 1/r_k$ - қиймат k- чи шохобчанинг ўтказувчанлиги.

Кирхгофнинг биринчи қонунига асосан, умумий ток барча шохобчалар токларининг йиғиндисига тенг:

$$I = I_1 + I_2 + \ldots = (g_1 + g_2 + \ldots)U \, .$$

Параллел уланганда барча шохобчаларни бир эквивалент ўтказувчанликка эга бўлган бир шохобча билан алмаштириш мумкин:

$$g_э = g_1 + g_2 + \ldots \qquad (1.14)$$

Бунда ток I ва кучланиш U орасидаги боғланиш берилган занжирдагидек қийматга эга бўлади:

$$I = g_ЭU \, .$$

Занжирда икки параллел шохобчалар мавжудлиги сабабли (1.6,*а*-расм) $U_2 = U_3$ бўлгани учун ток қуйидагича аниқланади:

$$I_1 = I_2 + I_3 = (g_2 + g_3)U_2 = g_Э \cdot U_2 = U_2 / r_Э \, ,$$

бунда

$$r_Э = \frac{1}{g_Э} = \frac{1}{g_2 + g_3} = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3} \, . \qquad (1.15)$$

Максимал қувватни узатиш шарти. Техник қурилмаларни лойиҳалаш жараёнида, аксарият, электр занжирлардан қабул қилувчи (юклама) томон оқаётган максимал қувватни узатиш шартини ҳисоблаш вазифаси қўйилади. Ушбу қувватнинг қиймати қабул қилувчининг қаршилиги, хамда уланган занжир параметрларига боғлиқ.

1.6,*а*-расмда тасвирланган занжир учун иккинчи резистор r_2 томонидан қабул қилиниб сарфланаётган қувват ушбу резисторнинг қаршилиги ва ундаги токка боғлиқ, хамда қуйидагича ифодаланади:

$$P_2 = I^2 r_2 = \frac{E^2}{(r_1 + r_2)^2} \cdot r_2 \qquad (1.16)$$

Агар $r_2 = 0$ (қисқа туташув, $U_2 = 0$) ва $r_2 \to \infty$ бўлганда (юксиз иш-лаш, $I = 0$) қувватнинг қиймати $P_2 = 0$ бўлади. Агар $r_2 = r_1$, бўлса қувват максимал бўлади, яъни $P_2 = P_{2\max}$.

Буни оддий усул билан келтириб чиқариш мумкин: P_2 ни r_2 бўйича дифференциалаб, уни нолга тенглаштирамиз. Натижада, шу маълум бўладики, қабул қилувчи қаршилик r_2 нинг (истемолчининг) максимал қуввати

$$P_{2\max} = \frac{E^2}{4{r_2}^2} \qquad (1.17)$$

миқдори E кучланиш манбаси бераётган қувватининг ярмисига

$$P_n = EI = E^2/2r_2 \qquad (1.18)$$

тенг бўлади.

Ушбу шартни бажариш жуда аҳамиятлидир. Масалан, радио антенналарида манба (э.ю.к. E ва r_1 ички қаршилиги) дан келаётган сигнал жуда суст ва қабул қилувчи қаршилиги максимал қувватни тортиши зарур деган шарт қуйилганда, ундан фойдаланилади.

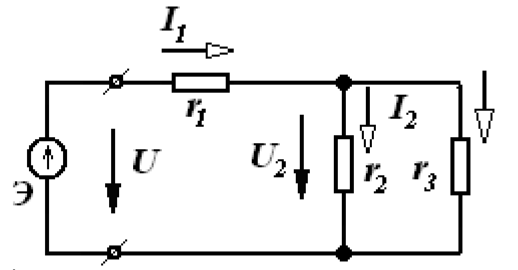
Аксинча, ушбу шарт катта энергияни узатиш учун мўлжалланган қурилмаларнинг мунтазам ишлагандаги ҳолатига мутлақо мос келмайди, чунки энергиянинг ярмиси истеьмолчига етиб борсаю, қолган ярмиси йўлда энергия исрофига сарфланса, бу эса ҳеч йўл қўйиб бўлмайдиган вазиятдир, чунки унинг ф.и.к. 50%га тенг бўлади. Энергетик ускуналарда ушбу аниқланган қаршилик қийматидан мутлақо бошқа мақсадда фойдаланилидир. Агар линияда қисқа туташув содир бўлса, линия ўчирилиши шарт, чунки ўчиргич контактлари орасидаги қаршилик r_2 нинг қиймати r_1 га тенг бўлса, шу контактлар орасидаги қувват максимал бўлади. Бу қувват ўта юқори қийматли бўлади, шунинг учун ўчириш (занжирни узиш) жараёни имкон қадар тезкорлик билан бажарилиши шарт.

Оддий кетма-кет-параллел занжир. Бундай занжирни (1.7-расм) ҳисоблаш бирмунча мураккаброқ. Икки параллел шохобчани эквивалент ($r_Э$) қаршилик билан алмаштириб

$$r_Э = r_2 r_3 / (r_2 + r_3) \qquad (1.19)$$

умумий токни

$$I_1 = E / (r_1 + r_Э), \qquad (1.20)$$



1.7-расм

хамда икки параллел шохобчада кучланишни аниқлаймиз:

$$U_2 = U_3 = r_Э \cdot I_1 , \qquad (1.21)$$

ундан сўнг токларни аниқлаймиз:

$$I_2 = U_2/r_2; \qquad I_3 = U_3/r_3 \qquad (1.22)$$

Кейинги ифодаларга (1.21)дан $U_2=U_3$ ни қўйиб, сўнгра I_1 ва $r_Э$ ни (1.20) ва (1.19)дан аниқлаб, барча токлар учун ифодаларни қулай ҳолатга келтириш мумкин:

$$I_2 = \frac{E}{\rho} r_3; \; I_3 = \frac{E}{\rho} r_2; \; I_1 = \frac{E}{\rho}(r_2 + r_3), \qquad (1.24)$$

бунда ρ қуйидаги уч шохобчанинг барча қаршиликларидан ҳар иккиси кўпайтмалари йиғиндиси

$$\rho = r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1. \qquad (1.25)$$

Ушбу умумлаштирилган таъриф I_2, I_3 токларни ва улар йиғиндисига тенг бўлган I_1 токни аниқлаш учун зарурдир.

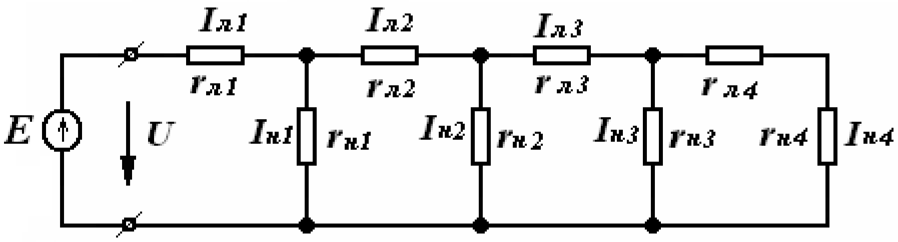
(1.24) ифодалардан токлар орасидаги боғланишлар хам яққол кўзга ташланади:

$$I_2 = I_1 \frac{r_3}{r_2 + r_3}; \quad I_3 = I_1 \frac{r_2}{r_2 + r_3}; \qquad (1.26)$$

(1.24)-(1.27) боғланишлар занжирларни ҳисоблашда кўп учраб туради. Уларни қайтадан келтириб чиқармасдан эслаб қолиш зарур.

Параллел кетма-кет шохобчали занжир. Мураккаб электр занжирини кўпинча бир қатор кетма-кет ва параллел уланган қаршиликлар сифатида тасаввур қилиш мумкин. Масалан, қаршиликлари $r_{ю1}$; $r_{ю2}$;... бўлган бирнечта юкламалар, алоҳида бўлакларининг қаршиликлари $r_{л,1}$; $r_{л,2}$;...га тенг бўлган битта линияга уланган бўлсин (1.8-расм).

Бир ўтказгичдан оқаётган барча ток, иккинчи ўтказгичдан қайтиб келадиган икки ўтказгичли линия кўрилаётган ҳолат учун унинг ихтиёрий



1.8-расм

бўлаги қаршилиги (масалан, $r_{л,1}$) тўғри ва тескари (иккала) ўтказгичлар қаршиликларини (айтайлик, $r_{л1}/2$ ва $r_{л1}/2$) қўйилиб, бир линияга уланган деб ҳисоблаш мумкин. Қаршиликларнинг бўндай ўрин алмашинуви натижасида линиянинг бўлагидаги кучланишлар пасаюви ўзгармайди.

1.8-расмда келтирилган схемани ўрганиш натижасида, $r_{ю,4}+r_{л,4}$ қаршиликли шохобча (охирги юкланиш охирги линия бўлаги билан бирга) $r_{ю,3}$ (охиридан олдинги бўлак юкланиши шохобчаси) билан параллел эканлигини кўриш мумкин. Ушбу икки шохобчаларни битта эквивалент қаршилик билан алмаштириш мумкин. Бу қаршилик эса, ўз навбатида $r_{л,3}$ (охиридан олдинги линия) қаршилигига кетма-кет уланган бўлади.

Шу таърица, барча занжир қаршиликларини «йиғиш» ва, натижада мураккаб занжирни соддалаштирилган (1.6,а-расм) холатга келтириш мумкин. Соддалаштирилган занжир учун манба токи $I_{л,1}$ ни аниқлаш қийин эмас. Бундан сўнг *биринчи* юкланишдаги кучланишни

$$U_{ю1} = E - r_{л1} \cdot I_{л1} \qquad (1.27)$$

ва унинг токини аниқлаш мумкин:

$$I_{ю1} = U_{ю1}/r_{ю1} ,$$

сўнгра *иккинчи* бўлакдаги линия токи $I_{л2} = I_{л1} - I_{ю1}$ ни аниқланади ва ҳ.к.

Пропорционал қийматлар усули. Юқорида келтирилган ҳисоблашни занжир (1.8-расм)нинг охиридан бошлаб, охирги юкланиш токининг қийматини ихтиёрий (масалан $I'_{Ю4} = 1$А) қабул қилинса, ечимни кескин енгиллаштириш мумкин.

Охиридан аввалги юкланиш уланган қисқичдаги кучланишни

$$U'_{Юк3} = (r_{Юк4} + r_{Л4})I'_{Юк4}$$

ҳисоблаб, унинг токини аниқлаймиз:

$$I'_{Юк3} = U'_{Юк3} / r_{Юк3} .$$

Сўнгра, ундан аввалги бўлимдаги токни

$$I'_{Л3} = I_{Юк3} + I_{Юк4}$$

ва $r_{ю2}$ шаҳобчадаги кучланишни ҳисоблаймиз:

$$U'_{Юк2} = U'_{Юк3} + r_{Л3} I'_{Л3} .$$

Шу тариқа ҳисоблашни давом эттириб, ихтиёрий танланган охирги юкланиш токи $I'_{Ю4}$ га мос келган занжир бошланишидаги $U' = E'$ кучланишни аниқлаймиз.

Агар занжир бошланишидаги кучланиш $U = E$ аниқланган кучланиш η марта катта, яъни

$$U / U = \eta, \qquad (1.28)$$

бўлса, у холда барча ҳақиқий ҳисобланган токлар оралиқ токларидан η марта катта бўласа, яъни:

$$I_{Юк4} = \eta I'_{Юк4};\ I_{Юк3} = \eta I'_{Юк3}; \cdots \qquad (1.29)$$

Кучланишлар хам шунга ўхшаш аниқланадилар:

$$U_{Юк4} = \eta U'_{Юк4};\ U_{Юк3} = \eta U'_{Юк3}; \cdots . \qquad (1.30)$$

Ушбу ҳисоблар ток ва кучланишлар пропорционаллигидан келиб чиқади.

Келтирилган ҳисоблаш усули *пропорционал қийматлар усули ёки ўхшашлик усули* дейилади.

Мураккаб занжирлар. Барча мураккаб занжирларни параллел ёки кетма-кет шохобчалар сингари тасаввур қилиб бўлмайди. Бундай занжирларга, масалан, Уистон кўприги (1.9,*а*-расм) учун юқорида келтирилган усулларни татбиқ этиб бўлмайди. Ушбу кўприкдаги мавжуд олтита шохобчаларнинг бирортасини ҳам қолганларига нисбатан на параллел ва на кетма-кет уланган деб бўлмайди.

Кирхгоф қонунларидан фойдаланиб, мураккаб чизиқли занжирда, берилган қийматлар мавжудлигида, шохобчалар токлари ва тугунлар потенциалларни аниқлаш имконини берувчи тенгламалар тизимини ҳосил қилиш мумкин. Масалан, барча кучланиш манбаларининг э.ю.к.лари, барча ток манбалартнинг токлари ва барча қаршиликлар қийматлари мавжуд бўлса, барча шохобчалар токларини ҳисоблаш мумкин.

Занжирда ток ва потенциалларнинг қийматларини (қийматларни қандай усулда - ҳисоблаш усуллари ёки ўлчаш усуллари ёрдамида аниқланишидан қатьий назар) текширишда ҳам Кирхгоф қонунларини қўллаш муҳим аҳамиятлидир; чунки берилган тенгламалар тизимининг тахмин қилинган ечимини текшириш, тенгламалар тизимини қайта ечишдан кўра енгилроқдир.

Дарҳақиқат, Кирхгоф қонунларининг татбиқ этилиши орасида энг муҳим ўрин тутганлари - тенгламалар тизимини ечмасдан туриб, чизиқли электр занжирининг баъзи умумий хусусиятларини аниқлаш имконини берувчи, «принциплар» деб аталувчи усуллардир (масалан, суперпозиция принципи, ўзаролик принципи).

Кирхгоф тенгламалари тизими. Берилган занжир шохобчалари сони “*Ш*” га тенг бўлсин; бу сонга ток *J* манбасига эга бўлган шохобчалар кирмайди; ушбу *J* ток ва кучланиш *E* қийматлари берилган бўлсин. Шохобчаларнинг чегараси бўлган тугунлар сони *T* га тенг бўлсин.

У холда Кирхгофнинг биринчи қонуни (1.1) га асосан мустақил тенгламалар сони

$$K_1=T-1 \quad (1.32)$$

тугунлар сонидан 1 га кичик бўлади.

Кирхгофнинг (1.3) *иккинчи қонуни*га асосан, яна K_2 та мустақил тенгламалар қуриш мумкин:

$$K_2=Ш - K_1=Ш+1-T \quad (1.33)$$

Бу тенгламалар берк контурлар учун тузилади. Контур тенгламаларининг ўзаро мустақиллиги аёндир, чунки хар бир контур таркибида хеч бўлмаганда битта шохобча бошқа контурлар таркибига кирмайди (бу зарурий бўлмаган, бироқ етарли бўлган шартдир).

Мустақил тенгламалар тўла сони шохобчалар сонига тенг

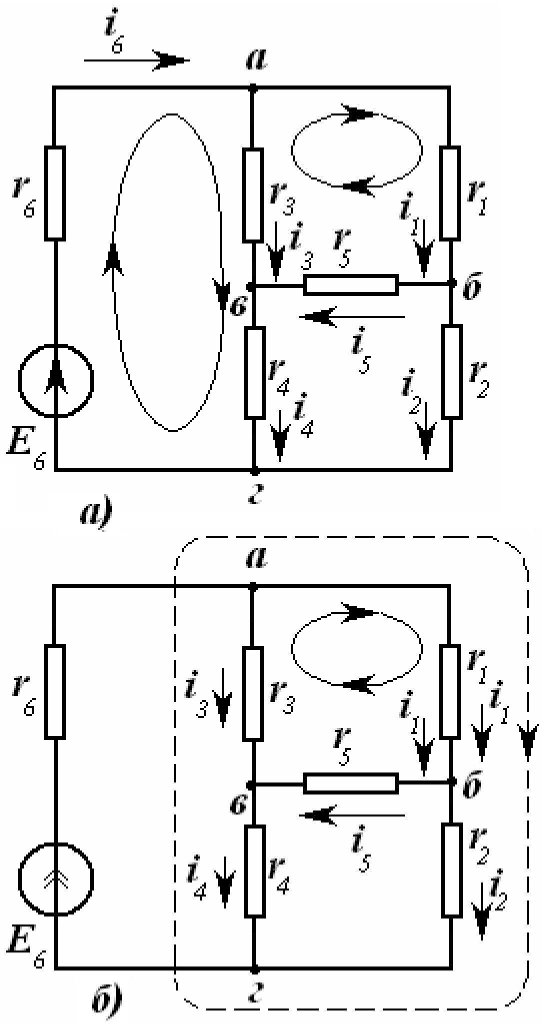
$$Ш= K_1+ K_2 \quad (1.34)$$

Охирги тенглик (1.32) ва (1.33) дан келиб чиқади, чунки ихтиёрий K_1 тугун тенгламалари ихтиёрий K_2 контур тенгламалари сонига боғлиқ эмас; дарҳақиқат, контур тенгламалари таркибига киритиш шарт бўлган шохобчалар қаршиликлари тугун тенгламалари таркибига кирмайди.

Шундай қилиб, агар барча шохобчалар қаршиликлари, хамда манбаларнинг токлари ва кучланишлари берилган бўлса, у холда тенгламалар тизимидан барча *Ш* та шохобчаларнинг *Ш* дона номаълум токларини аниқлаш мумкин. *Ш* шохобчалар сонига манбали шохобчалар кирмаслиги алохида таькидланади.

Агар у ёки бу э.ю.к. (ёки қаршиликлар) номаълум бўлганда хам тенгламалар тизимининг ечимини аниқлаш мумкин. Аммо, бунда тенгламадаги бошқа қийматлар (масалан, айрим шохобчалар токи) маълум бўлиши шарт, чунки номаълумлар умумий сони шохобчалар (тенгламалар) сони *Ш* дан ортмаслиги шарт.

Мисол. 1.9,*а*-расмда тўртта тугунли ($T = 4$) ва олтита шохобчали ($Ш = 6$) турғунлашган ҳолатдаги занжир келтирилган. Кирхгофнинг тенгламалари тизимини тузинг.



1.9-расм

Ечиш. Ушбу занжир учун Кирхгофнинг биринчи қонунига асосан $K_1 = T - 1 = 3$ та тугун тенгламаларини тузиш мумкин: $-I_6 + I_1 + I_3 = 0$ (*а*- тугун учун), $-I_1 + I_5 + I_2 = 0$ (*б*- тугун учун), $-I_3 - I_5 + I_4 = 0$ (*в*-тугун учун). Занжир турғунлашган ҳолатда бўлгани учун токларни катта ҳарф билан белгилаймиз, масалан, $i = I$.

Тўртинчи (*г*) тугун учун тенглама аввалги уччала тенгламалар натижаси эканлигига ишонч ҳосил қилиш мумкин.

Кирхгофнинг иккинчи қонуни асосида $K_2 = Ш + 1 - T = 3$ мустақил контур тенгламаларини тўзиш лозим. Масалан, 1.9,*а*-расмдагиконтурларучун :

$$r_6I_6+r_1I_1+r_2I_2=E_6,$$

$$r_6I_6+r_3I_3+r_4I_4=E_6,$$

$$r_1I_1+r_5I_5-r_3I_3=0.$$

1.2-мисол.*J* ток қиймати маълум бўлган (1.9,*б*-расм) ток манбаси бўлган занжир учун тенгламалар тизимини тузинг.

Ечиш. Занжирда бешта номаълум токлар ва бешта шохобчалар (ток манбасининг шохобчаси ҳисобга олинмайди) мавжуд.

Демак, учта *тугун тенгламалари* (тугунлар сони тўртга тенг) ва иккита *контур тенгламалари*ни тузиш мумкин:

$I_1 + I_3 = J$ (*а*- тугун учун);

$-I_1 + I_5 + I_2 = 0$ (*б*- тугун учун);

$-I_3 - I_5 + I_4 = 0$ (*в*- тугунучун);

$r_1 I_1 + r_2 I_2 - r_4 I_4 - r_3 I_3 = 0$;

$r_1 I_1 + r_5 I_5 - r_3 I_3 = 0$.

Кирхгоф қонунлари асосида тузилган тенгламалар тўлиқлиги

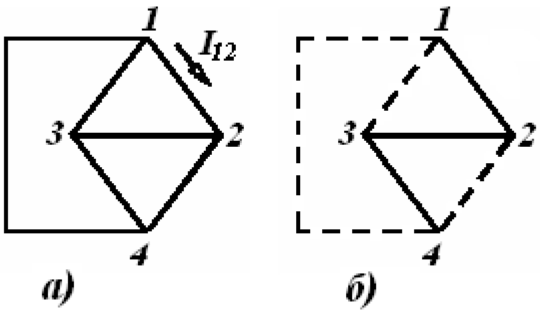
Мустақил тугун тенгламалари сони. Аввал ток манбаси бўлмаган занжирни кўрайлик. Занжирда (1.10,*а*-расм) тўрт тугун бўлиб, уларнинг хар бири қолган тугунлар билан биргина шохобча орқали уланган бўлсин.

Ушбу тугунлар учун тенгламалар қўйидагича бўлади:

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

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

бунда I_{mn} - m ва n тугунларни боғловчи шохобчанинг m тугундан n тугунга йўналган токи.



1.10-расм

Биринчи учта тенгламалар йиғин-дисини ҳисобласак (бунда $I_{21} + I_{12} = 0$; $I_{13} + I_{31} = 0$) шу маълум бўладики, ҳосил

$$I_{14} + I_{24} + I_{34} = 0$$

бўлган йиғинди таркибида фақат тўртинчи тугунча келаётган токлар бўлар экан. Бу йиғинди тўртинчи тугун тенгламасидан фақатгина барча хадларнинг ишораси билан фарқланади, демак, *охирги тугунучун ёзилгантенгламаундан олдингиларнинг натижаси экан*.

Биринчи учта тенгламаларнинг мустақил эканлиги аниқ, чунки уларнинг хар бирида, хеч бўлмаганда, битта янги ток мавжуд: m тугун учун - бу m тугунни кейинги тугун (масалан 4-тугун) билан боғловчи I_{m4} токидир.

Агар, икки тугун, масалан 1 ва 2 тугунлар орасида бирнеча I'_{12},I''_{12},... токли параллел шохобчалар мавжуд бўлса, у ҳолда биринчи тенглама таркибида $I'_{12} + I''_{12} + \ldots$, иккинчисида $I'_{21} + I''_{21} + \ldots$, токлар қатнашган бўлар эди; юқоридаги исботлашнинг тартибида хеч ўзгариш бўлмас эди, чунки $I'_{12} + I'_{21} = 0$; $I''_{12} + I''_{21} = 0$;… .

Ушбу мулохазани ихтиёрий сонли тугунга эга бўлган занжирлар учун татбиқ этиш мумкин. Бунда, доимо мустақил тенгламалар сони тугунларнинг T сонидан биттага кичик бўлади. Шундай қилиб (1.12) ифоданинг тўғри эканлиги исботланган бўлади.

Мустақил контур тенгламалари сони. T тугунлари мавжуд бўлган хар қандай занжирда шундай шохобчаларни ажратиб кўрсатиш мумкин бўлсинки, бу шохобчалар бирорта берк контур ҳосил қилмасдан барча тугунларни ўзаро бирлаштирсин. Буни қуйидагича бажарамиз: икки тугунни бир шохобча билан бирлаштирайлик ва тугунларни 1 ва 2 билан белгилайлик (1.10,*б*-расм); сўнгра, 2 тугунни янги тугун билан боғлайлик, уни 3 билан белгилайлик, ва ҳ.к. Шу тариқа охирги тугун $n=T$ гача олиб борайлик. Бундай боғланиш 1.5-расмдаги схемада илгари келтирилган тўрт тугунли занжир учун келтирилган. Охирги тугунни 1 тугун билан бирлаштириб бўлмайди, чунки унда берк контур ҳосил бўлади.

Агар хар бир тугун бошқа барча тугунлар билан шохобчалар орқали уланса, тугунлар олдиндан ихтиёрий равишда номерланиб, сўнгра тугунлар кетма-кет уланиши мумкин (1 ва 2, 2 ва 3, ...,Т-1 ва Т).

Аниқки, бундай уланишда шохобчалар сони тугунлар сонидан албатта биттага кам бўлади; бу барча шохобчалар кетма-кет уланган, занжир берк бўлмайди. Бироқ, ихтиёрий бир жуфт тугунларга янги шохобчалар уланса, контур хосил бўлади, чунки шартга кўра барча тугунлар қандайдир шохобча билан улангандир.

Контур ҳосил қилмасдан шу йўсинда киритиш мумкин бўлган шохобчалар-дарахт шохобчалари дейилади, улар ҳосил қилган структура дарахт деб аталади.

Таърифга кўра, дарахтга киритилган хар қандай шохобча контурни ҳосил қилади (акс холда, бундай шохобча дарахт шохобчалари қаторига кирар эди). Ана шундай берк контур ҳосил қилувчи шохобчалар ватарлар (ёки кўприклар) деб аталади. Ватарлар 1.10,*б*-расмда пунктир чизиқлар билан кўрсатилган.

Дарахтга битта ватарни қўшиб, илгари қурилган бошқа бир шохобчани ташлаб юбориб, ҳосил бўлган берк контурни узиш мумкин. Бунда янги дарахт, яъни берк контурсиз занжир пайдо бўлади. Бироқ, ихтиёрий янги дарахтнинг шохобчалари сони ўзгаришсиз қолади, чунки хар гал янги бир ватар қўшилганда, айнан битта бошқа шохобчани ташлаб юбориш лозим.

Шохобча-ватарлар сони Х, шахобчалар сони Ш билан дарахтга кирувчи шахобчалар (Т-1) айирмасига тенг:

$$X = Ш - (T - 1).$$

Хар қандай шохобча-ватар киритилишидан ҳосил бўлган контур учун, Кирхгофнинг иккинчи қонунига асосан тенглама тузиш мумкин. Бунда, хар бир шунга ўхшаш тенглама бошқаларидан мустақилдир, чунки уларнинг хар бирига янги номаълум берк контури хосил қилувчи янги шохобча токи киради.

Демак, мустақил контур тенгламалари сони ватарлар сонига, яъни (1.3)га биноан *Ш-(Т-1)*га тенг. Шуни исбот қилиш зарур эди.

Кирхгоф тенгламалари тузилган контур, бошқа оддий контурлардан фарқланиши мумкин, чунки уларнинг хар бирида фақат биттадан ватарлар мавжуд. Бу қуйидаги мулоҳазадан аёнлиги кўринади: икки мустақил тенгламаларни ўзаро қўшиб, янги тенглама ҳосил қиламиз. Бу, ўз навбатида, қолган икки асосий тенгламалардан биринчиси ёки иккинчиси билан хамкорликда икки мустақил тенгламаларни ҳосил қилади. Мустақил тенгламаларнинг умумий сони ўзгармасдан қолади.

Эслатма. Тарқоқ бўлмаган занжирни чегараловчи икки тугунлари битта тугунга қўшилувчи (T=1) бир шохобчали (Ш=1) занжир деб қараш мумкин. Бундай занжирларучун ҳам K_1=T-1=0 ва K_2=$Ш$-(T-1)=1ифодалашни қўллаш мумкин. Дарҳақиқат, бундай занжиручун фақат битта контур тенгламасини тузиш мумкин. Ушбу фикрлар тугуннинг шохобча чегараси эканлиги ҳақидаги таърифга тўла мос келади.

Барча тугун тенгламаларининг хар бир контур тенгламаларига боғлик бўлмаслиги (улардан мустақиллиги) аёндир, чунки контур тенгламалари таркибида шохобчалар қаршиликлари ва э.ю.к.лари мавжуд бўлиб, тугун тенгламаларида улар қатнашмайди. Демак, тугун тенгламаларининг хар қандай чизиқли комбинациясидан контур тенгламаларини ҳосил қилиб бўлмайди. Бу эса, *занжирнинг тўла мустақил тенгламалари сони шохобчалар сонига тенг* эканлигини исботлайди. Демак агар қолган барча параметрлар берилган бўлса аниқланган тенгламалар тизими барча токларни аниқлаш учун етарлидир; ушбу ҳолат тенгламалар тизимининг тўлиқлигини таъкидлайди.

Юқорида келтирилган мустақил тенгламаларсони ҳақидаги барча мулоҳазалар, ток манбаси бор бўлганда ҳам ўз кучига эга, чунки ток манбаси эквивалент кучланиш манбаси билан алмаштирилиши мумкин. Бироқ, тугун тенгламаларининг ўнг томонида Кирхгофнинг биринчи қонуни таърифидагидек ток манбаларнинг токлари қатнашаяпти деб ҳисоблаб, юқоридаги мулоҳазаларни давом эттириш мумкин.

Суперпозиция (устлаш) принципи

Ушбу принцип чизиқли занжирлар учун қўлланганда шундай таърифланади: занжирнинг ихтиёрий шоҳобчасидаги токнинг миқдори, хар бир манбанинг алоҳида таъсири натижасида (бир манба таъсири кўрилаётганда қолгаларини йўқ деб ҳисоб) ушбу шаҳобчада ҳосил қилган токларнинг йиғиндисига тенг. Келтирилган таърифдан шуни кўриш мумкинки, кўрилаётган принципни мустақил амал қилувчи принцип деб аташ мумкин.

Э.ю.к. манбаларидан фақат биттаси таъсир этаётганда, барча бошқа манбаларнинг э.ю.к. лари ва ток манбаларининг токлари нолга тенг деб фараз қилинади. Кучланиш манбаларининг қисқичларида кучланишнинг йўқлиги улар клеммалари қисқа туташганлигига мос келади: ток манбалари бўлган шохобчаларда токнинг йўқлиги ушбу шохобча узилганидан дарак беради.

Агар манба ички қаршилик ва э.ю.к. эга бўлса, у ҳолда э.ю.к. нолга тенг деб фараз қилиб, унинг шохобчасида ички қаршиликни қолдириш зарур. Шунга ўхшаш, манба - ток манбаси ва унга уланган параллел ички қаршилиги бўлган шохобча сифатида берилган бўлса, ток манбаси шохобчасини узиб (яъни, *J*= 0 деб ҳисоблаб), ички қаршиликли параллел шохобчани қолдириш зарур.

Суперпозиция принципига асосан икки (ёки бирнеча) режим учун ҳисобни олиб бориш мумкин; бунда бир марта параметрлари $E_1^1;E_2^1;. ..;J_1^1...$ бўлган; манбалар таъсир этади; иккинчи марта эса $E_1^{11};E_2^{11};...;J_1^{11};J_2^{11}$;параметрли манбалар таъсир этади.

Агар I_1' ва I_1''; ; I_2' ва ….- токлар шу икки режимнинг токлари бўлса, у холда хақиқий режимнинг токларини аниқлаш учун ушбу икки режим токларини

$$I_1' + I_1'' = I_1;\; I_2' + I_2'' = I_2;\; . . . \qquad (1.35)$$

устлаш ёрдамида аниқлаш мумкин (агар қуйидагиларни қабул қилиш мумкин бўлса):

$$E_1' + E_1'' = E_1; \quad J_1' + J_1'' = J_1. \qquad (1.36)$$

Бунда штрихсиз қийматлар манбаларнинг хақиқий параметрларига мос келади.

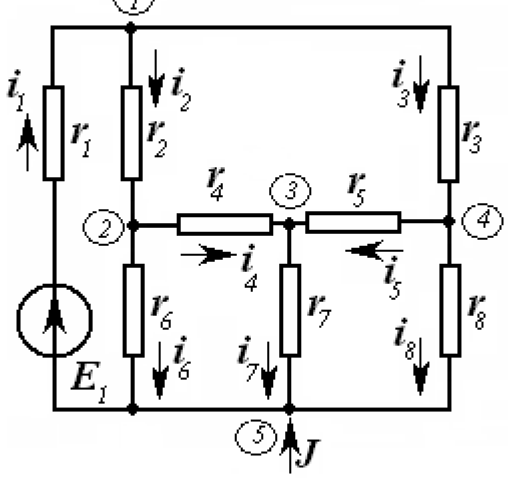
Ҳисоблаш ва таҳлил қилишнинг қулайлигига эришиш учун хар хил режимларда занжирнинг ихтиёрий қисмига, аслида мавжуд бўлмаган, шартли (сохта) манбаларни киритиш мумкин, бунда, фақат устлаш натижасида шартли манбаларнинг *ЭЮК* йиғиндиси ва токлар йиғиндиси нолга тенг бўлиши зарур.

Умумий ҳолда суперпозиция усулини қувватлар учун татбиқ этиб бўлмайди

$$P_1 \neq P_1' + P_1'',... \qquad (1.37)$$

чунки қувватлар токларнинг квадратик (ночизиқли) функцияларидир.

Суперпозиция усули билан биргаликда ушбу усул мураккаб занжирлар учун қўлланилиши мумкин. Занжирда ягона манба бўлса, хеч бўлмаганда битта тугунга учтадан кўп бўлмаган шохобча уланган, хамда



иккитагина шохобча берилиб, улар ёрдамида барча тугунлар потенциалларини ва барча шохобчалар токини аниқлаш мумкин бўлган ҳолатларда ушбу усулни қўллаш қулайликка олиб келтиради. Бу талабларни, масалан, 1.11-расмдаги занжир J =0 бўлганда қониқтиради. Аввал, *икки* шохобча токларини *ихтиёрийтанлаб* (масалан, 1.11- 1.11-расм
расмда r_2ва r_6шоҳобчалар токларини),
2-тугуннинг учинчи токини енгил аниқлаш, сўнгра Ом қонунига биноан бошқа ихтиёрий шоҳобча (масалан 1.11-расмдаги r_4ва х.к.) учун потенциаллар фарқини ҳисоблаш мумкин.

Барча ҳисоблашларни бажариш жуда осон, бироқ улар тезда бир-бирига зид натижаларга олиб келиши ҳам мумкин. Кирхгофнинг қонунларига зидликни (шартли) кучланиш манбаси $E'_Ш$ (ёки шартли $J'_Ш$ ток манбаси)ни киритиб бартараф этиш мумкин. Бунда, ҳисоблаш натижасида барча изланаётган токлар ва э.ю.к. лар аниқланади.

Натижада m-шохобчадаги токни аниқлаш мумкин;

$$I'_m = y_{m1}E'_1 + y_{mШ}E'_Ш \qquad (1.38)$$

бунда «1» индекс билан ҳақиқатдан хам манбаси бўлган шохобча қийматлари ва «Ш» билан Кирхгоф қонунларига зидликни бартараф этиш учун киритилган «шартли» манба қийматлари белгиланган.

Сўнгра, қайта ҳисоблаш бажарилади, бунда мазкур шоҳобчаларнинг ихтиёрий танланган токларига янги қийматлар берилади. Натижада манбаларнинг янги қийматлари билан янги режим токлари аниқланади;

$$I''_m = y_{m1}E''_1 + y_{mШ} \cdot E''_Ш . \qquad (1.39)$$

Токнинг икки қийматларидан бирини, айтайлик иккинчисини, $в$ коэффициентига кўпайтириб ва уларни қўшиб, қўйидагини ҳосил қиламиз;

$$I'_m + вI''_m = \bar{I}_m = y_{m1}\left(E'_1 + вE''_1\right) + y_{mШ}\left(E'_Ш + E''_Ш\right) \quad (1.20)$$

Шунга эътиборни қаратиш зарурки, барча тенгликларда y_{m1} ва $y_{mШ}$ коэффициентлар қийматлари номаълум бўлса хам улар бирхилдир.

Агар кўпайтувчи $в$ нинг қиймати шундай танланган бўлсаки, унда

$$E'_Ш + вE''_Ш = 0, \quad \text{яъни} \qquad (1.21)$$

$b = -E'_1 \; / E''_Ш$ бўлса, ундан аввалги тенглама

$$\bar{I}_m = y_{m1}\left(E'_1 + вE''_1\right) \qquad (1.22)$$

шаклга келади.

Кейинги тенгликдан y_{m1}ни аниқлаймиз, сўнгра m шохобчанинг берилган E_1 э.ю.к.ли ягон кучланиш манбаси бўлгандаги изланаётган токини аниқлаймиз;

$I_m = y_{m1} \cdot Э_1$. (1.23)

Ушбу ҳисоблаш усулини ўрганиш, юзаки қараганда, бироз мушкул бўлиб кўринса ҳам, у аслида жуда ҳам осон ва рақамли натижаларни тезкорлик билан олиш имконини беришига эьтибор қаратишни зарур деб ҳисоблаймиз.

Компенсация усули

Электр занжирларида I_v *токли ва* r_v *қаршиликли шохобча* (ёки шохобчанинг бир қисми)ни (1.12,*а*-расм) электр юритувчи кучи E_v га тенг бўлган ва қарама-қарши йўналган кучланиш манбаси билан алмаштириш мумкин;

$$E_v = r_v \cdot I_v \, . \qquad (1.24)$$

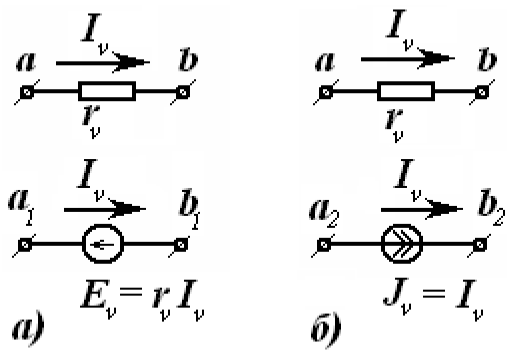
Бундай алмаштириш натижасида занжирдаги токларнинг тақсимланиши аввалгидек қолади, чунки ажратилган r_v шохобча занжирнинг бошқа қисмларига таъсири, фақат унинг учларидаги потенциаллар фарқи билан аниқланади:

$$U_{ав} = r_v \cdot I_v = E_v \qquad (1.25)$$

Келтирилган алмаштириш ККҚ (1.9,*а*) тенгламасидаги $r_v I_v$ ҳадини ўнг томонга ўтказишга мос келади;

$$\Sigma rI = \Sigma E - E_v \, . \qquad (1.26)$$

Бу тенгламанинг чап томонида, яъни rI кўпайтмалар йиғиндисида энди r_v қаршилиги қатнашмайди. Бундай алмаштиришда занжирнинг қолган қисмининг барча параметрлари ўзгармайди, шунингдек, тугун тенгламаларининг ёзилиши хам ўзгармайди.



1.8-расм

Аксинча, токларга нисбатан ечилган тенгламалар (1.5) тизимида бажарилган алмаштириш сабабли барча y_{ml} ва h_{mk} коэффициентлар хам ўзгариши мумкин, чунки энди улар r_v қаршилик нолга тенг бўлган холат учун аниқланадилар: бу қаршилик (1.26) тенгламаларнинг чап томонида қатнашмайди, балки *ЭЮК* нинг қийматида яширин холатда иштирок этади.

Хар қандай электр занжирида I_v *токли шохобчани ток манбаси билан алмаштириш мумкин* (1.8,*б*-расм):

$$J_v = I_v \qquad (1.26)$$

Кирхгоф тенгламалар тизимидан кўринадики, бундай алмаштиришда токлар занжирнинг барча қисмида тақсимланиши илгаригидек қолади.

Дарҳақиқат, тугун тенгламалари ўзларининг аввалги кўринишларини сақлаб қоладилар, фақатгина v шохобча билан боғланган тугунлар учун I_v қўшилувчига (ҳадга) берилган ток манбаси J_v сифатида қаралади. Контур тенгламалари энди бошқача тузилади. Улар таркибига энди v шохобча (ва демак r_v қаршилик ҳам) кирмайди. Уларни тузишда v шохобча узилган деб фараз қилинади. Бироқ контур тенгламалари сони тугун тенгламалари билан биргаликда тенгламалар тизимини ҳосил қилиб, барча бошқа шохобчалардаги токлар қийматларини аниқ ечиш учун етарли бўлади.

Электр занжирининг ихтиёрий шохобчасини кучланиш манбаси ёки ток манбаси билан алмаштиришни *компенсация принципи* дейилади. Шуни эътиборга олиш зарурки, занжирнинг бир қисмини ток ёки кучланиш манбалари билан алмаштирилганда, бундай манбанинг токи ёки *ЭЮК* ва қийматлари занжирнинг режимига боғлиқ бўлади.

Чизиқлилик принципи

Агар электр занжирида фақат ягона v шохобчасидаги *ЭЮК* дан ташқари барча манбалар кучланишлари, токлари ва шохобчалар қаршиликлари ўзгармас бўлса, у ҳолда суперпозиция принципи асосида (барча ўзгармас манбалар таъсирида) токнинг қиймати ўзгармас қийматлар ва ўзгарувчи E_v га пропорционал бўлган ҳаднинг йиғиндиси сифатида ифодаланади:

$$\left.\begin{array}{l} I_1=a_1+y_{1v}E_v; \\ I_2=a_2+y_{2v}E_v; \\ \text{-“-“-“-}(1.27) \\ I_v=a_v+y_{vv}E_v, \end{array}\right\}$$

бунда a_m , y_{mv} ўзгармас қийматлардир.

Тенглама (1.27)да ўзгарувчи E_v дан озод бўлиб, қуйидагини ҳосил қиламиз;

$$I_1=a_{1v}+b_{1v}I_v; \qquad (1.28)$$

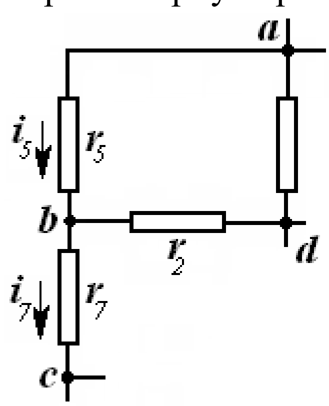
$$I_2=a_{2v}+b_{2v}I_v,$$

хамда

$$I_1=a_{12}+b_{12}I_2, \qquad (1.29)$$

бунда I_2 - барча параметрлари ўзгармас бўлган ихтиёрий шохобчадаги ток.

Қаршилик r_v нинг хар қандай ўзгаришларини эквивалент E_v*ЭЮК* билан алмаштириш мумкинлигидан фойдаланувчи компенсация принципини назарда тутиб, кейинги тенгламаларнинг янада умумийроқ таърифини бериш мумкин; улар (тенгламалар) шуни кўрсатадиларки, агар токлар ўзгариши фақат битта шохобча v параметрларининг (қаршилик ёки *ЭЮК*) ўзгаришига (ёки фақат битта манба токи J_v нинг ўзгаришига боғлиқ бўлса), у ҳолда барча токларнинг ўзгариши ўзаро оддий чизиқли



тенгламалар билан ифодаланишини кўрсатади. Буни, аксарият, *чизилилик принципи* дейилади.

(1.27) тенгламалар хар қандай кучланишлар

$U_p = l + mI_v$ (1.30)

учун ҳам чизиқлилик принципини таърифлашга имкон беради.

Дарҳақиқат, ихтиёрий тугунларни, масалан 1.9-расмдагиa ва c тугунларини бирлаштирувчи шохобчаларни таҳлил қилганимизда, кучланишнинг

$U_p = \varphi_a - \varphi_c = r_5 I_5 + r_7 I_7$ (1.31) 1.9-расм

га тенг эканлигини кўрамиз. Бироқ, занжирдаги хар бир токларни (шу жумладан I_5 ва I_7 ларни ҳам) (1.28) тенглама билан ифодалаш мумкин; унда r_5 ва r_7 лар ўзгармас бўлганда (1.31) тенглама ҳосил бўлади.

Икки кучланишни (масалан U_1 ва U_m ларни) шунга ўхшаш тенгламалар билан ифодалаб, иккаласида I_v дан халос бўлиб, шу икки кучланиш орасидаги боғланишни аниқлаш мумкин;

$$U_1 = s + t\,U_m, \qquad (1.31)$$

ва у хам чизиқли боғланишда бўлишини кўрамиз.

Шунга ўхшаш тарзда, бир шохобча токи I_n ва ихтиёрий танланган U_m кучланиш орасидаги чизиқли боғланишни ҳам аниқлаш мумкин;

$$I_n = f + k\,U_m\,. \qquad (1.32)$$

Чизиқлилик принципи электр занжирларини таҳлил қилиш ва ҳисоблашда катта аҳамиятга эга.

Чизиқли боғланишли тенгламаларнинг барча коэффициентлари ҳисоблаш ёки тажриба усуллари ёрдамида аниқланиши мумкин. Бунинг учун занжирнинг икки режими учун мазкур (I ёки U) қиматларни мавжуд бўлиши кифоядир. Аксарият, юксиз ишлаш ($I_0=0$) ва қисқа туташув ($U_{Қт}=0$) режимлари анча қулай бўлади. Бу икки режим учун $I_n=I_0$ токи ва $U=U_{Қт}$ кучланишини «*Юксиз*» ёки «0» ва «*Қт*» индекслари билан белгилашни қабул қиламиз.

Икки v ва w шохобчаларнинг параметрлари вариацияланганда (ўзгартирилиб турганда) мураккаброқ тенгламаларни ҳосил қилиш мумкин, аммо бундай ҳолат учун ҳам масалани қуйидагича ёзиш билан чизиқлилик принципини татбиқ этиш мумкин:

$$I_n = a + bI_v + cI_w\;. \qquad (1.33)$$

(1.30)-(1.33) ифодалардаги барча ток ва кучланиш коэффициентлари ҳам хар турдаги узатиш коэффициентларидир, масалан;

$$b_{12} = \partial I_1 / \partial I_2; \quad m = \partial U_p / \partial I_v\,. \qquad (1.34)$$

Юқорида келтирилган барча тенгламалардан фойдаланишда мусбат йўналиш танлашга қатъий эътиборни кучайтириш зарур, (1.35) тенгламада эса $\partial Z / \partial X$ ҳосила ва таърифга кўра, Z қиймати ортишининг X ортишига нисбати, эканлигини кўзда тутиш зарур. Чизиқли боғланишли ифодалар ёрдамида ток ва кучланишларни чекли ортишларини хам аниқлаш мумкин, масалан (1.31) ва (1.32) бўйича

$$\delta U_p = \frac{\partial U_p}{\partial I_v} \delta I_v ; \; \delta U_m = \frac{\partial U_m}{\partial I_\ell} \cdot \delta U_\ell \quad (1.35)$$

ёки (1.14)каби белгилашда:

$$\delta U_p = R_{pv} \delta I_v ; \; \delta U_m = d_{ml} \cdot \delta U_\ell \quad (1.36)$$

(1.33) ва (1.30) бўйича эса:

$$\delta I_n = k \delta U_m ; \; \delta I_n = b_{ak} \delta I_k ; \quad (1.37)$$

ёки (1.10) ва (1.11) каби белгилашда:

$$\delta I_n = y_{nl} \delta U_l ; \; \delta I_n = h_{nk} \delta I_k ; \quad (1.38)$$

(1.34) ифодада келтирилганидек, мураккаброқ вазиятда:

$$\delta I_n = \frac{\partial I_n}{\partial I_v} \cdot \delta I_v + \frac{\partial I_n}{\partial I_w} \delta I_w . \quad (1.39)$$

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 хисобланадиган 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	$I_{к2}$	$I_{кз}$
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	В	В	А	А
6	5	8	14	7	8	20	14	0	1

$I_{к2}$токлитокманбасиниЭЮКманбаигаалмаштирамизвауниE_2ЭЮКбиланқўшиб, $E_{2.0}$нитопамиз:

$$E_2 = I_{к2} \cdot R_2 = 0$$
$$E_{20} = E_2 + E_2' = 8\text{ В}$$

$I_{к3}$токли ток манбасини ЭЮК манбаига алмаштирамиз ва уни E_3 ЭЮК билан қўшиб, $E_{3.0}$ ни топамиз:

$$E_3' = I_{кз} \cdot R_3 = 8\text{ В}$$
$$E_{30} = E_3 + E_3' = 22\text{ В}$$

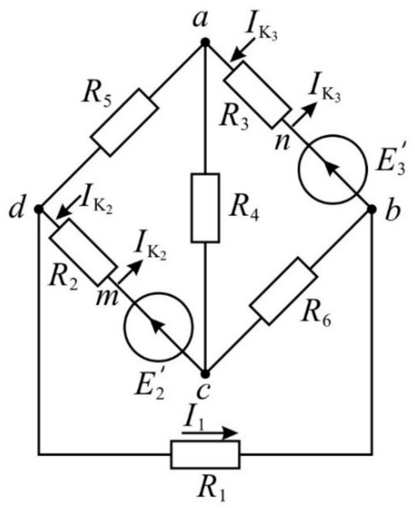
Энди схема 2.2-расмдаги холатга келади.

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

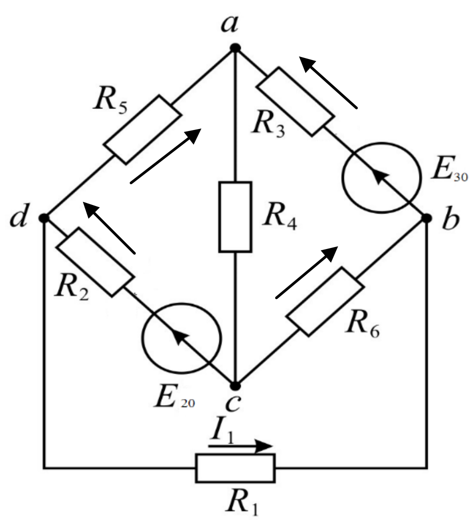
а) 2.2-расмдаги схема тармоқ токлари мусбат йўналишини ихтиёрий қўямиз.

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

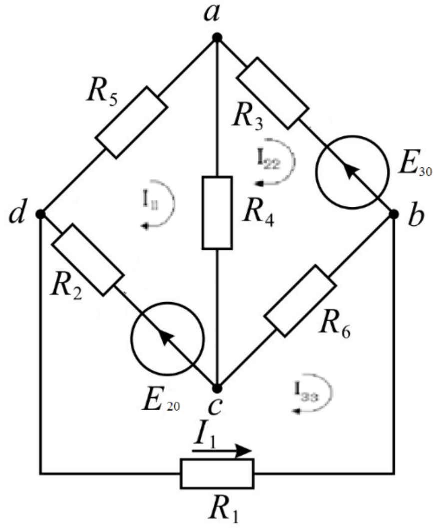
в) Кирхгофнинг 1-қонуни бўйича тугунлар сонидан битта сонга кам мустақил тенгламалар системасини тузамиз. Бизнинг схемада тугунлар сони 4 та, шунинг учун Кирхгофнинг 1-қонунига биноан 3 та тенглама тузамиз:



2.1-расм



2.2-расм



2.3-расм

«d» тугун учун $I_2 - I_5 - I_1 = 0$

«a» тугун учун $I_5 - I_4 + I_3 = 0$ (2.1)

«b» тугун учун $I_1 + I_6 - I_3 = 0$

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,

«acd» контур учун $I_5R_5 + I_4R_4 + I_2R_2 = E_{20}$

«acb» контур учун $-I_4R_4 - I_6R_6 - I_3R_3 = -E_{30}$ (2.2)

«dcb» контур учун $I_6R_6 - I_1R_1 - I_2R_2 = -E_{20}$

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

3. Электр занжирини контур токлари усули билан хисоблаш

Контур токлари усули билан схема тармоқ токларини аниқлаш учун 2.2-расмдаги схемани тармоқ токлари йўналишини кўрсатмаган холда 2.3-расмдаги кўринишда қайта чизамиз. Бу ерда хар бир мустақил контурда ўз контур токи оқади деб фараз қиламиз.

Дастлаб контур токлари учун тенгламалар тузиб, уларни биргаликда ечиб, сўнг контур токлари орқали тармоқ токларини аниқлаймиз.

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

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

Энди қуйидагича белгилаш киритамиз:

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

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

$$26X_1 - 14X_2 - 5X_3 = 20$$
$$-14X_1 + 30X_2 - 8X_3 = -22 \qquad (3.2)$$
$$-5X_1 - 8X_2 + 19X_3 = -20$$

$X_1 = -0{,}244$

$X_2 = -1{,}29$

$X_3 = -1{,}66$

Демак, $I_1 = I_{33} = -1{,}66$ А

$I_2 = I_{11} - I_{33} = 1{,}416$ А

$I_3 = I_{22} = -1{,}29$ А

$I_4 = I_{11} - I_{22} = 1{,}05$ А

$I_5 = I_{11} = -0{,}244$ А

$I_6 = I_{33} - I_{22} = -0{,}37$ А.

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

4. Электр занжирини тугун потенциаллари усули билан хисоблаш

Номаолум миқдор сифатида схема тугунларининг потенциаллари олиниб ва улар орқали электр занжирини хисоблаш тугун потенциаллари усули дейилади.

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

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

«d» тугун учун $I_2 - I_5 - I_1 = 0$

«a» тугун учун $I_5 - I_4 + I_3 = 0$

«b» тугун учун $I_1 + I_6 - I_3 = 0$

Бунда $I_1 = (\varphi_d - \varphi_b) g_1$

$$I_2 = [(\varphi_c - \varphi_d) + E_{20}] g_2$$

$$I_3 = [(\varphi_b - \varphi_a) + E_{30}] g_3$$

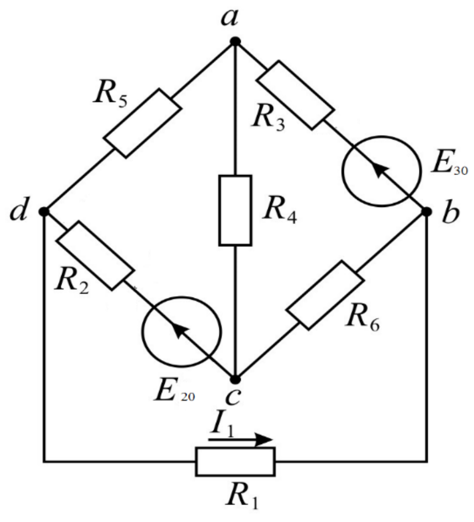
$$I_4 = (\varphi_a - \varphi_c) g_4$$

$$I_5 = (\varphi_d - \varphi_a) g_5$$

$$I_6 = (\varphi_c - \varphi_b) g_6$$

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

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



4-расм

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

$$\begin{aligned} &-0{,}44X_1 + 014X_2 + 0{,}1X_3 = 4 \\ &0{,}14X_1 - 0{,}335X_2 + 0{,}125X_3 = 2{,}75 \\ &0{,}1X_1 + 0{,}125X_2 - 0{,}35X_3 = -2{,}75 \end{aligned} \qquad (15)$$

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

$$X_1 = -14{,}042 \qquad (16)$$

$$X_2 = -14{,}586 \qquad (17)$$

$$X_3 = 1{,}36 \qquad (18)$$

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

$I_1 = I_{33} = -1{,}69$ A

$I_2 = 1{,}517$ A

$I_3 = -1{,}30$ A

$I_4 = 1{,}05$ A

$I_5 = 0{,}34$ A

$I_6 = 0{,}45$ A.

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

5. Хисоблаш натижаларини таққослаш ва хисоблаш аниқлигини бахолаш

Контур токлари ва тугун потенциаллари усуллари билан олинган хисоблаш 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	1,66	1,41	1,29	1,05	0,24	0,37
Тугун потенциаллари	1,69	1,51	1,30	1,05	0,34	0,45
Токларнинг ўртача қиймати	1,67	1,46	1,29	1,05	0,29	0,41

2-жадвалда келтирилган натижаларни солиштириш шуни кўрсатадики, хар икки усул билан хисобланган ток қийматлари амалда бир-бирига тенг, бу хисоблаш тўьри бажарилганлигини кўрсатади.

Хисоблаш аниқлигини бахолаш учун қувват балансини тузиш зарур. Бунда манбалар ва истеомолчилар қуввати алоъида хисобланади. Хисоблашда хар бир тармоқ токининг ўртача қиймати олинади.

а) ЭЮК манбалари бераётган қувват:

$$P_{\text{м}} = E_{30} I_3 + E_{20} I_2 = 57{,}82\text{Вт}$$

б) схемада истеомол қилинаётган қувват:

$$P_{\text{ист}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 = 49{,}21\text{Вт}$$

в) нисбий хатолик

$$\gamma = \frac{P_{\text{м}} - P_{\text{ист}}}{P_{\text{м}}} \cdot 100\% = 1{,}5\%$$

шуни кўрсатадики, бажарилган хисоблар етарли даражада тўьридир. Хатолик арифметик амалларни бажаришда вергулдан кейинги рақамларнинг чекланганлиги туфайли ҳосил бўлган. Хисоблашлардаги нисбий хатоликка 2% гача рухсат берилади.

Фойдаланилган адабиётлар

1. А.С.Каримов ва бошқалар “Электротехника ва электроника асослари”. Тошкент. “Ўқитувчи”. 1995й.
2. Ю.Г.Синдеев.“Электротехника с основами электроники”.Феникс. 2002 г
3. А.С.Каримов Назарий электротехника “ЎАЖБНТ” маркази, 2003.

Қўшимча

4. А.С.Каримов “Электротехника” масалалар тўплами ва тажриба ишлари. Тошкент, Ўқитувчи.1989й.
5. С.Мажидов “Электротехника” маълумотнома. Тошкент.Ўқитувчи.1994й.
6. А.И.Хонбобоев, Халилов. “Обшая электротехника с основами электроники”. “ЦПИУЛ” 2004г.
7. А.И.Хонбобоев “Умумий электротехника ва электроника асослари” Ўзбекистон 2000й.
8. В.А.Прянишников “Электротехника и ТОЭ” в примерах и задачах. Сан-Петербург. “Корона”. 2001г.
9. Алиев И.И. “Виртульная электротехника компютерных технологий в электротехнике и электронике”. Учебн. Пособ. М.Радио Софт, 2003г.
10. Данилов И.А. “Общая электротехника с основами электро-ники”. Учеб.пособ. для не электротехнических спец. М.ВШ.1989г.
11. А.С.Касаткин. “Электротехника асослари” М. Энергоато-миздат.1983г.
12. С.Мажидов “Электр машиналар ва электр юритма” Тошкент. Ўқитувчи 2002 й.
13. Фарберман Б.Л. ва бошқалар “Олий мактабда ўқитишнинг замонавий усуллари” Т. ОЎМММИ.2002й.
14. Интернет маълумотлари олиниши мумкин бўлган сайтлар: tstu_info@edu.uz,ferpi_info@edu.uz.