Электр занжирларда ўткинчи жараёнлар
Ўзлаштириладиган саволлар

Ўткинчи жараёнлар юзага келишининг сабаблари. Коммутация қонунлари. Ўткинчи жараёнларни ҳисоблашнинг классик усули. Резистор ва индуктив ғалтакдан ҳамда резистор ва конденсатордан иборат занжирларда ўткинчи жараёнлар. Резистор, конденсатор ва индуктив ғалтакдан иборат занжирдаги ўткинчи жараёнлар.

Шахобчаланган занжирдаги ўткинчи жараёнларни ҳисоблаш. Ўткинчи жараёнларни ҳисоблашнинг оператор усули. Оригинал ва тасвир. Ом ва Кирхгоф қонунларининг оператор шакли. Ёйиш теоремаси, занжирларда ўткинчи жараёнларни ҳисоблаш бошка усуллари.

Услубий маслаҳатлар

Бу бўлимнинг асосий мақсади ҳар хил сабабларга кўра ҳолати кескин ўзгарган электр занжирларда юзага келиши мумкин бўлган электромагнит жараёнларни тадқиқ қилишдан иборат. Бу жараёнлар жуда қисқа вақт давомида бўлишига қарамай, занжирнинг баъзи бир қисмларидаги кучланиш ва токлар бир неча марта ошиб кетиши натижасида электр ускуналарининг ишдан чиқишига олиб келиши мумкин.

Аввало, янги тушунчаларни билиб олинг. Эркин режим (ташқи манбасиз режим), турғун режим (ташқи манба таъсири натижасидаги барқарор режим) ва ўткинчи (ҳақиқий) режим. Шуни эсдан чиқармаслик керакки, кўп ҳолларда фақат ўткинчи ток ва кучланиш аниқ мавжуддир, уларнинг эркин ва турғун ташкил этувчилари эса ҳисоблашни қулайлаштириш учун киритилади.

Ўткинчи жараёнларни ҳисоблаш дифференциал тенгламани ечишдан иборат. Эркин ташкил этувчи бир жинсли тенгламанинг умумий ечимига, турғун ташкил этувчи эса унинг хусусий ечимига мос келади.

Шунинг учун эркин ташкил этувчи физик жиҳатдан ташқи манбага боғлиқ бўлмай, балки занжирнинг параметрлари ва тузилиши билан аниқланади. Шу билан бирга турғун ташкил этувчининг частотаси манба кучланишининг частотасига тенгдир. Турғун режимни ҳисоблаш учун аввал ўрганилган ўзгармас ва ўзгарувчи ток занжирларини ҳисоблаш усулларидан фойдаланилади.

Бу тушунчалар ўзлаштирилгандан кейин коммутациянинг биринчи ва иккинчи қонунларини ўрганинг. Улар ёрдамида коммутация пайтидаги бошланғич шартлар ёрдамида кучланиш ва ток қийматларини аниқлаш мумкин.

Ундан кейин кетма-кет уланган R ва L занжирдаги ўткинчи жараёнларни ўтганишга ўтинг. Бу занжир ўзгармас ток манбаига уланганда ундаги ток нолдан барқарор қийматигача ўзгаради. Актив қаршилик индуктив қаршиликка нисбатан қанча катта бўлса занжирдаги бу ўзгариш шунча тез ўтади. Агар бу занжир синусоидал кучланишга уланса, унда турғун ток амплитудасининг деярли икки бараварига тенг бўлган ток пайдо бўлиши мумкин.

R ва C кетма-кет уланган занжир ўзгармас кучланишга уланганда ток қиймати U/R дан нолгача камаяди, конденсатордаги кучланиш эса нолдан барқарор қийматигача ошади. Бу занжирда сиғим қаршилик актив қаршиликка нисбатан қанча кўп бўлса, ток ва кучланишнинг ўзгариши шунча тез бўлади. Бундай занжир синусоидал кучланишга уланганда, конденсатор қисмаларида тугун кучланиш амплитудасининг деярли икки бараварига тенг бўлган хавфли кучланиш пайдо бўлиши мумкин.

Юқоридаги масалаларни кўриб чиқиб, R, L ва C элементлардан иборат шахобчаланмаган занжирга ўтинг. Бундай занжирда эркин ташкил этувчининг характери фақат занжирнинг параметрлари билан аниқланади. Агар R нинг қиймати занжирнинг тўлқин қаршилигидан анча катта бўлса, у ҳолда апериодик жараён пайдо бўлади. Чунки актив қаршиликда нисбатан катта бўлган энергия сарфи содир бўлади. Энергиянинг сарфи жуда кам бўлган ҳолда, яъни R анча кичик бўлса, амалий жиҳатдан муҳим аҳамиятга эга бўлган тебранма жараён содир бўлади (занжир бунда тебраниш контурига айланади). Идеал ҳолатда тебранишлар сўнмас бўлсада реал контурларда эса улар сўнувчи бўлади. Кетма-кет уланган R, L ва C занжирда сўнувчи тебранишлар фақат конденсаторда, индуктивликда ёки конденсатор ва индуктивликда сақланган энергия ҳисобига пайдо бўлади.

Бунда контур ўзгармас кучланишга уланганда конденсаторда турғун кучланишнинг деярли иккиланган амплитудасига тенг кучланиш пайдо бўлади. Занжир синусоидал кучланишга уланганда тўрт ҳолат фарқ қилинади:

1. Тебраниш контурининг частотаси (ω_0) манба частотасидан (ω) катта, яъни $\omega_0>\omega$. Бу ҳолда занжирда хавфли зарб токи I_3 пайдо бўлиши мумкин:
$$I_3=I_m(1+\omega_0/\omega).$$
2. $\omega_0<\omega$. Бу ҳолда конденсаторда хавфли катта кучланиш пайдо бўлиши мумкин: $U_c=U_m(1+\omega/\omega_0)$.
3. $\omega_0=\omega$. Бу шарт бажарилганда конденсатордаги кучланиш ва занжирдаги ток ўзининг турғун қийматига зарб токсиз ва ўта кучланишсиз ўсиб боради. Лекин занжирдаги турғунлашган ток ва

конденсатордаги кучланиш анча катта бўлади, чунки контур бу пайтда кучланишлар резонанси режимида бўлади.

4. $\omega_0 \approx \omega$. Бу ҳолда амплитудаси даврий пульсацияланиб турадиган ўзига хос тебраниш юзага келади.

Юқорида айтилганларни ўзлаштирганингиздан кейин занжирдаги ўткинчи жараённи ҳисоблашга ўтинг. Бунда ҳисоблаш маълум бўлган уч усулдан бирида бажарилади: классик, оператор ёки Дюамель интеграли усули. Бу усуллар қуйидаги тўрт амални бажарилишини кўзда тутади:

1. Занжирдаги кучланиш ва токлар мусбат йўналишларини танлаб олиш.
2. Ток ва куланишларнинг коммутациягача бўлган қийматини аниқлаш.
3. Характеристик тенгламани тузиш ва унинг илдизларини аниқлаш.
4. кучланиш ва токлар ифодасининг вақт бўйича қонунини ёзиш.

Биринчи ва иккинчи бандлар махсус тушунтиришни талаб эмайди.

Классик усулни қўллаганда характеристик тенглама эркин ток ёки кучланишлар учун ёзилган дифференциал тенгламаларни алгебраик кўринишга келтириш йўли билан тузилади.

Мазкур усулнинг афзаллиги унинг универсаллигидир: у ҳар қандай мураккаб занжирлар учун ўринлидир. Усулнинг камчилиги: унинг мураккаблиги ва чалкашлигидир. Кўпчилик ҳолларда – бир манбага уланган кетма-кет, параллел занжир учун характеристик тенглама кўп жиҳатдан содда бўлган занжирнинг комплекс қаршилиги ифодаси ёрдамида характеристик тенглама тузилади.

Шуни алоҳида таъкидлаб ўтиш керакки, *R*, *L*, *C* занжирдаги ўткинчи жараёнлар характеристик тенгламанинг илдизларига боғлиқ. Агар бу илдизлар ҳақиқий ва ҳар хил бўлса ток (ёки кучланиш) ташкил этувчисини

$$1_{эрк} = A_1 e^{p_1 t} + A2 e^{p_2 t}$$

кўринишда, ҳақиқий ва бир хил илдизларда

$$1_{эрк} = (A_1 + A_2 t) e^{pt}$$

кўринишда, комплекс қўшма эса $1_{эрк}$ ифодаси

$$1_{эрк} = A e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + a)$$

кўринишда бўлиши керак.

Интеграллаш доимийлари (A_1 ва A_2 – биринчи ва иккинчи ҳолларда, A ва α – учинчи ҳолда) коммутация қонунларига кўра аниқланади. Улар шахобчалардаги токлар учун ҳар хил қийматга эга бўлади.

Классик усулнинг асосий камчилиги – занжир токлари ва кучланишларини аниқлашда дифференциал тенгламалар системасини ечиш кераклигидадир. Бундан ташқари интеграллаш доимийларини топиш учун алгебраик тенгламалар системасини ечиш керак.

Айтилган камчиликлардан оператор усули ҳолидир. Бу усул бўйича ўзгарадиган функция (оригинал)ни Лаплас алмаштириши ёрдамида комплекс ўзгарувчи p нинг функцияси билан алмаштиришга асосланган:

$$F(p)=\int_{0}^{\alpha} f(t)e^{-p1}dt$$

Лаплас алмаштириши қисқа шаклда ёзилиши ҳам мумкин:

$$f(t).$$

(-тасвирга ўтиш белгиси).

$f(t)$ функция ўрнига бизни қизиқтирган функцияларни қўйиб, уларнинг тасвирларини олишимиз мумкин:

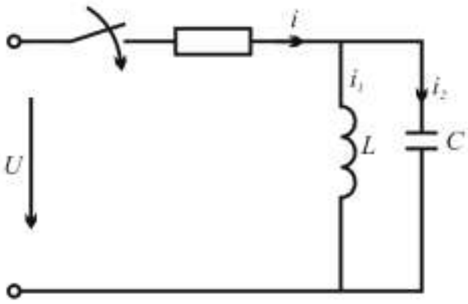
Оригинал	$i(t)$	$i(t)\cdot R$	$L\frac{di}{dt}$	$1/c\int i_c dt$	E	$Ee^{f\omega t}$
Тасвир	$I(p)$	$I(p)\cdot R$	$LpI_L(p)$- -$L1_L(0)$	$(I_c(p)/Cp$+ +$U_C(0)$/р	$\frac{E}{p}$	$\frac{E}{p-j\omega}$

(бошқа функцияларнинг тасвирлари адабиётларда келтирилган).

Бу ерда $i_L(0)$ ва $U_C(0)$ мос равишда коммутациягача ғалтакдаги ток ва конденсатордаги кучланиш. Шундай қилиб, оператор усули бошланғич шартларни автоматик равишда ҳисобга олади. Шунинг учун интеграллаш доимийларини аниқлаш учун алгебраик тенгламалар системасини ечиш талаб қилинмайди.

Оператор усулининг жиддий афзаллиги шундан иборатки, у ўткинчи режимда ишлаётган занжирни турғун режимда ишлаётган каби ҳисоблаш имконини беради.

Намуна мисолида 21-расмда келтирилган занжирнинг шахобчаланмаган қисмидаги ўткинчи токни ҳисоблашни кўрсатамиз. Бунда: $U=100$ В, $R=100$ Ом, $L=267$ мГн, $C=5$ мкФ.



21-расм

1. Классик усул

1. Занжирнинг комплекс қаршилиги орқали унинг характеристик тенгламасини тузамиз:

$$\underline{Z} = R + \frac{j\omega L \cdot (1/\,j\omega c)}{j\omega L + 1/\,j\omega c}.$$

$j\omega$ ни p билан алмаштириб занжирнинг оператор қаршилигини ёзамиз:

$$\underline{Z}(p) = R + \frac{pL \cdot \frac{1}{pC}}{pId\,\frac{1}{pC}} = R + \frac{pL}{p^2IC + 1} = \frac{p^2RIC + pL + R}{p^2IC + 1}.$$

Занжирнинг оператор қаршилигини нолга тенглаб характеристик тенгламани ҳосил қиламиз, яъни:

$\underline{Z}=0$, $p^2RIC+pL+R=0$ ёки киматларини койиб p^2 олдидаги коэффициентга бӯламиз.

$$p^2 \cdot 133{,}3 \cdot 10^0 + p \cdot 0{,}267 + 100 = 0.$$

$$p^2 + 2 \cdot 10^2 p + 0{,}75 \cdot 10^0 = 0$$

Характеристик тенгламанинг илдизлари:

$$P_{1,2} = -10^2 \pm \sqrt{10^6 - 0{,}75 \cdot 10^6} = -10^2 \pm \sqrt{0{,}25 \cdot 10^6} = -10^3 \pm 0{,}5 \cdot 10^3$$

$$P_1 = -500\frac{1}{C}, \qquad P_2 = -1500\frac{1}{C}$$

2. Ток ва кучланишлар оний қийматлари ифодаларини тузамиз. Занжирнинг характеристик тенгламаси иккинчи даражали бўлганлиги учун мос бўлган дифференциал тенглама ҳам иккинчи даражали бўлади. A_1 ва A_2 интеграллаш доимийларини аниқлаш учун коммутация қонунлари асосида бериладиган бошланғич шартлардан фойдаланамиз. Коммутациянинг биринчи қонуни индуктив ғалтакдаги i_1 токка, иккинчиси эса конденсатордаги кучланиш u_c га тегишли. Шунинг учун ҳам i_1 ток ва u_c кучланиш учун тенгламаларни ёзиш керак:

$$t_{1эрк} = A_1e^{-500t} + A_2e^{-1500t}. \quad t_{1TYP} = \frac{U}{R} = 1A.$$

$$t_1 = t_{1TYP} + 1_{2эрк} = 1 + A_1e^{-500t}. \quad A_2e^{-1500t}.$$

$$u_L = u_C = L\frac{dt_1}{dt} = 0{,}67(-500)A_1e^{-500t} + 0{,}267(-1500) \cdot$$

$$\cdot A_2e^{-1500t} = -133{,}3A_1e^{-500t} - 400A_2e^{-1500t}B.$$

$$i_2 = C\frac{du_c}{dt} = 5 \cdot 10^{-6}(-133{,}3)A_1(-500)e^{-500t} + 5 \cdot 10^{-6}(-400) \cdot$$

$$\cdot A_2(-1500)e^{-1500t} = 0{,}333A_1e^{-500t} + 3A_2e^{-1500t}A.$$

$$i = i_1 + i_2 = 1{,}333A_1e^{-500t} + 4A_2e^{-1500t} + 1A.$$

3. Интеграллаш доимийларини аниқлаймиз. Коммутациягача i_1 ва u_0 ларнинг қийматлари нолга тенг, чунки занжир коммутацияга қадар

манбадан ажралган ҳолда турибди. Ток ва кучланишларнинг коммутациядан бевосита кейинги қийматларини топиш учун юқорида ёзилган тенгламаларга қўямиз. Коммутациянинг биринчи ва иккинчи қонунларидан фойдаланиб, қуйидагиларни ҳосил қиламиз:

$$t_1(0)=0=A_1+A_2+1.$$

$$u_c(0)=0=-133{,}3A_1-400A_2.$$

Бундан

$$\begin{cases} A_1 + A_2 = -1. \\ -133{,}3A_1 - 400A_2 = 0. \end{cases}$$

Системани биргаликда ечиб, $A_1=-1{,}5$, $A_2=0{,}5$. Изланаётган токларни топамиз. $t=-2e^{-500t}+2e^{-1500t}+1A$.

II. Оператор усули

Юқорида айтиб ўтилгандек, коммутациядан аввал ғалтакдан ўтадиган ток ва конденсатордаги кучланиш нолга тенг. Шунинг учун ток тасвирининг ифодаси Ом қонун бўйича қуйидагича ёзилади:

$$I(p)=U(p)/Z(p).$$

Ўзгармас кучланишнинг тасвир функцияси: $U(p)=U/p$ га тенг.

Занжирнинг оператор қаршилиги $Z(p)$ классик усул билан ҳисоблаганда тузилган эди:

$$Z(p)=\left(p^2RIC+pL+R\right)/\left(p^2IC+1\right)$$

Унда $I(p)=\left[U\left(p^2IC+1\right)\right]/\left[p\left(p^2RIC+pL+R\right)\right]$

Кийматларни кўйиб, куйидагиларни оламиз.

$$I(p)=\frac{100\left(p^2\cdot 0{,}267\cdot 5\cdot 10^{-0}+1\right)}{p\left(p^2 133{,}3\cdot 10^{-6}+p\cdot 0{,}267+100\right)}=\frac{100\left(p^2\cdot 1{,}333\cdot 5\cdot 10^{-6}+1\right)}{p\left(p^2 133{,}3\cdot 10^{-6}+p\cdot 0{,}267+100\right)}=$$

$$=\frac{100\cdot 1{,}333\cdot 10^{-6}\left(p^2+0{,}75\cdot 10^{-6}\right)}{p\cdot 133{,}3\cdot 10^{-6}\left(p^2+2\cdot 10^{-6}p+0{,}75\cdot 10^{6}\right)}=\frac{p^2+0{,}75\cdot 10^{6}}{p\left(p^2+2\cdot 10^{2}p+0{,}75\cdot 10^{6}\right)}=\frac{G(p)}{H(p)}$$

Кўриниб турибдики, ток ифодаси p ўзгарувчили иккита функциянинг нисбатига тенг бўлиб, $H(p)$ кўп хаднинг даражаси $G(p)$ кўп хаднинг даражасидан катта, яъни $I(p)$ тўғри касрдир.

t токи оригиналини топиш учун ёйиш формуласидан фойдаланамиз. Шу мақсадда аввал махраж илдизларини топиш керак бўлади. Классик усулда ҳисобланган икки илдизларга $P_1=-500\ 1/c$, $P_2=-1500\ 1/c$, учинчи илдиз $P_э=0$ қўшилди.

Махражда нол илдиз бўлгани учун ток ифодасида мажбурий ташкил этувчи бўлади.

Энди махражнинг ҳосиласини топамиз

$$H'(p)=3p^2+4\cdot 10^3p+0{,}75\cdot 10^6$$

G(*p*) ва *H`*(*p*) ифодаларига илдизларнинг қийматини қўйиб мос равишда *G*($p_к$) ва *H`*($p_к$) ларни ҳисоблаймиз:

$$H'(P)=3p^2+4\cdot10^3P+0{,}75\cdot10^6$$
$$G(p_1)=G(-500)=(-500)^2+0{,}75\cdot10^6=10^6.$$
$$H'(p_1)=H'(-500)=3(-500)^2+4\cdot10^2(-500)+0{,}75\cdot10=-0{,}5\cdot10^6.$$
$$G(p_2)=G(-500)=(-500)^2+0{,}75\cdot10^6=3\cdot10^6.$$
$$H'(p_2)=H'(-1500)=3(-500)^2+4\cdot10^2(-1500)+0{,}75\cdot10=1{,}5\cdot10^6.$$
$$G(p_3)=G(0)=0{,}75\cdot10^6; \qquad H'(p_2)=H`(0)=0{,}75\cdot10^6.$$

Ёйиш формуласидан фойдаланиб:

$$i=\Sigma\frac{G(p_k)}{H`(p_k)}e^{P_kt}=\frac{G(p_1)}{H`(p_1)}e^{P_1t}+\frac{G(p_2)}{H`(p_2)}e^{P_2t}+\frac{G(p_3)}{H`(p_3)}e^{P_3t}=$$
$$=\frac{10^6}{0{,}5\cdot10^6}e^{-500t}+\frac{3\cdot10^6}{1{,}5\cdot10^6}e^{-1500t}+\frac{0{,}75\cdot10^6}{0{,}75\cdot10^6}e^{0t}$$

ёки охирги кўринишда

$$t=-2e^{-500t}2e^{-1500t}+1A.$$

Бу масалани комплекс қўшма илдизлар учун ишлаб кўрсатамиз.

U=100 В, R=100 Ом, L=40 мГн, C=5 мКф.

I.Классик усул

Олдинги масаладек $\underline{Z}(p)=\left(p^2RIC+pL+R\right)/\left(pLC+1\right)$, чунки занжирнинг тузилиши ўзгармайди. Характеристик тенглама аввалги кўринишга эга:

$$p^2RIC+pL+R=0$$

Сон қийматларни қўгандан кейин, қуйидагини ҳосил қиламиз

$$p^2\cdot10^2\cdot4\cdot10^{-2}\cdot5\cdot10^{-6}+p\cdot4\cdot10^{-2}+100=0 \quad \text{ёки}$$
$$p^2\cdot2\cdot10^{-5}+p\cdot4\cdot10^{-2}+100=0,$$
$$p^2+2\cdot10^2p+5\cdot10=0, \quad \text{бунда}$$
$$p_{1,2}=-10^2\pm\sqrt{10^6-5\cdot10^6}=-1000\pm j200=2240e^{\pm j116^\circ30`}\frac{1}{C}.$$

Илдизлар компрлекс – қўшма бўлгани учун t_1 токнинг эркин ташкил этувчисини $i_{1эрк}=Ae^{-1000t}\cdot\sin(2000t+\alpha)$ кўринишида излаймиз.Бу токни турғун ташкил этувчиси $i_{1тур}=U/R=1A$ га тенг.

Умуман олганда ток i_1 ифодаси қуйидагича кўринишда бўлади:

$$i_1=Ae^{-1000t}\cdot\sin(2000t+\alpha)+1A.$$

Ҳисоблашнинг кейинги босқичларини олдинги масаладек олиб борамиз:

$$U_L = u_c = L\cdot di_1/dt = 4\cdot 10^{-2} A\left[-1000e^{-1000t}\sin(2000t+\alpha)+e^{-1000t}\cdot 2000\cdot\cos(2000t+a)\right]$$

$$= 40Ae^{-1000t}\sin(2000t+C)+80Ae^{-1000t}\cos(2000t+a)B.$$

$$i_2 = C\cdot cu_C/dt = 5\cdot 10^6(-40A)\left[-1000e^{-1000t}\sin(2000t+a)+2000e^{-1000t}\cdot\cos\cdot(2000t+a)\right]$$

$$+5\cdot 10^{-6}\cdot 70A\left[-1000e^{-1000t}\cdot\cos(2000t+a)-e^{-1000t}\cdot 2000\cdot\sin(2000t+a)\right]=$$

$$=0{,}2Ae^{-1000t}\sin(2000t+a)-0{,}4Ae^{-1000t}\cos(2000t+a)-0{,}4Ae^{-1000t}\cos(2000t+a)-$$

$$-0{,}8Ae^{-1000t}\sin(2000t+a)=-0{,}6Ae^{-1000t}\sin(2000t+a)-0{,}8AAe^{-1000t}\cos(2000t+a).$$

$$i=i_1+i_2=0{,}4Ae^{-1000t}\sin(2000t+a)-0{,}8Ae^{-1000t}\cos(2000t+a)+1.$$

Коммутациянинг биринчи ва иккинчи қонунларига биноан:

$$t_1(0)=0=A\sin a+1,$$

$$u_c(0)=0=-40A\sin+80A\cos a.$$

Биринчи тенгламадан $A\sin a=-1$ иккинчисидан $40A\sin a=80\cos a$ ҳосил қиламиз. Учта тенгламаларни биргаликда ечиб

$$A=-1{,}12,\quad a=63°30`$$

ҳосил қиламиз ва натижада $i=-0{,}448e^{-1000t}\sin(2000t+63°30`)+0{,}869e^{-1000t}\cos\cdot(2000t+63°30`)+1A.$

Олдинги формулани одатдаги кўринишга келтириш мақсадида ўнг томондаги биринчи ва иккинчи хадларни битта катталикка бўламиз ва

$$\frac{0{,}448}{\sqrt{0{,}448^2+0{,}869^2}}=\cos\phi.\qquad \frac{0{,}896}{\sqrt{0{,}448^2+0{,}869^2}}=\sin\phi.$$

белгиларни қўйиб, қуйидагини ёзишимиз мумкин:

$$\phi=\arccos 0{,}448=\arcsin 0{,}896=63°30`.$$

Юқоридаги қийматларни охирги тенгликка қўйиб, уни қуйидаги шаклда ёзамиз:

$$i=\left[-\sin(2000t+63°30`)\cos 63°30`+\cos(2000t+63°30`)\cdot\sin 63°30`\right]\cdot e^{-1000t}+1A.$$

Квадрат қавсдаги ифодани тригонометрия қоидаларига кўра ўзгартириб, натижада қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$i=1-e^{-1000t}\sin 2000t\quad A.$$

II. Оператор усули

$$I(p)=\frac{U(p)}{Z(p)}=\frac{U\left(p^2 IC+1\right)}{p\left(p^2 RIC+pL+R\right)}=\frac{100\left(p^2 4\cdot 10^{-2}\cdot 5\cdot 10^{-6}+1\right)}{p\left(p^2\cdot 10^2\cdot 4\cdot 10^{-2}\cdot 5\cdot 10^{-6}+p\cdot 4\cdot 10^{-2}+100\right)}=$$

$$=\frac{100\left(2\cdot 10^{-7}\cdot p^2+1\right)}{p\left(2\cdot 10^{-5}p^2+4\cdot 10^{-2}p+100\right)}=\frac{100\cdot 2\cdot 10^{-7}\left(p^2+5\cdot 10^6\right)}{p\cdot 2\cdot 10^{-5}\left(p^2+2\cdot 10^3 p+5\cdot 10^6\right)}=$$

$$=\frac{p^2+5+10^6}{p\left(p^2+2\cdot 10^2 p+5\cdot 10^6\right)}=\frac{G(p)}{H(p)}.$$

$$P_1=0.\quad P_2=-1000+j2000=2240e^{j116°30`}1/c.$$

$$P_3=-1000-j2000=2240e^{-j116°30`}1/c.$$

$$H`(p)=3p^2+4\cdot 10^2 p+5\cdot 10^6;\quad G(p_1)=5\cdot 10^6;\quad H`(p_1)=5\cdot 10^6.$$

$$G(p_2)=\left(2{,}24\cdot 10^3 e^{j116°30`}\right)+5\cdot 10^6=5\cdot 10^6 e^{j232°}+5\cdot 10^6=(-3-j4+5)\cdot 10^6=$$

$$(2-4j)10^6=4{,}48\cdot 10^6 e^{j116°30`}.$$

$$H`(p_2)=3\cdot 5\cdot 10^6 e^{j233°}+4\cdot 10^2\cdot 2{,}24\cdot 10^3 e^{j116°30`}+5\cdot 10^6=(-9-j12-4+j8+5)\cdot 10^6=$$

$$=(-8-j4)\cdot 10^6=-8{,}96\cdot 10^6 e^{j26°30`}.$$

p_2 ва p_3 – қўшма комплекслар бўлгани учун $G(p_2)$ ва $G(p_3)$.

$H`(p_2)$ ва $h`(p_3)$ ҳам қўшма комплекс бўлади, шунинг учун

$$G(p_3)=4{,}4{,}8\cdot 10^6\cdot e^{j63°30`},\quad H`(p_3)=-8{,}96\cdot e^{-j26°30`}.$$

t токни ёйиш формуласидан аниқлаймиз:

$$t=\Sigma\frac{G(p_k)}{H`(p_k)}\cdot e^{p_k t}=\frac{5\cdot 10^6}{5\cdot 10^6}+\frac{4{,}48\cdot 10^6 e^{-j63°30`}}{-8{,}96\cdot 10^6 e^{j26°30`}}\cdot e^{-1000t+j2000t}+$$

$$+\frac{4{,}48\cdot 10^6 e^{-j63°30`}}{-8{,}96\cdot 10^6 e^{j26°30`}}\cdot e^{-1000t+j2000t}=1-0{,}5e^{-1000t}\cdot e^{j2000t}-0{,}5e^{-j90°}\cdot$$

$$\cdot e^{-1000t}\cdot e^{j2000t}=1-0{,}5e^{-1000t}\cdot\left[e^{j(2000t-90°)}+e^{-j(2000t-90°)}\right]A.$$

Эйлер формуласига кўра *$e^{ja}+e^{-ja}=2\cos a$*, унда *$a=2000t-90^o$* белгилаб, қуйидагиларни оламиз:

$$i=1-e^{-1000t}\cos(2000t-90°)\ \ A.$$

лекин *$\cos a=\sin(90^o+a)$* бўлгани учун, бу формулани ихчам шаклда ёзиш мумкин:

$$i=1-e^{-1000t}\cos(2000t-90°)\ \ A.$$

Ўз-ўзини текшириш саволлари

1. Коммутациянинг биринчи ва иккинчи қонунларига таъриф беринг ва исботланг.
2. Ўткинчи жараённинг эркин ва турғун ташкил этувчилари нимани билдиради?
3. *R* ва *L* кетма-кет уланган занжирлардаги ўткинчи жараёнларни баён этинг. Вақт доимийси нима? У қандай бирликда ўлчанади?

4. Шахобчаланмаган *R, L, C* занжирда қандай шарт бажарилганда апериодик ва тебранма жараёнлар пайдо бўлади. Бу ҳолларда ўткинчи жараённи эркин ташкил этувчиси қандай аниқланади?
5. Бундай занжир ўзгармас ёки синусоидал кучланишга уланганда нималар содир бўлади?
6. Занжирлар характеристик тенгламасини қандай усуллар билан тузиш мумкин. Бу усулларни афзалликлари ва камчиликлари нимадан иборат?
7. Ўткинчи жараёнларни ҳисоблашнинг оператор усулини баён этиб беринг. Лаплас алмаштириши нима? Оператор шаклда ток ва кучланишлар қандай ифодаланид? Ом ва Кирхгоф қонунларини оператор шаклида ёзинг.