

Қ.И.СӘТБАЕВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

Электротехника кафедрасы

2-Дәріс. Электр тізбектеріндегі өтпелі үрдістер

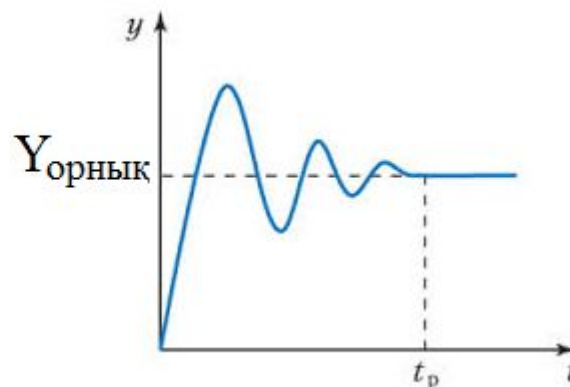
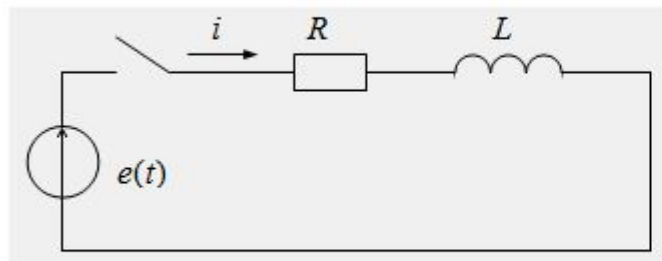
Электротехника кафедрасының аға оқытушысы, т.ғ.к. Абдықадыров А.А.

Алматы 2015

2.1 Электр тізбектеріндегі өтпелі үрдістер. Негізгі ұғымдар мен анықтамалар. Коммутация заңдары.

Электр тізбектерінің бұған дейінгі қарастырған режимдері орныққан режимдерге жатады. Орныққан режим деп – электр тізбегіндегі ток пен кернеудің қалыптасқан режимін айтамыз. Орныққан режим ЭҚК ұзақ уақыт жұмыс істегеннен кейін қалыптасады, сондықтан оны еріксіз режим деп те атайды. Еріксіз режим қорек көздері сөндіріліп, қайта қосылған кезде немесе R,L,C – элементтер өзгерген кезде пайда болады, сондықтан ток пен кернеу лезде орнықпайды.

Тізбекте коммутация мезетінен бастап өтпелі үрдіс байқалады да, ол қандайда бір уақыт интервалынан соң еріксіз режиммен алмасады.



Тізбекте коммутация мезетінен бастап өтпелі үрдіс басталады да, ол қандайда бір уақыт интервалынан соң еріксіз режимге ауысады.

Өтпелі үрдістер сыйымдылық пен индуктивтілік бар тізбектерде пайда болады, өйткені конденсатордың астарларында электр энергиясы жинақталады (электр өрісі),

$$W_C = \frac{CU^2}{2}$$

ал орауыштың айналасында магнит өрісі жинақталады.

$$W_L = \frac{LI^2}{2}$$

Энергияның жинақталуы лезде жүрмейді, сондай-ақ жинақталған энергия лезде жоғалып кете алмайды.

Тізбектегі ток пен кернеудің секірмелі өзгерісін еркін режимі деп атаймыз.

Сонымен, өтпелі үрдіс барысындағы нақты ток пен кернеуді еркін және еріксіз токтарды қосу арқылы алға болады.

$$i = i_{\text{еріксіз}} + i_{\text{еркін}}$$

$$u = u_{\text{еріксіз}} + u_{\text{еркін}}$$

2.2 Коммутация заңдары.

Коммутацияның бірінші заңы. *Индуктивтіліктегі ток секірмелі түрде өзгере алмайды немесе коммутациядан кейінгі моменттегі токтың мәні, коммутацияға дейінгі моменттегі мәнге ие болады.*

$$i_L(0_-) = i_L(0_+)$$

Коммутацияның екінші заңы. Сыйымдылықтағы кернеу секірмелі түрде өзгере алмайды немесе коммутациядан кейінгі моменттегі сыйымдылықтағы кернеудің мәні, коммутацияға дейінгі моменттегі мәнге ие болады.

$$U_C(0_-) = U_C(0_+)$$

2.3 R,L бірізді жалғанған элементтерді тұрақты кернеуге қосу.

Уақыт тұрақтысы.

Тізбекті қосқаннан кейінгі пайда болатын өтпелі үрдісті талдау.

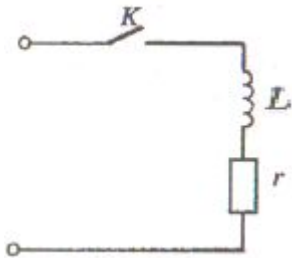
Тізбек қосылғанша онда ток болмады. Сондықтан индуктивтілігі бар тізбекті қосу моментінде ($t=0$ болғанда) коммутацияның бірінші заңы бойынша тәуелсіз бастапқы теңдеудің түрі:

$$i_L(0_-) = i_L(0_+)$$

Өтпелі үрдістен соң Ом заңы бойынша орныққан режимнің тоғы:

$$i_{op} = \frac{U}{r}$$

Өтпелі үрдіс кезіндегі тізбектегі теңдеуді Кирхгофтың екінші заңы бойынша құрамыз.



$$e = u_R + u_L \text{ немесе } e = R \cdot i + L \frac{di}{dt}$$

Өтпелі үрдістен кейін орныққан режимдегі теңдеудің түрі:

$$e = u_{Rop} + u_{Lop} \text{ немесе } e = R \cdot i_{op} + L \frac{di_{op}}{dt}$$

Мұндағы i_{op} - лездік токтың орныққан мәні. Сонда

Сонда,

$i - i_{op} = i_{еркін}$ екенін ескереміз.

$$UR - UR_{op} = UR_{еркін}$$

$$U_L - U_{Lop} = U_{Lеркін}$$

Мынандай теңдеуді аламыз:

$$0 = Ri_{еркін} + L \frac{di_{еркін}}{dt} \text{ теңдеуді } R\text{-ге бөлеміз.}$$

$$i_{еркін} = -\frac{L}{R} \cdot \frac{di_{еркін}}{dt}$$

$$\frac{L}{r} = \tau \left[\frac{\Gamma_H}{OM} = \frac{OM \cdot c}{OM} = c \right] - \text{уақыттың тұрақтысы.}$$

$$i_{еркін} = -i \frac{di_{еркін}}{dt}$$

Бұл өрнектен айнымалыларды бөлейік:

$$\frac{di_{еркін}}{i} = \frac{dt}{\tau}$$

Осы өрнекті интегралдайық:

$$\ln i_{\text{еркін}} = -t / \tau + c$$

Мұндағы с-интегралдың тұрақтысы оны натурал логарифм ретінде жаңа тұрақтымен k – деп беруге болады.

$$\ln i_{\text{еркін}} = -t / \tau + \ln k$$

$$\ln i_{\text{еркін}} - \ln k = -\frac{t}{\tau}; \quad \text{бұдан}$$

$$\ln \frac{i_{\text{еркін}}}{k} = -\frac{t}{\tau},$$

$$\frac{i_{\text{еркін}}}{k} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{немесе} \quad i_{\text{еркін}} = k e^{-\frac{t}{\tau}}$$

k – тұрақтысын бастапқы шарттардан табамыз.

$t(0); i(0) = i_{\text{ор}}(0) + i_{\text{еркін}}(0) = 0$ – коммутацияның бірінші заңы бойынша.

$$i_{\text{еріксіз}}(0) = I = \frac{U}{R}$$

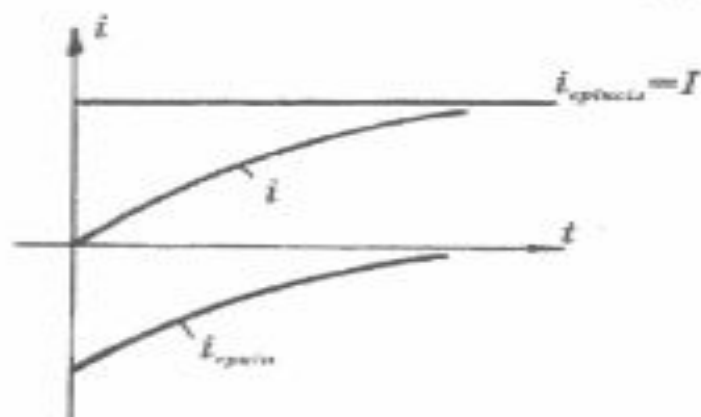
$$i_{\text{еркін}}(0) = ke^{-\frac{0}{\tau}} = k = -i_{\text{ор}} = -I$$

бұдан, $k = -I$ және еркін ток $\frac{i_{\text{еркін}}}{k} = Ie^{-\frac{t}{\tau}}$

өтпелі процестің тогы:

$$i = i_{\text{ор}} + i_{\text{еркін}} = I - Ie^{-\frac{t}{\tau}} = I(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Тәуелділік графигін тұрғызайық $i = f(t)$



Өтпелі процестің уақыты неге тәуелділігін анықтайық

$t = \tau$ делік,

$$i_{\tau} = I(1 - e^{-1}) = I\left(1 - \frac{1}{2,718}\right) \approx 0,63 \cdot I$$

яғни ток нөлден I -дің 63% -на дейін өседі.

$t = 3\tau$ -дан соң

$$i_{3\tau} = I(1 - e^{-3}) = I\left(1 - \frac{1}{2,718}\right) = I\left(1 - \frac{1}{20}\right) = 0,95 \cdot I$$

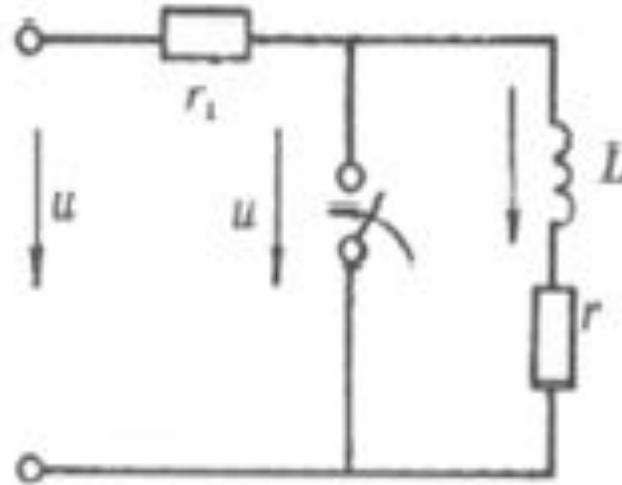
Егер ток еріксіз токтан 1% -ға ерекшеленсе, яғни ток 99% -ға жетсе, онда өтпелі процесс аяқталды деп саналады.

Ол кезде $t = 4,6\tau = 4,6 \frac{L}{r}$ болады.

Сонымен, өтпелі процестің уақыты тізбектің r және L параметрлеріне тәуелді және индуктивтіліктің өте аз мәнінде еріксіз режим миллисекундтен кейін орнауы мүмкін.

R,L – ЭЛЕМЕНТТЕРІ БАР ТІЗБЕКТІҢ ҚЫСҚА ТҰЙЫҚТАЛУЫ МЕН АЖЫРАУЫ

I. Егер индуктивтілігі L және кедергісі r бар тізбек тұрақты кернеу көзіне қосылса, онда қысқа тұйықталуда ондағы ток лезде жоғалмайды (r_1 кедергі



көздің қысқа тұйықталуын болдырмайды). Ол өздік индукция ЭҚК-мен біраз уақыт ұсталынады.

$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

ЭҚК-тің бағыты тұйықталудағыға дейінгі токтың i бағытымен бірдей, өйткені

$$\frac{di}{dt} < 0$$

Ток i магнит өрісіндегі жинақталған энергия толығымен r кедергіде жылуға айналмайынша бар болады.

Қысқа тұйықталған контурда қоректендіру көзінің болмайтынын ескере отырып, Кирхгофтың екінші заңы бойынша теңдеу құрайық.

$$0 = ir + L \frac{di}{dt}$$

Өтпелі процесс кезіндегі ток еріксіз $i_{еріксіз} = 0$, өйткені контурда қоректендіру көзі жоқ, яғни $i = i_{еркін}$

$$0 = i_{еркін}r + L \frac{di_{еркін}}{dt} \text{ бұдан } \frac{di_{еркін}}{i_{еркін}} = -\frac{r dt}{L}$$

Интегралдағанда:

$$\frac{di_{еркін}}{i_{еркін}} = -\frac{dt}{\tau} \text{ оны интегралдап,}$$

бұдан $\ln i_{еркін} = -t / \tau + \ln k$ -ны аламыз.

$i_{еркін} = ke^{-t/\tau}$ - қысқа тұйықталуға дейінгі ток.

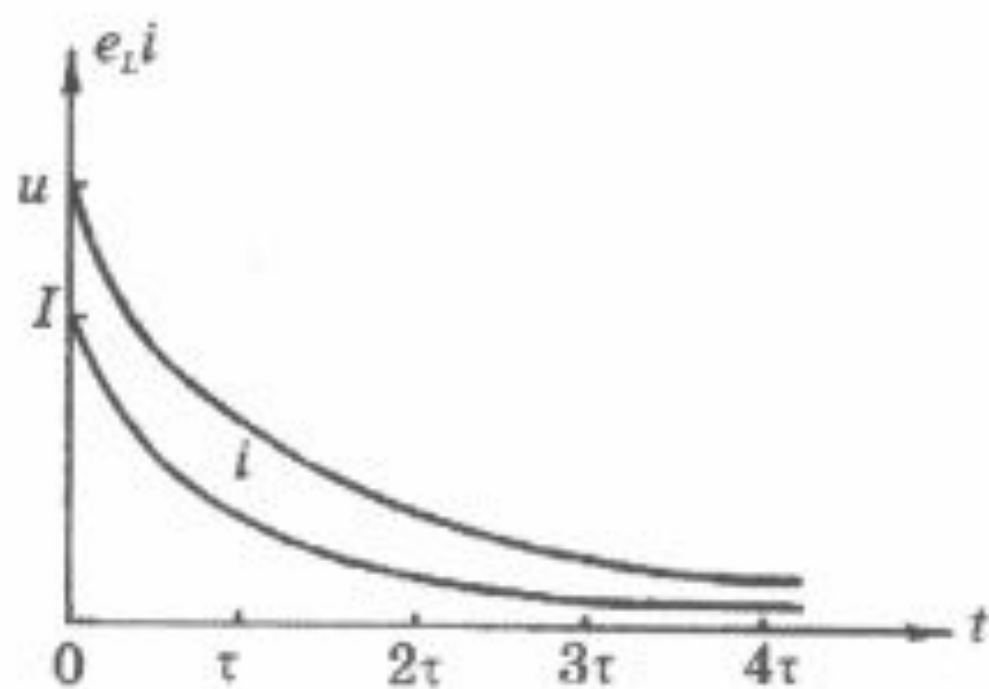
$$I = \frac{U}{r_1} + r$$

$t = 0$ болғанда, коммутацияның бірінші заңы бойынша:

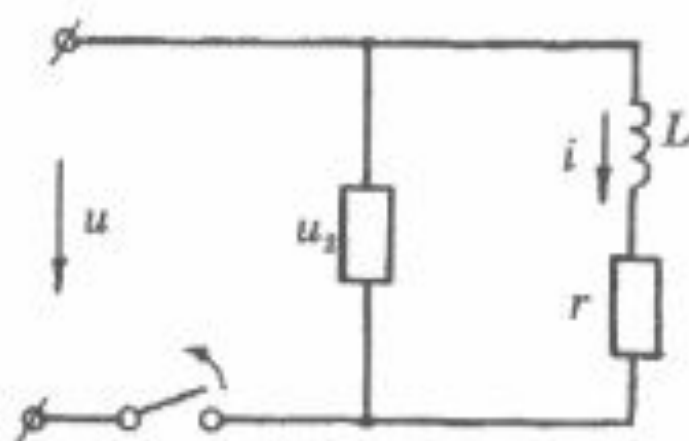
$$i(0) = I = i_{еркін}(0) = k$$

Сонымен, $i = i_{\text{еркін}} = I e^{-\frac{t}{\tau}}$

Бастапқы моментте ток ең көп мәнге ие, содан соң кемиді де $t = 5\tau$ уақытта нөлдік мәнге жетеді



II. Индуктивтілігі және кедергісі бар тізбекті ажырату.
 L мен r бар оған тұрақты кернеудің U әрекетінде болатын параллель резистор r_2 жалғанған телімді ажыратқанда ток қысқа тұйықталу кезіндегідей анықталады (243-сурет).



243-сурет

Осы жағдай алдыңғыдан тізбекті қосқанда ажыратылған контурдың кедергісі r_2 шамасына көп болатынымен ерекшеленеді, оның салдарынан тұрақты шама:

$$\tau' = \frac{L}{r+r_2}$$

$\tau = \frac{L}{r}$ -ден аз, онда өздік индукция ЭҚК-і керісінше үлкен болады.

$$e'L = -L \frac{di}{dt} = LI \frac{1}{\tau'} e^{-\frac{t}{\tau'}} = I(r+r^2) e^{-\frac{t}{\tau'}}$$

Бастапқы мезеттегі ЭҚК $e'L(0) = I(r+r^2)$, ал оның қысқа тұйықталған тізбекте индукцияланатын ЭҚК-ке қатынасы:

$$\frac{e'L(0)}{e_L(0)} = \frac{I(r+r^2)}{I \cdot r} = \frac{r+r^2}{r}$$

бұдан,

$$e'_L(0) = eL(0) \frac{r+r^2}{r} = U \frac{r+r^2}{r}$$

Алынған өрнек ажыратылған телімнің кедергісінің артуы тізбектегі индукцияланатын ЭҚК-тің өсуіне әкелетінін көрсетеді.

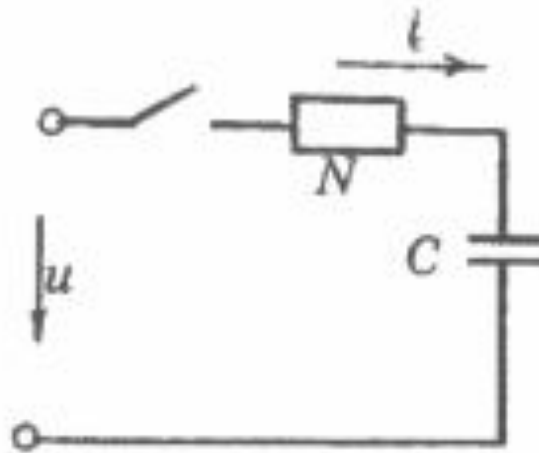
Бұл ЭҚК тізбекке қауіпті мәндерге, яғни ажыратуға дейінгі кернеуден бірнеше рет асып түсетін мәндерге дейін жеткі мүмкін екендігін көрсетеді.

R,C – ЭЛЕМЕНТТЕРДІ ТҰРАҚТЫ КЕРНЕУГЕ ҚОСУ

I. Конденсаторды C резистор арқылы тұрақты кернеу көзіне U қосайық. Бұл кезде конденсатор зарядталады және ондағы кернеу зарядқа пропорционал

$u_C = \frac{q}{C}$, конденсатор зарядталмаған болғандықтан, ком-

мутация заңы бойынша конденсатордағы кернеу оны қосқанда ($t = 0$) нөлге тең, яғни $u_C(0) = 0$.



Орныққан режимде конденсатордағы кернеу қоректендіру көзінің кернеуіне тең болады.

Өтпелі процесс кезіндегі конденсатордағы кернеуді екі құраушымен беруге болады: еріксіз режимнің кернеуі $u_{C \text{ еріксіз}} = U$ және еркін процестің кернеуі $u_{C \text{ еркін}}$.

$$u_C = u_{C \text{ еріксіз}} + u_{C \text{ еркін}} = U + u_{C \text{ еркін}}$$

Кирхгофтың екінші заңы бойынша:

$$U = ri + u_C$$

$$i = \frac{dq}{dt} = c \frac{du_C}{dt}$$

$$U = rc \frac{du_C}{dt} + u_C$$

теңдеуін аламыз.

$u_c = U + u_{c \text{ еркін}}$ екенін ескеріп

$$U = rC \frac{du_{c \text{ еркін}}}{dt} + U + u_{c \text{ еркін}}$$

бұдан,

$$\frac{du_{c \text{ еркін}}}{dt} = -\frac{dt}{rC}$$

$r \cdot C = \tau$ – уақыт тұрақтысы.

$$\frac{du_{c \text{ еркін}}}{u_{c \text{ еркін}}} = -\frac{dt}{\tau}$$

Осы теңдеуді интегралдаймыз.

$$\ln u_{c \text{ еркін}} = -\frac{t}{\tau} + \ln k$$

бұдан,

$$u_{c \text{ еркін}} = ke^{-\frac{t}{\tau}}$$

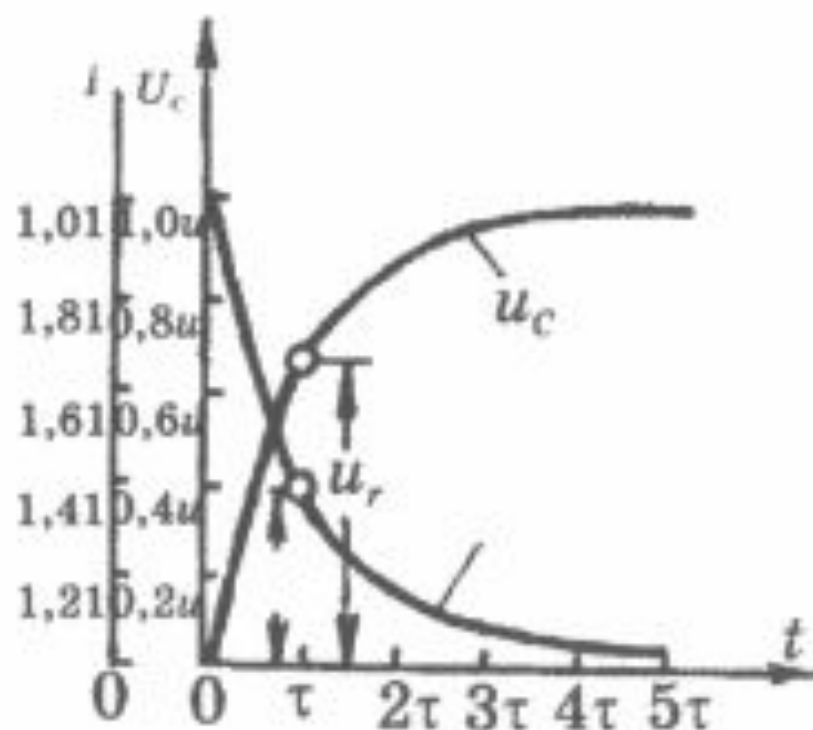
Интегралдау тұрақтысын бастапқы шарттардан анықтаймыз. $t = 0$ болғанда коммутацияның екінші заңы бойынша $u_c(0) = 0$, яғни:

$$U + k = 0; k = -U$$

Зарядталу кезіндегі конденсатордағы кернеу:

$$u_c = U - Ue^{-\frac{t}{\tau}} = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

яғни ол көздің тұрақты кернеуі U мен еркін кернеудің айырмасына тең, уақыт өтуімен көрсеткіштік функцияның заңымен U -ден нөлге дейін кемиді



Өтпелі процестің тогы немесе зарядтық ток:

$$i = c \frac{du_c}{dt} = c \frac{1}{\tau} U e^{-\frac{t}{\tau}} = I e^{-\frac{t}{\tau}}$$

мұндағы, $I = \frac{CU}{\tau} = \frac{U}{r}$

$t = 4,6\tau = 4,6 \cdot C \cdot r$ уақыт аралығында өтпелі процесс аяқталады.

II. Есеп қарастырайық.

1. Конденсаторды тұрақты кернеу көзіне $U = 120$ В қосқанда $t = 0,3$ с уақыттағы кернеуді анықтаңыздар, егер конденсатордың сыйымдылығы $C = 100$ мкФ, кедергісі $r = 3$ кОм болса.

Зарядтық токтың шамасын анықтаңыздар.

Шешуі.

Уақыттың тұрақтысын анықтаймыз.

$$\tau = r \cdot c = 3 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 0,3 \text{ с}$$

$t = 0,3$ с-тан кейінгі конденсатордағы кернеу:

$$u_C = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

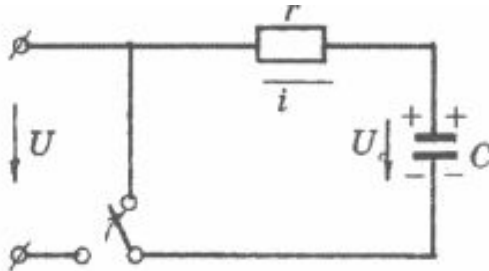
$$\begin{aligned} u_C &= 120(1 - e^{-0,3/0,3}) = 120(1 - e^{-1}) = \\ &= 120(1 - 1/2,718^{-1}) = 120 \cdot 0,63 = 75,6 \text{ В} \end{aligned}$$

Зарядтық тоқты анықтаймыз.

$$i_{\text{зар}} = I e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{120}{3 \cdot 10^3} = 0,04 e^{-1} = 0,04 \cdot 0,37 = 0,015 \text{ А} = 15 \text{ мА}$$

R.C-ҚЫСҚА ТҰЙЫҚТАЛУЫ

I. Тізбек қысқа тұйықталғанда C мен r бар тізбекте қоректендіру көзі жоқ, сондықтан $U_C = 0$,
 $t = 0$ және $u_C = u_{C\text{еркін}}$, $i = I_C$.



Кирхгофтың екінші заңы бойынша теңдеу құрастырамыз $0 = ir + u_C$ немесе $ir = -u_C$, ал тізбектегі ток $i = -\frac{u_C}{r}$.

Минус таңбасы конденсатордың разрядталуы кезінде тізбектегі токтың бағыты конденсатордың зарядталуы кезіндегі болған бағытқа қарсы екенін білдіреді.

$$i = \frac{dq}{dt} = c \frac{du_C}{dt}$$

Осы өрнекті $ir = \frac{u_C}{r}$ теңдеуіне қоямыз.

$$C \frac{du_C}{dt} = -\frac{dt}{r_C}; \quad \frac{du_C}{u_C} = -\frac{dt}{rC}; \quad r \cdot C = \tau$$

Айнымалыларды бөлейік.

Оң және сол бөліктерін интегралдап, төмендегі теңдеулерді аламыз.

$$\ln u_C = -\frac{t}{\tau} + \ln k$$

$$\ln u_C - \ln k = -\frac{t}{\tau}$$

$$\ln \frac{u_C}{k} = -\frac{t}{\tau} \quad \frac{u_C}{k} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad u_C = ke^{-\frac{t}{\tau}}$$

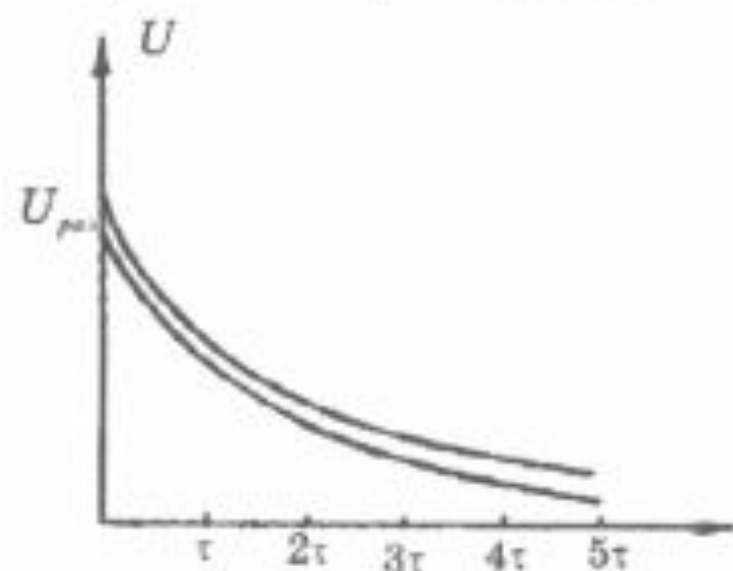
k тұрақтысын бастапқы шарттардан анықтайық. Бастапқы уақыт мезетінде:

$t = 0; u_C(0) = U$ – коммутацияның екінші заңына сәйкес
 $u_C(0) = ke^0 = U$ сонда,

$$u_C = Ue^{-\frac{t}{\tau}}$$

Разрядтық ток

$$i = i_C = -\frac{u_C}{r} = -Ie^{-\frac{t}{\tau}}$$

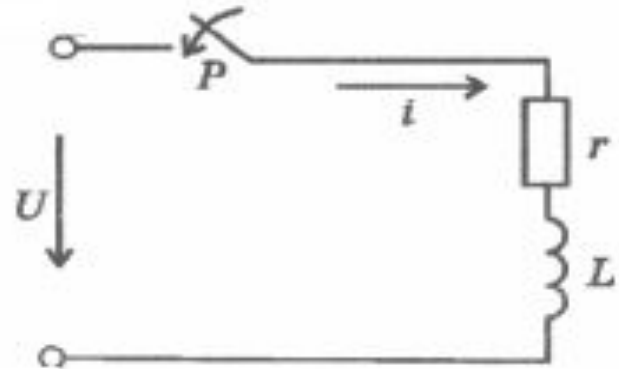


Конденсатордағы кернеу бастапқы уақыт мезетінде ең үлкен мәнге ие, содан соң, уақыт ішінде нөлге дейін өзгереді. Ток конденсатордағы кернеуге пропорционал өзгереді.

R,L – ЭЛЕМЕНТТЕРІ БАР ТІЗБЕКТІ СИНУСОИДАЛЫ КЕРНЕУГЕ ҚОСУ

I. Индуктивтілігі L мен r кедергісі бар тізбекті айнымалы кернеудің көзіне қосқанда өтпелі процесс басталады

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi)$$



Өтпелі ток екі құраушыдан тұрады:

$i_{\text{еріксіз}}$ – қоректендіру көзінің кернеуімен қамтамасыз етілген еріксіз ток.

$i_{\text{еркін}}$ – жинақталған энергиямен қамтамасыз етілген еркін ток.

$$i = i_{\text{еріксіз}} + i_{\text{еркін}}$$

Еріксіз ток:

$$i_{\text{еріксіз}} = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi)$$

мұндағы, $Z = \sqrt{r^2 + X_L^2}$; $X_L = \omega L$; $\text{tg} \varphi = \frac{\omega L}{r}$

Еркін токтың өзгеру заңы тізбектің r және L параметрлеріне тәуелді, сондықтан еркін ток:

$$i_{\text{еркін}} = ke^{-\frac{t}{\tau}}$$

k -ны $t = 0$ шарттарынан анықтаймыз.

$$i(0) = i_{\text{еріксіз}}(0) + i_{\text{еркін}}(0) = 0; \quad i_{\text{еркін}} = -i_{\text{еріксіз}}$$

$$i_{\text{еркін}}(0) = ke^0 = k, \quad \text{ал еріксіз ток:}$$

$$i_{\text{еріксіз}}(0) = I_m \sin(\omega \cdot 0 + \psi - \varphi) = I_m \sin(\psi - \varphi)$$

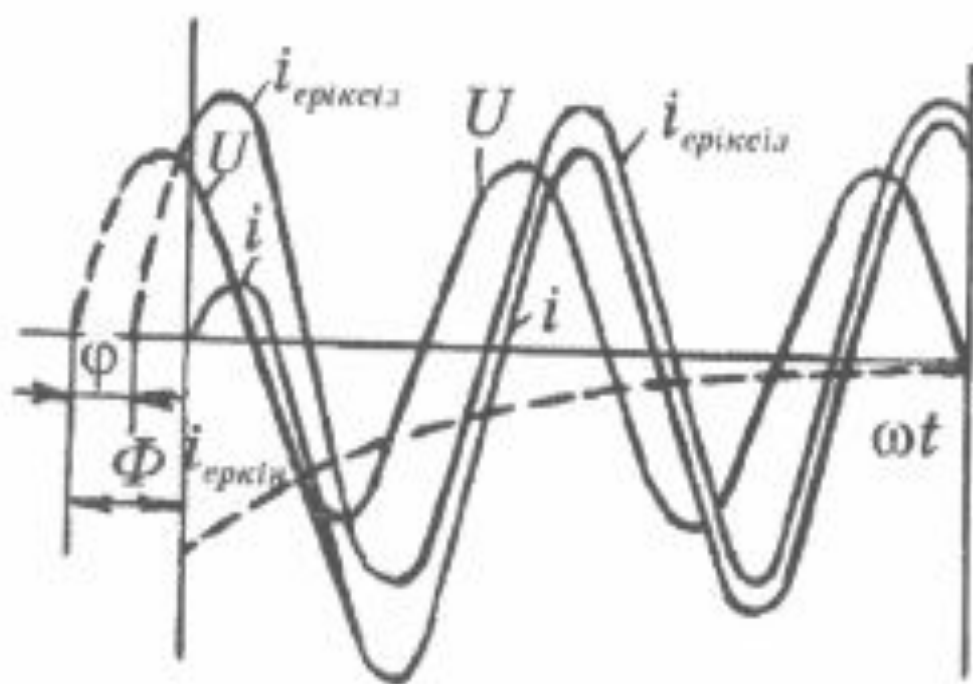
Демек, еркін ток:

$$i_{\text{еркін}} = ke^{-\frac{t}{\tau}} = -I_m \sin(\psi - \varphi)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Бастапқы мезетте еркін ток ең үлкен мәнге ие. Ол шамасы бойынша еріксіз токтың қосылу мезетіндегі лездік мәніне тең және таңбасы бойынша қарама-қарсы.

Уақыт өтуіне қарай еркін ток кемиді және $t = 5\tau$ уақыттан соң нөлдік мәнге жетеді

$$i = i_{\text{еріксіз}} + i_{\text{еркін}} = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - I_m \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}$$



Өтпелі токтың мәні қосылу мезетіне тәуелді. Оң жар-

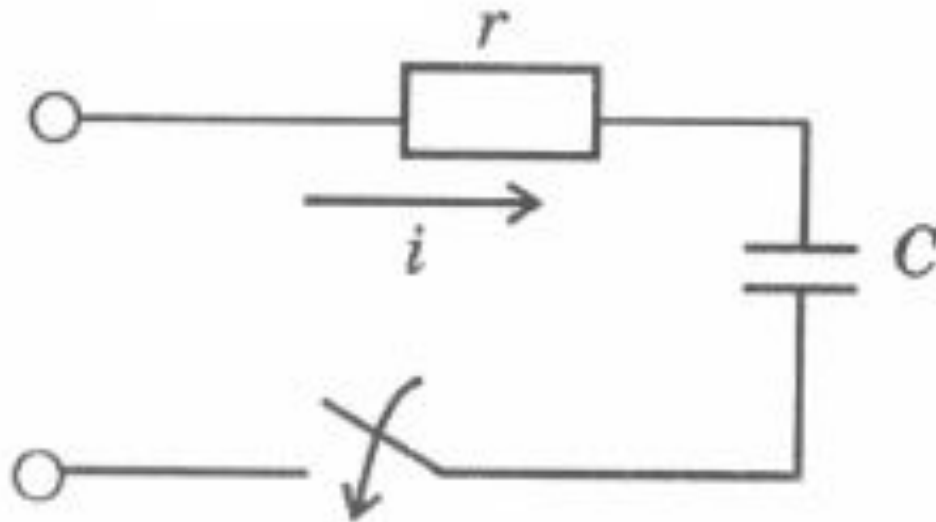
тылай толқын басталғаннан кейін $t = \frac{\psi}{\omega} = \frac{(\varphi \pm 90^\circ)}{\omega}$

уақыттан соң еркін ток ($\tau > t$) баяу түскенде өтпелі токтың ең үлкен мәні i_{\max} -ге жетуі мүмкін, ол шамамен еріксіз токтың I_m екі есе амплитудасына тең.

Бұл тізбек қосылғаннан кейін периодтың жартысына тең уақыттан соң еркін және еріксіз токтар бірдей таңбаға ие болғанда болуы мүмкін.

R,C – ЭЛЕМЕНТТЕРІ БАР ТІЗБЕКТІ СИНУСОИДАЛЫ КЕРНЕУГЕ ҚОСУ

I. Кедергісі r мен C сыйымдылығы бар тізбекті синусоидалы кернеуге $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$ қосқанда өтпелі процесс басталады.



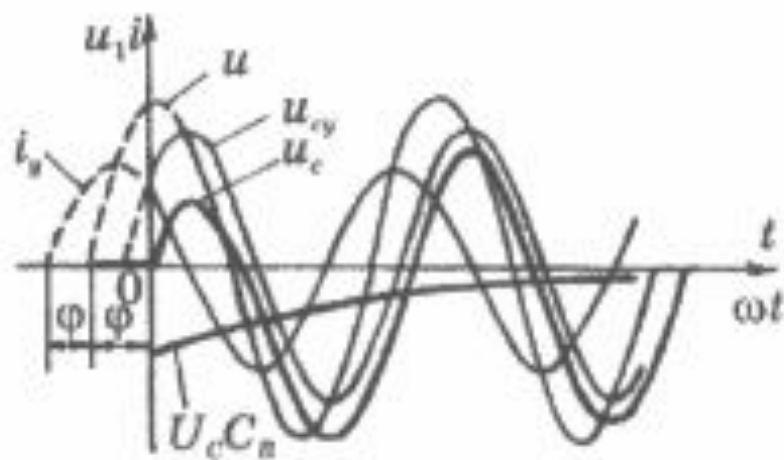
Тізбектің еріксіз тогы:

$$i_{\text{еріксіз}} = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi)$$

мұндағы, $Z = \sqrt{r^2 + X_c^2}; \operatorname{tg} \varphi = \frac{-X_c}{r}; \varphi < 0$

$i_{\text{еріксіз}}$ ток фазасы бойынша тізбектің кернеуінен U озады. Өтпелі процестегі конденсатордағы кернеу мыналардан тұрады

- $u_{C \text{ еріксіз}}$ - еріксіз кернеу,
- $u_{C \text{ еркін}}$ - еркін кернеу.



Конденсатордағы еріксіз кернеу:

$$u_{\text{еріксіз}} = I_m \frac{1}{\omega C} \sin(\omega t + \psi - \varphi - \pi / 2) = \\ = -U_{cm} \cos(\omega t + \psi - \varphi)$$

$$U_{cm} = \frac{I_m}{\omega C}$$

Конденсатордағы еркін кернеу:

$$u_{\text{еркін}} = ke^{-\frac{t}{\tau}}$$

Өтпелі процесс кезіндегі конденсатордағы кернеу:

$$u_c = -U_{cm} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + ke^{-\frac{t}{\tau}}$$

$t = 0$ мезетінде,

$$u_C(0) = u_{\text{еріксіз}}(0) + u_{C \text{ еркін}}(0) = 0$$

$$u_{\text{еріксіз}}(0) = -u_{C \text{ еркін}}(0)$$

$$-U_{cm} \cos(\omega \cdot 0 + \psi - \varphi) = -k e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$k = U_{cm} \cos(\psi - \varphi)$$

Сонымен, конденсатордағы еркін кернеу:

$$u_{\text{еркін}} = k e^{-\frac{t}{\tau}} = U_{cm} \cos(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Конденсатордағы өтпелі кернеу:

$$U_C = U_{серкiн} + U_{еркiн} =$$
$$= -U_{cm} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + U_{cm} \cos(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Еркін кернеудің бастапқы мәні қосылу мезеттеріне тәуелді. Егер қосылу мезеті конденсатордағы кернеудің еріксіз құраушысы амплитудалық мәнге жеткен болса, мысалы теріс, онда еркін токтың бастапқы кернеуі ең үлкен болады, еріксіз кернеудің $U_{cm} (\psi = \varphi)$ амплитудасына тең болады.

Егер еркін кернеу баяу түссе $\tau > T$, онда конденсатордағы кернеудің ең үлкен мәніне U_{cm} шамамен екі есе амплитудалық мәніне $2U_{cm}$ қосылудан периодтың жартысына тең уақыттан соң, еркін және еріксіз кернеулердің таңбалары бірдей болғанда жетеді.