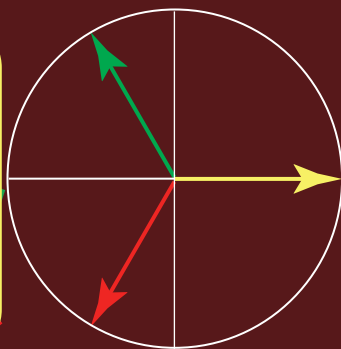
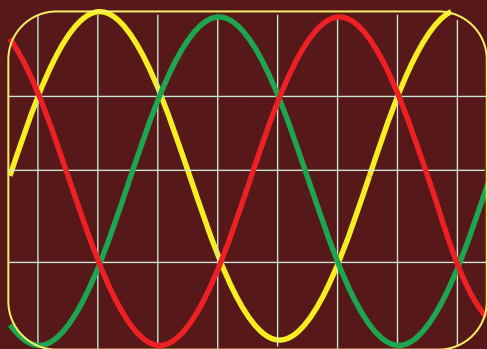
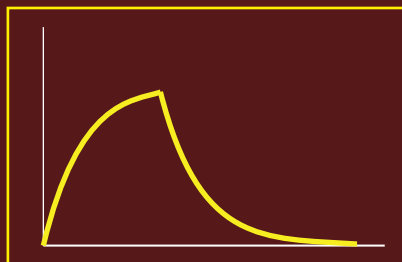


S.Masiokas

Elektro technika



4



VADOVĒLIS
AUKŠTOSIOMS
MOKYKLOMS

Pereinamieji
procesai
tiesinēse
elektrinēse
grandinēs

4.1. Pereinamųjų procesų svarbiausios charakteristikos ir tyrimo metodai 114

- 4.1.1. Pereinamųjų procesų priežastys / 114
- 4.1.2. Komutacijos dėsniai / 114
- 4.1.3. Proceso sparta ir grandinės galia / 116
- 4.1.4. Tyrimo metodika / 116

4.2. Pereinamieji procesai nuolatinės srovės grandinėje su kondensatoriumi 117

- 4.2.1. Kondensatoriaus įkrovimas / 117
- 4.2.2. Kondensatoriaus iškrovimas / 118
- 4.2.3. Grandinės parametrų įtaka / 119
- 4.2.4. Pjūklinės įtampos (relaksacinis) generatorius / 120

4.3. Pereinamieji procesai nuolatinės srovės grandinėje su induktyvumo rite 120

- 4.3.1. Ritės prijungimas prie šaltinio / 120
- 4.3.2. Ritės trumpasis jungimas / 121
- 4.3.3. Ritės atjungimas nuo šaltinio / 122

4.4. Samprata apie pereinamuosius procesus kintamosios srovės grandinėje 123

- 4.4.1. Induktyvumo ritės prijungimas prie šaltinio / 123
- 4.4.2. Kondensatoriaus prijungimas prie šaltinio / 124

Kontroliniai klausimai ir užduotys 126

4.1

Pereinamųjų procesų svarbiausios charakteristikos ir tyrimo metodai

4.1.1. Pereinamųjų procesų priežastys. Ankstesniuose skyriuose tyrėme tiksliai elektrinių grandinių stacionarius režimus. Laikėme, kad, įjungus imtuvą į tinklą, jo nuolatinė ar sinusinė srovė iš karto įgauna tam tikrą vertę ($I = \text{const}$ ar $I_m = \text{const}$), kuri nekinta, jei nekeičiami nei šaltinio, nei imtuvo parametrai. Grandinę išjungus srovė išnyksta staiga, per laiką $t=0$. Iš tikrųjų taip būna ne visada: jei grandinėje yra energiją kaupiančių ar ją grąžinančių elementų, tuo metu kai keičiasi jos režimas, vyksta pereinamieji procesai.

Pereinamaisiais procesais vadinsime reiškinius, kurių metu elektrinė grandinė pereina iš vieno stacionarinio režimo į kitą.

Kai kuriais atvejais pereinamasis procesas yra normalus grandinės darbo režimas. Taip veikia relaksaciniai generatoriai, elektriniai filtrai, impulsiniai suvirinimo įrenginiai, impulsinės lempos, skaičiavimo technikos loginiai elementai.

Antra vertus, pereinamasis procesas gali tapti avariniu grandinės režimu, kurio metu srovė ar įtampa gali būti didesnė, negu buvusio ar būsimo stacionarinio režimo.

Elektrinėse grandinėse yra aktyvieji ir reaktyvieji imtuvai. Aktyviuosiuose energija ne kaupiama, o negrįžtamai paverčiama kitos rūšies energija. Su tam tikromis išlygomis galime laikyti, kad aktyviuosiuose imtuvuose pereinamieji procesai nevyksta: srovė atsiranda ir išnyksta šuoliu per laiką $t=0$.

Reaktyviuosiuose imtuvuose – ritėse ir kondensatoriuose – elektros energija yra kaupiama jų magnetiniame ar elektriniame lauke arba grąžinama šaltiniui. Pakisti šuoliu per laiką $t=0$ energija galėtų tik tokioje ritėje ir kondensatoriuje, kurių galia $p_L = dW_L/dt$ ir $p_C = dW_C/dt$ be galo didelė. To būti negali, todėl ilgesni ar trumpesni pereinamieji procesai ritėse ir kondensatoriuose yra neišvengiami.

4.1.2. Komutacijos dėsniai. Komutacija vadinsime elektrinės grandinės įjungimą, išjungimą, perjungimą ar labai staigų parametrų pakeitimą. Laikoma, kad komutacija įvyksta per laiką $t=0$, bet išskiriamos laiko prieš komutaciją – $t=(0_-)$ – ir laiko po komutacijos – $t=(0_+)$ –

sąvokos (4.1 pav.). **Pereinamasis procesas prasideda tuoj po komutacijos.**

Komutacijos dėsniai yra du. **I dėsnis. Idealiuos ritės srovė prieš komutaciją ir po jos yra ta pati:**

$$i_L(0_-) = i_L(0_+). \quad (4.1)$$

II dėsnis. Kondensatoriaus įtampa prieš komutaciją ir po jos yra ta pati:

$$u_C(0_-) = u_C(0_+). \quad (4.2)$$

Pereinamojo proceso **pradinėmis sąlygomis** vadinamos tokios srovių ir įtampų vertės: $i_L(0_+)$, $u_L(0_+)$, $u_C(0_+)$, $i_C(0_+)$. Kalbant tik apie i_L ir u_C , pradines sąlygas galima užrašyti šitaip:

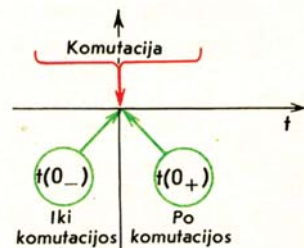
$$i_L(0_+) = i_L(0_-) = i_L(0); \quad u_C(0_+) = u_C(0_-) = u_C(0).$$

Kai $i_L(0) = 0$ arba $u_C(0) = 0$, pradinės sąlygos vadinamos **nulinėmis**.

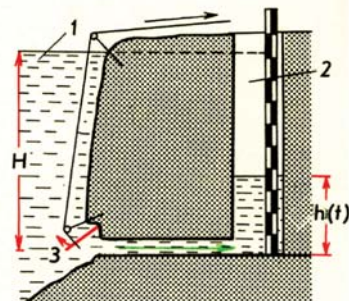
Pereinamojo proceso **baigties sąlygomis** paprastai vadinamos **elektrinių dydžių nusistovėjusios vertės, kurios pasiekiamos pasibaigus pereinamajam procesui**, t. y. po be galo ilgo laiko, nes teoriškai kiekvienas pereinamasis procesas trunka be galo ilgai. Praktiškai laikoma, kad **pereinamasis procesas baigiasi, kai baigties sąlygos pasiekiamos su pakankamu tikslumu**.

Pereinamųjų procesų komutacijos dėsnius, pradines ir baigties sąlygas iliustruosime pavyzdžiu iš hidraulikos. Tarkime, kad turime du indus (4.2 pav.), iš kurių vienas (1) yra labai didelės, o antras (2) – ribotos talpos. Šie indai sujungti vamzdžiu, kuriame yra įmontuota sklendė (3). Jungiančio indus vamzdžio hidrodinaminė varža (pasipriešinimas skysčio tekėjimui) nelygi nuliui. Staiga atidarius sklendę (komutacija), antrame inde skysčio nėra, kaip jo nebuvo iki tol (analogija II komutacijos dėsniai). Po „komutacijos“ antrame inde skysčio lygis $h(t)$ palaipsniui kils, kol pagal susisiekiančiųjų indų dėsnį abiejų indų skysčių lygiai pasidarys vienodi.

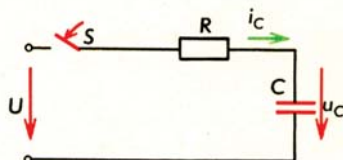
Analogiškas yra kondensatoriaus įkrovimo pereinamasis procesas. Pagal II komutacijos dėsnį įjungimo momentu $t = (0_+)$ kondensatoriaus plokštelės jokio krūvio neturi, krūvininkai pradeda judėti. Srovė tuomet stipriausia, visa įtampa tenka rezistoriui. Šio pereinamojo proceso pradinės sąlygos yra tokios: $u_C(0) = 0$; $i_C(0_+) = U/R$; $u_R(0_+) = Ri_C = U$. Kai kondensatorius išsikrauna, pereinamasis procesas baigiasi. Kondensatoriaus įtampa susilygina su tinklo įtampa, srovė juo nebeteka. Šio pereinamojo proceso baigties sąlygos: $u_C(\infty) = U$; $i_C(\infty) = 0$; $u_R(\infty) = Ri_C = 0$.



4.1 pav.



a



b

4.2 pav. Sistemos, kuriose gali vykti pereinamieji procesai: a – hidraulinė; b – elektrinė

4.1.3. Proceso sparta ir grandinės galia. Pereinamojo proceso sparta priklauso tik nuo grandinės parametrų. Pavyzdžiui, pripildyti indą skysčio truks tuo ilgiau, kuo didesnė pripildomo indo talpa ir kuo plonesnis indus jungiantis vamzdis. Kondensatoriaus įkrovimas truks tuo ilgiau, kuo didesnė bus jo elektrinė talpa C ir didesnė rezistoriaus varža R .

Paprastai yra apskaičiuojama tiriamosios grandinės laiko konstanta τ , iš kurios didumo galima spręsti, kiek praktiškai truks pereinamasis procesas. Dažniausiai praėjus laikui $t=3\tau$, grandinės elektrinių dydžių vertės sudaro 95 %, o po laiko $t=5\tau$ – 99 % jų baigties sąlygų. Toks tikslumas praktiškai paprastai yra pakankamas, o pereinamasis procesas laikomas pasibaigusių.

Realūs procesai elektrinėse grandinėse trunka nuo kelių sekundžių iki dešimtųjų ar šimtųjų sekundės dalių. Didelių dažnių technikoje jų trukmė matuojama nanosekundėmis ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$). Kartais nuo pereinamojo proceso trukmės labai daug priklauso: pavyzdžiui, kuo mažesnė pereinamųjų procesų trukmė ESM loginiuose elementuose, tuo didesnė atliekamų skaičiavimų sparta.

Kuo mažesnė pereinamojo proceso trukmė, tuo per trumpesnį laiką įvyksta energijos pokytis, taigi tuo didesnė yra impulso galia. Pavyzdžiu pasirinkime fotoblykstės kondensatorių, kurio talpa $800 \mu\text{F}$ ir kuris įkraunamas iki tinklo įtampos amplitudinės vertės $U_m = 220 \sqrt{2} = 311 \text{ V}$. Jame sukaupta energija $W_C = CU_m^2/2 = 800 \cdot 10^{-6} \cdot 311^2/2 = 38,7 \text{ J}$. Atrodytų, kad ši energija labai nedidelė. Blyksnio metu kondensatorius išsikrauna per 10^{-3} s . Vidutinė fotoblykstės galia: $\bar{P} = W_C/t = 38,7/10^{-3} = 38,7 \text{ kW}$. Kaip matome, lempos blyksnio galia yra gana didelė. Yra naudojamos specialios paskirties impulsinės lempos, kurių impulso galia prilygsta Kauno HE galiai. Didelės impulsinės galios šaltiniai taikomi metalų suvirinimui, elektrinei žūklei ir kitiems technologiniams tikslams.

4.1.4. Tyrimo metodika. Visi realūs grandinės imtuvai pakeičiami jiems ekvivalentiniais (žr. 1 ir 2 skyrius) idealiais – rezistoriais, ritėmis, kondensatoriais, šaltiniais, – ir iš jų sudaroma atstojamosios elektrinės grandinės schema. Grandinei taikomi Omo ir Kirchhofo dėsniai, užrašyti momentinėmis srovės ir įtampos vertėmis. Sudaromos diferencialinės lygtys. Kai grandinėje yra tiksliai vieno tipo reaktyvieji elementai (ritės arba kondensatoriai) ir vienas EVJ, įtampos arba srovės šaltinis, gaunama pirmosios eilės diferencialinė lygtis. Kai grandinėje yra du skirtingi reaktyvieji elemen-

tai, jos elektrinių dydžių sąryšiai užrašomi antrosios eilės diferencialine lygtimi.

Tokių diferencialinių lygčių sprendimo būdai yra žinomi iš matematikos. Išsprendus pirmosios eilės diferencialinę lygtį, gaunama eksponentinė funkcija, antrosios eilės – dviejų eksponentinių funkcijų suma. Šu grandinių tyrimo metodika ir rezultatais susipažinsime nagrinėdami būdingiausius pereinamųjų procesų elektrinėse grandinėse atvejus.

Reikia pastebėti, kad pereinamieji procesai būdingi ir kitoms fizikinėms sistemoms (pvz., mechaninėms, šiluminėms, hidraulinėms ir kt.). Praktikoje pereinamiesiems procesams sudėtingose sistemose tirti sudaromi tiriamųjų objektų elektriniai modeliai, kuriuos tirti dažnai lengviau ir pigiau, negu originalą.

4.2

Pereinamieji procesai nuolatinės srovės grandinėje su kondensatoriumi

4.2.1. Kondensatoriaus įkrovimas. Tai vienas iš dažnai pasitaikančių ir gana paprastas pereinamasis procesas, kuris prasideda sujungus grandinės jungiklį S (4.3 pav., a). Bet kuriuo pereinamojo proceso momentu grandinei galima taikyti II Kirchhofo dėsnį:

$$Ri_c + u_c - U = 0. \quad (4.3)$$

Kondensatoriumi teka srovė $i_c = Cdu_c/dt$ (žr. (2.20)), kurią įrašę į (4.3) lygybę, gauname pirmosios eilės diferencialinę lygtį

$$RCdu_c/dt + u_c = U. \quad (4.4)$$

Lygties sprendinys:

$$u_c = U + A \cdot e^{-t/(RC)}; \quad (4.5)$$

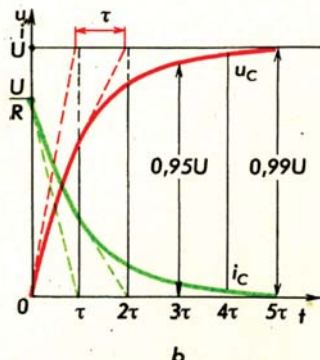
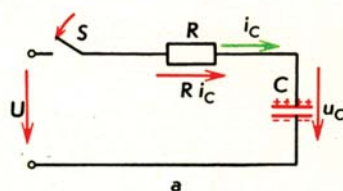
čia A – integravimo konstanta.

Pažymėkime

$$\tau = RC. \quad (4.6)$$

Ši sandauga yra vadinama pereinamojo proceso **laiko konstanta**. Jos matavimo vienetas – sekundė.

Integravimo konstanta gaunama iš nulinių sąlygų: kai $t = 0_+$, $u_c(0) = 0$, iš (4.5) lygties $A = -U$. Įrašę jos vertę



4.3 pav. Kondensatoriaus įkrovimo grandinės schema (a) ir įtampų bei srovės kreivės (b)

į (4.5) lygtį ir ją sutvarkę, gauname įkraunamo kondensatoriaus įtampos kitimo išraišką

$$u_C = U(1 - e^{-t/\tau}). \quad (4.7)$$

Iš (4.3) lygties srovė $i_C = (U - u_C)/R$. Įrašę (4.7) $u_C(t)$ į šią lygtį, gauname srovės kitimo dėsnį:

$$i_C = (U/R)e^{-t/\tau}. \quad (4.8)$$

Abi gautos $u_C(t)$ ir $i_C(t)$ yra eksponentinės funkcijos, kurias pavaizduosime grafiškai (4.3 pav., b). Pereinamojo proceso pradinės sąlygos: $u_C(0) = 0$, $i_C(0_+) = U/R$. Kondensatoriaus įtampa eksponentiškai didėja, kol po $t = \infty$ tampa lygi šaltinio įtampai U , kuri yra jos nusistovėjusi vertė. Kondensatoriaus srovė eksponentiškai mažėja, kol visiškai išnyksta; jos nusistovėjusi vertė yra lygi nuliui.

Kai reikia praktiškai nustatyti laiko konstantą iš eksperimentiškai gautų pereinamojo proceso kreivių, tai patogiau padaryti išvedus per bet kurį eksponentės tašką liestinę, kaip parodyta 4.3 pav., b.

4.1 pavyzdys. Impulsinio suvirinimo kondensatorius per 5 s turi būti įkrautas iki įtampos, kuri lygi 95% tinklo įtampos. Kondensatoriaus talpa $C = 1000 \mu\text{F}$. Apskaičiuokime reikiamą rezistoriaus varžą (žr. 4.3 pav.).

Sprendimas. Žinome, kad $u_C = 0,95U$ po laiko $t = 3\tau$. Grandinės laiko konstanta turi būti: $\tau = RC = t/3$. Iš čia $R = t/(3C) = 5/(3 \times 1000 \cdot 10^{-6}) = 1670 \Omega$.

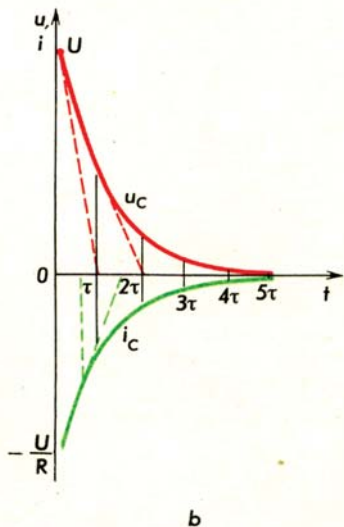
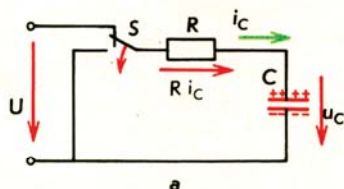
4.2.2. Kondensatoriaus iškrovimas. Tarkime, kad kondensatorius (4.4 pav.) buvo įkrautas iki įtampos $u_C(0_-) = U$. Pereinamasis procesas prasideda perjungus jungiklį S . Pagal II komutacijos dėsnį $u_C(0_+) = U$. Iškraunamas kondensatorius tampa $R-C$ grandinės šaltiniu. Pagal Omo dėsnį $i_C(0_+) = U/R$. Tai šio pereinamojo proceso pradinės sąlygos.

Pereinamojo proceso baigties sąlygos akivaizdžios. Kai kondensatorius išsikraus, jo įtampa bus lygi nuliui ir grandinė srovė nebetekės: $u_C(\infty) = 0$; $i_C(\infty) = 0$.

u_C ir i_C kitimo dėsniams nustatyti parašysime iškraunamo kondensatoriaus grandinei lygtį pagal II Kirchhofo dėsnį:

$$Ri_C + u_C = 0. \quad (4.9)$$

Kondensatoriaus srovė $i_C = Cdu_C/dt$. Įrašę šią jos išraišką į (4.9), gauname šitokią diferencialinę lygtį:



4.4 pav. Kondensatoriaus iškrovimo grandinės schema (a) ir įtampos bei srovės kreivės (b)

$$RCdu_C/dt + u_C = 0. \quad (4.10)$$

Jos sprendinys $u_C = Ae^{-t/(RC)}$. Iš pradinių sąlygų: $A = U$. Sandauga $RC = \tau$. Tai grandinės laiko konstanta. Kondensatoriaus įtampa iškrovimo metu:

$$u_C = U e^{-t/\tau}. \quad (4.11)$$

Iškrovimo srovę gausime iš (4.9) lygties, įrašę į ją įtampas u_C (4.11) išraišką:

$$i_C = -(U/R) e^{-t/\tau}. \quad (4.12)$$

Gautas neigiamas srovės ženklas rodo, kad kondensatoriaus iškrovimo srovė yra priešingos krypties negu įkrovimo.

Iškraunamo kondensatoriaus įtampa ir srovė mažėja eksponentiškai (4.4 pav., b), ir to mažėjimo sparta priklauso nuo grandinės laiko konstantos. Iškrovimo metu kondensatoriaus elektrinio lauko energija rezistoriuje virsta šiluma.

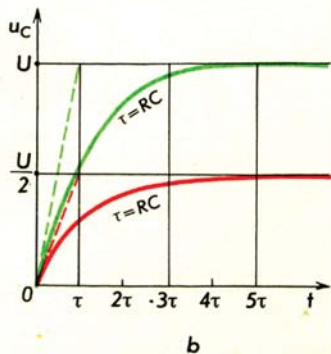
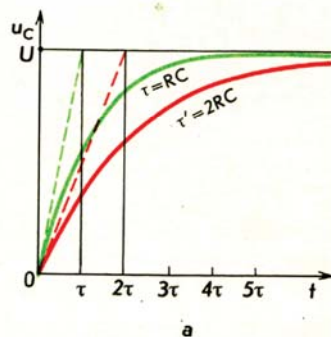
4.2 pavyzdys. Kondensatorius, kurio talpa $8 \mu\text{F}$, įjungtas į 220 V nuolatinės įtampos tinklą. Apskaičiuokime, kokia turi būti jo iškrovimui skirtas rezistoriaus varža, kad po dviejų sekundžių prie kondensatoriaus nebūtų pavojinga prisiliesti.

Sprendimas. Nepavojinga laikysime 12 V įtampą. Ji sudaro $12 \cdot 100/220 = 5,5\%$ tinklo įtampos. Žinome, kad 5% kondensatoriaus pradinės įtampos lieka jame po $t = 3\tau$. Galime parašyti: $t = 3\tau = 3RC = 3 \cdot 8 \cdot 10^{-6} R = 24 \cdot 10^{-6} R$. Kai $t = 2 \text{ s}$, $R = 83,3 \text{ k}\Omega$. Kondensatoriaus įtampa bus $220 \cdot 5/100 = 11 \text{ V}$.

4.2.3. Grandinės parametrų įtaka. Nors pereinamieji procesai atsiranda dėl kondensatoriaus savybės kaupti energiją, jo parametrai neturi įtakos nei pradžios, nei baigties sąlygoms. Joms neturi įtakos ir rezistoriaus varža. Pavyzdžiui, kondensatorių įkraunant $u_C(0) = 0$ ir $u_C(\infty) = U$; kondensatorių iškraunant $u_C(0) = U$ ir $u_C(\infty) = 0$.

Grandinės parametrai turi įtakos pereinamojo proceso spartai, kadangi $\tau = RC$. Pavyzdžiui, du kartus padidinę rezistoriaus varžą arba kondensatoriaus talpą, turėsime grandinę, kurios laiko konstanta yra dvigubai didesnė ir pereinamasis procesas vyks dvigubai lėčiau. Įkraunant kondensatorių iš šaltinio, kurio įtampa lygi U , jo įtampa pasieks tas pačias vertes antruoju atveju po dvigubai ilgesnio laiko (4.5 pav., a). Analogiškai dvigubai lėčiau išnys jo įkrovimo srovė.

Laiko konstanta priklauso tik nuo grandinės paramet-



4.5 pav. Kondensatoriaus įkrovimo grandinės (a) ir šaltinio (b) parametrų įtaka pereinamojo proceso spartai ir baigties sąlygoms

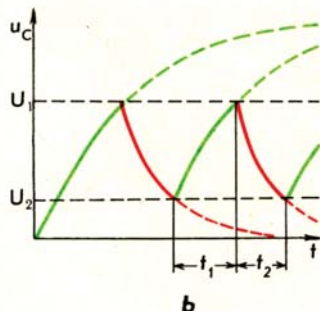
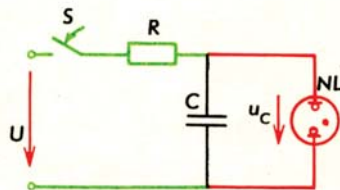
ry. Įkraunant kondensatorių iš šaltinio, kurio įtampa yra U , ir iš šaltinio, kurio įtampa yra $U/2$, grandinės laiko konstanta yra ta pati (žr. 4.5 pav., b). Ir pirmuoju, ir antruoju atveju kondensatoriaus įtampa po 3τ sudarys 95 %, o po 5τ – 99 % jos nusistovėjusios vertės. Žinoma, pirmuoju atveju po to paties laiko nusistovėjusi įtampa bus dvigubai didesnė negu antruoju. Šia pereinamojo proceso savybe galima pasinaudoti. Pavyzdžiui, norint, kad kondensatorius per trumpesnį laiką būtų įkrautas iki įtampos $U/2$, galima įjungti grandinę į tinklą, kurios įtampa yra U , tik reikia laiku ją atjungti.

Tokią pat įtaką grandinės parametrai turi kondensatoriaus įtampai bei srovei jo iškrovimo metu.

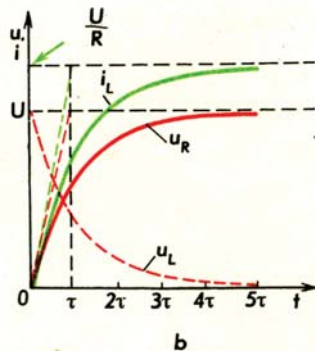
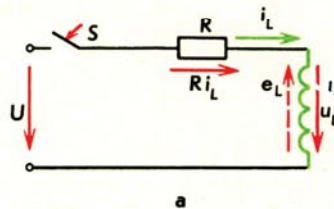
4.2.4. Pjūklinės įtampos (relaksacinis) generatorius. Tai elektroninis įtaisas, kurio išėjimo įtampos speciali kreivės forma yra gaunama naudojantis pereinamaisiais kondensatoriaus įkrovimo ir iškrovimo procesais (4.6 pav.). Lygiagrečiai kondensatoriui, kuris prijungiamas prie nuolatinės įtampos U tinklo nuosekliai su rezistoriumi R , yra įjungta dujinio išlydžio neoninė lempuotė NL . Kol lempuotė nedega, ji elektros srovės nepraleidžia. Kai ji užsidega, lempuotės varža labai sumažėja. Būdinga tai, kad ji užgęsta esant mažesnei įtampai negu užsidega.

Įjungus jungiklį S , kondensatorius pradeda įsikrauti ir jo įtampa eksponentiškai didėja tol, kol pasiekia vertę U_1 , kuri yra lygi lempuotės užsidegimo įtampai. Kai lempuotė užsidega, kondensatorius pradeda per lempuotę išsikrauti. Kai jo įtampa pasiekia vertę U_2 , lempuotė užgęsta. Procesas vėl kartojasi nuo pradžių.

Parinkant grandinės parametrus, galima reguliuoti įkrovimo ir iškrovimo trukmę t_1 ir t_2 . Paprastai $t_1 \gg t_2$. Tokie generatoriai naudojami elektroniniuose oscilografuose elektronų spindulio horizontaliai skleistinei, signalizacijos įrenginiuose (lempuotė žybsi).



4.6 pav. Pjūklinės įtampos generatoriaus schema (a) ir išėjimo įtampos kreivė (b)



4.7 pav. Ritės prijungimo prie šaltinio grandinės schema (a), srovės ir ritės bei rezistoriaus įtampos kreivės (b)

4.3

Pereinamieji procesai nuolatinės srovės grandinėje su induktyvumo rite

Daugelis elektrinių mašinų ir aparatų turi apviją, todėl praktikoje dažnai tenka susidurti su pereinamaisiais procesais, kurie vyksta grandinėse, turinčiose induktyvumą. Apvijos turi aktyviąją ir induktyviąją varžą, todėl kiekvieną apviją galima vaizduoti schemeje kaip rezistorių R , nuosekliai sujungtą su idealia rite.

4.3.1. Ritės prijungimas prie šaltinio. Sujungus jungiklį S (4.7 pav.), grandine pradeda tekėti srovė. Dėl saviindukcijos induktyvumo rityje atsiradusi EVJ priešinasi srovės kitimui. Pagal II Kirchhofo dėsnį $Ri_L - U = -e_L$.

Prisiminę, kad $e_L = L di_L/dt$ ir padaliję abi lygybės puses iš R , gauname šitokią diferencialinę lygtį:

$$(L/R) di_L/dt + i_L = U/R. \quad (4.13)$$

Jos sprendinys:

$$i_L = (U/R) + A e^{-Rt/L}. \quad (4.14)$$

Integravimo konstanta gaunama iš pradinių sąlygų: kai $t(0)=0$, $i_L(0)=0$, tai $A = -U/R$. Pažymėję santykį $L/R = \tau$, gauname:

$$i_L = (U/R)(1 - e^{-t/\tau}). \quad (4.15)$$

Grandinės laiko konstanta

$$\tau = L/R. \quad (4.16)$$

Rezistoriaus įtampa $u_R = Ri_L$ arba

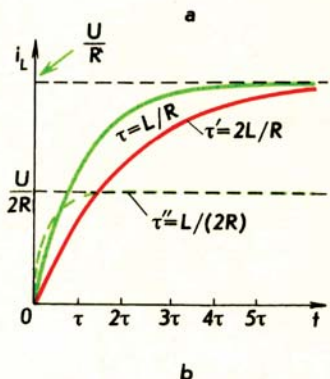
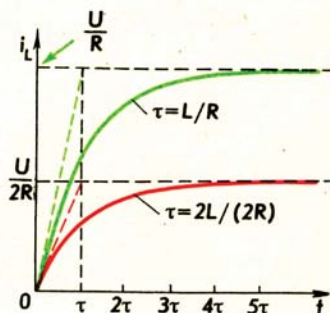
$$u_R = U(1 - e^{-t/\tau}). \quad (4.17)$$

Pagal II Kirchhofo dėsnį $u_L = e_L = U - u_R$. Įrašę gautąjį u_R reiškinį ir sutvarkę lygtį, ritės įtampą ir jos savinukcijos EVJ galime užrašyti šitaip:

$$u_L = e_L = U e^{-t/\tau}. \quad (4.18)$$

Gavome, kad **grandinės srovė** ir rezistoriaus įtampa **eksponentiškai didėja**. Jų pradinės vertės yra nulinės, o nusistovėjusios šitokios: $i_L(\infty) = U/R$; $u_R(\infty) = U$. **Ritės įtampa** ir **EVJ eksponentiškai mažėja** nuo vertės $u_L(0_+) = U$ iki nulio.

Matome, kad **pereinamojo proceso sparta priklauso ne nuo absoliučių grandinės L ir R verčių, bet nuo jų santykio**. Pavyzdžiui, padidinus ir induktyvumą, ir aktyviają varžą du kartus, laiko konstanta nepakinta, bet pakinta nusistovėjusi srovės vertė, kuri sumažėja du kartus. Padidinus tik induktyvumą, laiko konstanta padidėja, ir pereinamasis procesas trunka ilgiau, nors jo baigties sąlygos nepakinta. Padidinus tik aktyviają varžą, pakinta ir laiko konstanta, ir baigties sąlygos (4.8 pav.).



4.8 pav. Ritės grandinės parametrų įtaka pereinamojo proceso spartai ir baigties sąlygoms, kai laiko konstanta nepakinta (a) ir pakinta (b)

4.3.2. Ritės trumpasis jungimas. Sujungus jungiklį S (4.9 pav.), prasideda pereinamasis procesas. Jo pradinės sąlygas galime užrašyti pagal Omo dėsnį: $i_L(0) = U/R$. Po perjungimo srovė staiga neišnyksta, nes ritėje indukuo-

jama saviindukcijos EVJ, kuri trukdo srovei mažėti. Ritės magnetinio lauko energija aktyviajame imtuve virs ta šiluma ir išsklaidoma į aplinką. Pereinamojo proceso baigties sąlygos: $i_L(\infty)=0$.

Pagal II Kirchhofo dėsnį $Ri_L = -e_L$. Kadangi $e_L = -L di_L/dt$, tai

$$(L/R) \cdot di_L/dt + i_L = 0. \quad (4.19)$$

Šios lygties sprendinys

$$i_L = A e^{-Rt/L}. \quad (4.20)$$

Integravimo konstanta gaunama iš pereinamojo proceso pradinių sąlygų: $A = U/R$. **Santykis $L/R = \tau$. Tai grandinės laiko konstanta.** Įrašę šiuos dydžius į (4.20), trumpai sujungtos grandinės srovę galima užrašyti šitaip:

$$i_L = (U/R) e^{-t/\tau}. \quad (4.21)$$

Kadangi $u_R = Ri_L$, tai **rezistoriaus įtampa, kaip ir srovė, eksponentiškai mažėja:**

$$u_R = U e^{-t/\tau}. \quad (4.22)$$

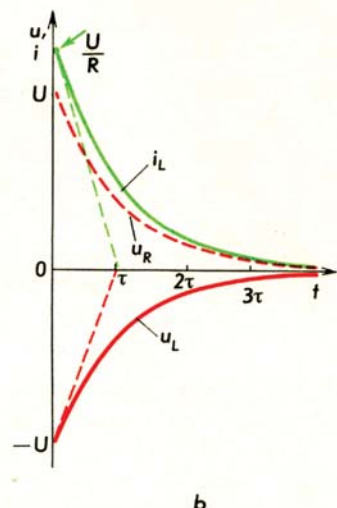
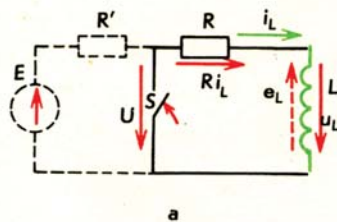
Pagal II Kirchhofo dėsnį $u_R + u_L = 0$, todėl $u_L = -u_R$. Taigi **ritės įtampa taip pat mažėja:**

$$u_L = -U e^{-t/\tau}. \quad (4.23)$$

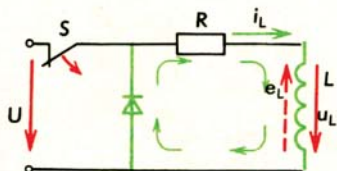
Neigiamas ženklas rodo, kad, sujungus grandinę trumpai, ritė tampa šaltiniu; joje atsiranda saviindukcijos EVJ $e_L = u_L$, kurių kryptys yra priešingos negu pažymėta schemoje (žr. 4.9 pav., a).

4.3.3. Ritės atjungimas nuo šaltinio. Jei 4.9 pav., a grandinę atjungtume nuo šaltinio, bet trumpai nesujungtume, tai srovė ritėje turėtų išnykti praktiškai staiga. Kuo sparčiau kinta srovė, tuo didesnė atsiranda ritėje saviindukcijos $e_L = L di_L/dt$. Dėl to, **vos atsiradus oro tarpui tarp jungiklio kontaktų, srovė pradeda tekėti oru. Oras jonizuojamas, tarp jungiklio kontaktų susidaro lankinis išlydis – kontaktai kibirkščiuoja.** Jungiklio kontaktai oksiduojasi ir net gali išsilydyti.

Antra vertus, didelė EVJ, atsirandanti tuo momentu, kai nutraukiama grandinė, gali būti pavojinga žmogui arba sugadinti įjungtus matavimo prietaisus.



4.9 pav. Ritės trumpojo jungimo grandinės schema (a) ir srovės bei įtampų kitimo kreivės (b)



4.10 pav. Kontaktų apsaugos diodo įjungimo schema

Siekiant apsaugoti grandinę nuo šių nepageidaujamų pereinamojo proceso reiškinių, lygiagrečiai ritei arba visai atjungiamajai grandinei yra įjungiamas rezistorius arba diodas (4.10 pav.). Grandinę atjungus, srovė teka uždaru kontūru, kol palaipsniui išnyksta.

4.4

Samprata apie pereinamuosius procesus kintamosios srovės grandinėje

Kintamosios srovės grandinėje pereinamieji procesai yra sudėtingesni, nes visi elektriniai dydžiai yra laiko funkcijos stacionarinio režimo metu. Pasitenkinsime tik dažniausiai pasitaikančių pereinamųjų procesų tyrimu sinusinės srovės grandinėje.

4.4.1. Induktyvumo ritės prijungimas prie šaltinio. Tarkime, kad pereinamasis procesas vyksta imtuve, kurio aktyvioji varža R , induktyvumas L . Grandinė (4.11 pav.) jungikliu S prijungiama prie tinklo, kurio $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$. Komutacija įvyksta laiko momentu $t=0$. Tuo metu įtampos fazė yra lygi pradinei fazei ψ_u .

Pereinamojo proceso baigties sąlygos – nusistovėjusi srovė $i_L(\infty)$, kuri teka aktyvaus-induktyvaus pobūdžio grandinė pasibaigus pereinamajam procesui. Tai sinusinė srovė, kurią galime užrašyti šitaip: $i_L(\infty) = I_{Lm} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi)$. Jos amplitudę galime apskaičiuoti pagal Omo dėsnį: $I_{Lm} = U_m / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. Kadangi grandinė yra aktyvaus-induktyvaus pobūdžio, tai nusistovėjusi srovė atsilieka faze nuo tinklo įtampos. Fazių skirtumą galime apskaičiuoti iš varžų trikampio: $\varphi = \arctg(\omega L/R)$.

Sudarysime diferencialinę lygtį. Pagal II Kirchhofo dėsnį $Ri_L - u = -e_L$. Įrašę $e_L = L di_L/dt$ ir pertvarkę lygtį, gauname:

$$(L/R) di_L/dt + i_L = u/R. \quad (4.24)$$

Šios diferencialinės lygties sprendinys:

$$i_L = I_{Lm} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) + A e^{-Rt/L}. \quad (4.25)$$

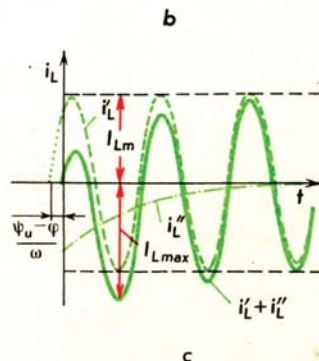
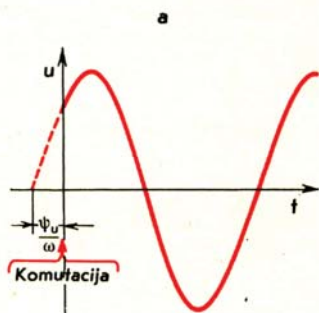
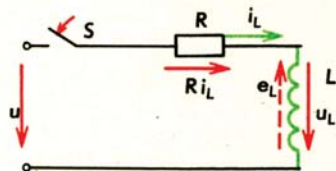
Integravimo konstantą galime gauti iš pereinamojo proceso pradinę sąlygų ($t=0$):

$$i_L(0) = I_{Lm} \sin(\psi_u - \varphi) + A = 0. \text{ Iš čia } A = -I_{Lm} \sin(\psi_u - \varphi).$$

Įrašę A reikšmę bei pažymėję $L/R = \tau$, gauname grandinėje tekančios srovės išraišką:

$$i_L = I_{Lm} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi) - I_{Lm} \sin(\psi_u - \varphi) e^{-t/\tau}. \quad (4.26)$$

Kaip matome, pereinamoji srovė i_L turi dvi dedamąsias. Pirmoji – sinusinė – yra nusistovėjusi grandinės srovė po pereinamojo proceso. Ji paprastai žymima i_L' . Antroji dedamoji yra gęstanti eksponentinė funkcija. Ji egzistuoja tik pereinamojo proceso metu. Ji vadinama laisvąja ir žymima i_L'' .



4.11 pav. Ritės prijungimo prie kintamosios įtampos šaltinio grandinės schema (a), šaltinio įtampos pradinės fazės priklausomybė nuo komutacijos momento (b) ir srovės bei jos dedamųjų kreivės (c)

Kai aktyvaus-induktyvaus pobūdžio grandinė prijungiama prie šaltinio, jo kintamosios įtampos pradinė fazė ψ_u ir jos ženklas priklauso nuo komutacijos momento. Srovės kitimo $i_L(t)$ pobūdis pereinamojo proceso metu priklauso ir nuo šaltinio įtampos pradinės fazės ψ_u , ir nuo fazių skirtumo φ tarp šios įtampos bei srovės (žr. 4.11 pav., c). Du atvejai yra ypatingi – ribiniai.

I atvejis. Komutacija įvyksta momentu, kai $\psi_u - \varphi = 0$. Kadangi $\sin(\psi_u - \varphi) = 0$, tai iš (4.26) lygties matyti, kad laisvoji srovės dedamoji $i'_L = 0$ ir yra tik sinusinė nusistovėjusi srovė i'_L . **Pereinamojo proceso visiškai nėra. Grandinės srovė tuoj pat po komutacijos lygi nusistovėjusiai srovei:**

$$i_L = (U_m / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}) \sin \omega t. \quad (4.27)$$

II atvejis. Komutacija įvyksta momentu, kai $\psi_u - \varphi = \pi/2$. Įrašę šią sąlygą į (4.26) lygtį gauname:

$$i_L = I_{Lm} \sin(\omega t + \pi/2) - I_{Lm} e^{-t/\tau}. \quad (4.28)$$

Komutacijos momentu $t=0$, $i_L(0)=0$. Po laiko $t=T/2$ sinusinė srovės dedamoji i'_L tampa neigiama ir maksimali. Kai grandinės laiko konstanta pakankamai didelė lyginant su i'_L periodu, srovės vertė I_{Lmax} gali būti nedaug mažesnė už nusistovėjusios srovės dvigubą amplitudinę vertę. Skaičiuojant paprastai laikoma, kad didžiausia pereinamoji srovė gali būti lygi $1,8I_{Lmax}$.

Šie reiškiniai dažnai stebimi, jungiant į tinklą transformatorius. Dėl tokio staigaus srovės padidėjimo greitaveikė apsauga grandinę atjungia, todėl tenka ją įjungti iš naujo.

4.4.2. Kondensatoriaus prijungimas prie šaltinio. Grandinė (4.12 pav.), sudaryta iš aktyviojo R ir talpinio C imtuvų, jungiama prie kintamosios įtampos šaltinio, kurio $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$. Tarkime, kad kondensatorius iki pereinamojo proceso nebuvo įkrautas ir komutacija įvyksta laiko momentu $t=0$, kai įtampos fazė yra lygi ψ_u .

Nusistovėjusi kondensatoriaus srovė i'_C pralenkia šaltinio įtampą faze $\varphi = \arctg(-X_C/R) = \arctg(-1/\omega CR)$: $i'_C = I_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi)$ ($\varphi < 0$). Kondensatoriaus nusistovėjusi įtampa atsilieka nuo srovės faze $\pi/2$:

$$u'_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi - \pi/2). \quad (4.29)$$

Šių dydžių amplitudes galime apskaičiuoti pagal Omo dėsnį:

$$I_{Cm} = U_m / \sqrt{R^2 + (1/(\omega C))^2};$$

$$U_{Cm} = (1/(\omega C)) I_{Cm} = (1/(\omega C)) U_m / \sqrt{R^2 + (1/(\omega C))^2} = U_m \sin \varphi.$$

Įrašę gautąją įtampos amplitudę į (4.29) lygybę, gauname, kad kondensatoriuje nusistovėjusi įtampa

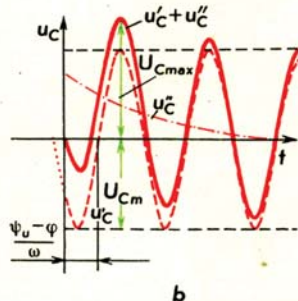
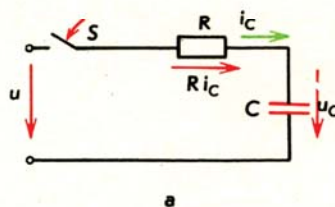
$$u'_C = U_m \sin \varphi \sin(\omega t + \psi_u - \varphi - \pi/2). \quad (4.30)$$

Pagal II Kirchhofo dėsnį $Ri_C + u_C - u = 0$. Įrašę kondensatoriaus srovės vertę $i_C = Cdu_C/dt$, gauname šitokią diferencialinę lygtį:

$$RCdu_C/dt + u_C = U. \quad (4.31)$$

Jos sprendinys:

$$u_C = U_m \sin \varphi \sin(\omega t + \psi_u - \varphi - \pi/2) + A e^{-t/(RC)}.$$



4.12 pav. Kondensatoriaus įkrovimo iš kintamosios įtampos šaltinio schema (a) ir kondensatoriaus įtampos bei jos dedamųjų kreivės (b)

Integravimo konstanta gaunama įrašius pradinės sąlygas: $i(0)=0$; $u_C(0)=0$. Jos vertė $A = -U_m \sin \varphi \sin(\psi_u - \varphi - \pi/2)$. Sandauga $RC = \tau$ yra laiko konstanta.

Kondensatoriaus įtampa pereinamojo proceso metu:

$$u_C = U_m \sin \varphi \sin(\omega t + \psi_u - \varphi - \pi/2) - U_m \sin \varphi \sin(\psi_u - \varphi - \pi/2) e^{-t/\tau}. \quad (4.32)$$

Pirmoji pereinamosios kondensatoriaus įtampos dedamoji u_C' yra nusistovėjusi kondensatoriaus įtampa. Tai sinusinė funkcija. Antroji – laisvoji – dedamoji u_C'' yra gėstanti eksponentinė funkcija (žr. 4.12 pav., c). Atkreipsime dėmesį į du ypatingus – ribinius – atvejus.

I atvejis. Komutacija įvyksta laiko momentu, kai $\psi_u - \varphi = \pi/2$. Laisvoji įtampos dedamoji $u_C'' = 0$. **Pereinamojo proceso nėra. Grandinė iš karto teka nusistovėjusi srovė, ir kondensatoriaus įtampa iš karto tampa lygi nusistovėjusiai įtampai – $u_C(0) = u_C(\infty)$:**

$$u_C = U_m \sin \varphi \sin \omega t. \quad (4.33)$$

II atvejis. Komutacija įvyksta, kai $\psi_u - \varphi = 0$. Įrašę šią sąlygą į (4.32) lygtį, gauname:

$$u_C = U_m \sin \varphi \sin(\omega t - \pi/2) + U_m \sin \varphi e^{-t/\tau}. \quad (4.34)$$

Komutacijos momentu abi įtampos dedamosios yra maksimalios ir priešingų ženklų. Kai grandinės laiko konstanta yra gana didelė, lyginant su nusistovėjusios dedamosios periodu, po laiko $t \approx T/2$ kondensatoriuje gaunamas viršįtampis $U_{C \max}$, kuris nedaug mažesnis už dvigubą jo nusistovėjusios įtampos amplitudę. Į tai neatsižvelgus, kondensatoriaus dielektrikas gali būti pramuštas. Kartais tokia pereinamojo proceso eiga panaudojama praktikoje, kai reikia gauti trumpalaikį didesnės įtampos impulsą, pavyzdžiui, dujinio išlydžio lempai uždegti.

Kontroliniai klausimai ir užduotys

4.1. Paašškinkite, kas tai yra:

- elektrinės grandinės pereinamasis procesas;
- komutacija;
- pradinės, baigties sąlygos;
- laiko konstanta.

4.2. Užrašykite ir paašškinkite I ir II komutacijos dėsnius.

4.3. Ar priklauso pereinamojo proceso pradinės ir baigties sąlygos nuo induktyvumo ritės ir kondensatoriaus parametrų L ir C ?

4.4. Kaip kinta įtampa ir srovė: a – įkraunant kondensatorių; b – iškraunant. Nubraižykite kreives ir jas paašškinkite.

4.5. Po kiek laiko nepavojinga prisiliesti prie kondensatoriaus išvadų, jei jo talpa $300 \mu\text{F}$, jis buvo įkrautas iki 1200 V ir prie jo prijungtas $1 \text{ M}\Omega$ iškrovos rezistorius? (Nepavojinga laikysime mažesnę kaip 12 V įtampą.) (Ats.: 25 min.)

4.6. Kaip kinta realios induktyvumo ritės srovė ir įtampa: a – ritę prijungus prie nuolatinės įtampos šaltinio; b – ritę, kuria teka srovė, sujungus trumpai? Nubraižykite $i_L = f_1(t)$ bei $u_L = f_2(t)$ ir jas paašškinkite.

4.7. Kokias grandines atjungiant nuo nuolatinės įtampos tinklo, jungiklio kontaktai kibirkščiuoja ir kodėl? Kokią įtaką tai turi jungiklio kontaktams ir kaip kibirkščiaavimo išvengti?