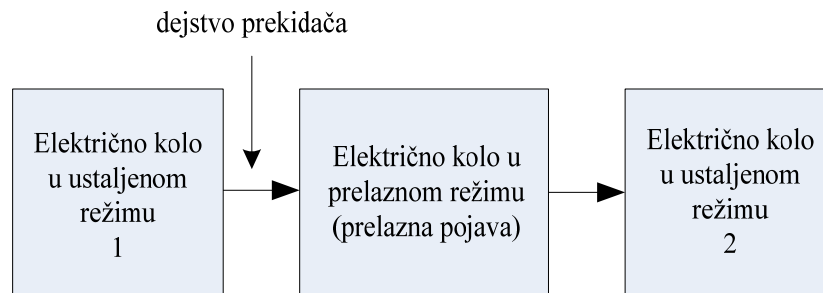


Prelazne pojave u kojima stalnih jednosmernih struja

U svim električnim kolima dolazi do prelaznih pojava prilikom uklanjanja nekih komponenti iz kola ili prilikom dodavanja nekih komponenti kolu. U toku prelazne pojave, preraspoređuje se energija između komponenti koje se nalaze u novonastalom kolu. U pojedinim slučajevima, ta preraspodela energije je izuzetno brza, dok u pojedinim slučajevima to nije slučaj.

Uklanjanje odnosno dodavanje komponenti obavlja se najčešće korišćenjem prekidača. Smatraće se da su prekidači idealni, što znači da se zatvoreni prekidač zamenjuje kratkim spojem a otvoreni prekidač otvorenom vezom.



Slika 4. 1. Blok-dijagram koji pokazuje prelazak električnog kola iz ustaljenog režima 1 u ustaljeni režim 2

U ovom poglavlju biće razmatrane prelazne pojave u kolima stalnih jednosmernih struja.

Kondenzator

Veza između napona i struje kondenzatora

Veza između napona i struje kondenzatora je:

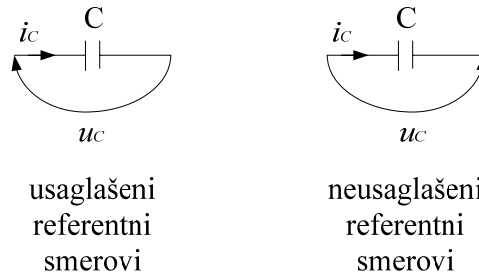
$$i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt} \quad (4. 1.)$$

U izrazu (4. 1.) i_C je struja, C kapacitivnost a u_C napon kondenzatora. Prethodni izraz važi za usaglašene referentne smerove napona i struje kondenzatora.

Ukoliko su referentni smerovi napona i struje neusaglašeni, onda je:

$$i_C = -C \cdot \frac{du_C}{dt} \quad (4. 2.)$$

Na slici 4. 2. prikazani su usaglašeni i neusaglašeni referentni smerovi napona i struje na kondenzatoru.



Slika 4. 2. Usaglašeni i neusaglašeni referentni smerovi napona i struje na kondenzatoru

Kondenzator u kolu stalne jednosmerne struje u ustaljenom režimu

U kolu stalne jednosmerne struje, u ustaljenom režimu, kondenzator se ponaša kao **otvorena veza**. Naime, u kolu stalne jednosmerne struje, u ustaljenom režimu, napon na svim komponentama, pa i na kondenzatoru je konstantan. Ukoliko je $u_C = U_C = \text{const.}$, iz relacije (4. 1.) se dobija:

$$i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt} = C \cdot \frac{dU_C}{dt} = C \cdot 0 = 0 \quad (4. 3.)$$

Struja nula znači da je veza otvorena.

Treba primetiti da konstantna struja može proticati kroz kondenzator. To je slučaj kada je napon na kondenzatoru linearna funkcija vremena (npr. testerasti napon).

$$i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt} = C \cdot \frac{da}{dt} = C \cdot a = \text{const.} = I_C \quad (4. 4.)$$

Kontinualne promene napona kondenzatora

Kondenzator je prazan (rasterećen) ukoliko nema naelektrisanja na njegovim oblogama. U tom slučaju, između elektroda kondenzatora ne postoji napon i kondenzator nema energiju.

Kondenzator je napunjen (opterećen) ukoliko na njegovim elektrodama postoji neka količina naelektrisanja. U tom slučaju, između elektroda kondenzatora postoji neki napon i kondenzator ima neku energiju.

Kondenzator se ponaša kao bunar. Može da se puni i može da se prazni. Može biti napunjen i može biti prazan. Ne može trenutno da se napuni i ne može trenutno da se isprazni.

Napon na kondenzatoru ne može trenutno (skokovito) da se promeni. U dva izuzetno bliska vremenska trenutka t^- i t^+ napon na kondenzatoru je isti:

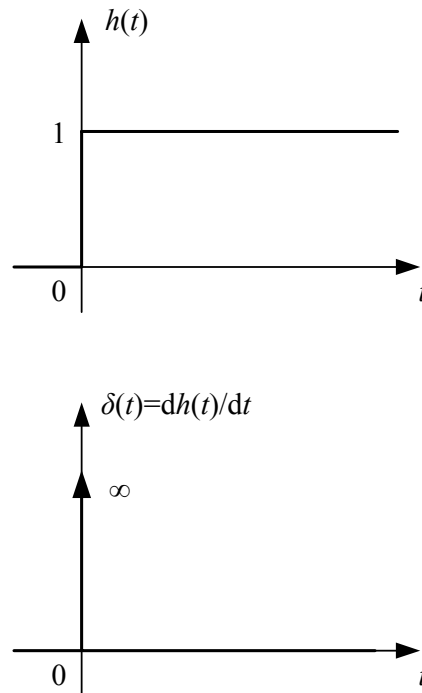
$$u_C(t^-) = u_C(t^+) \quad (4. 5.)$$

Ukoliko bi napon na kondenzatoru mogao trenutno da se promeni, onda bi takva trenutna promena matematički mogla da se prikaže proizvodom skokovitog priraštaja napona (npr. sa 0 na U), koji se dešava u nekom nultom trenutku vremena i jedinične (Hevisajdove) funkcije $h(t)$. Hevisajdova funkcija $h(t)$ ima vrednost nula do trenutka 0, a od nula do beskonačno ima vrednost jedan. S obzirom da je veza između napona i struje kondenzatora data izrazom (4. 1.), i da je izvod Hevisajdove funkcije Dirakov impuls (Dirakova funkcija), za trenutnu promenu napona na kondenzatoru bi trebalo obezbediti struju:

$$i_c(t) = C \cdot \frac{du_c(t)}{dt} = C \cdot \frac{d(U \cdot h(t))}{dt} = C \cdot U \cdot \frac{dh(t)}{dt} = C \cdot U \cdot \delta(t) = \infty \quad (4. 6.)$$

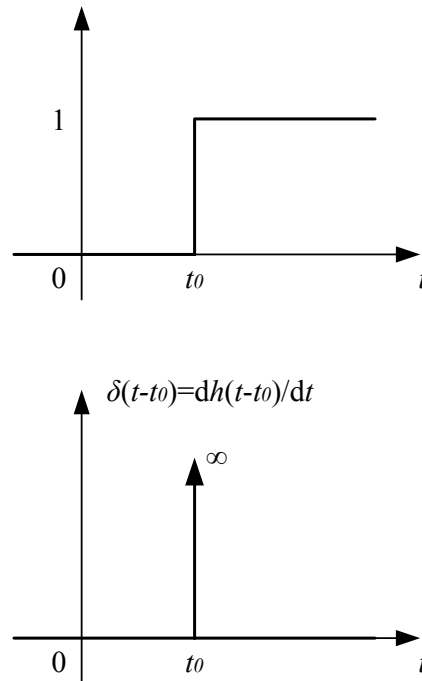
U izrazu (4. 4.) $\delta(t)$ je Dirakova delta funkcija, čija je vrednost u trenutku nula beskonačna a u ostalim vremenskim trenucima nula. S obzirom da struja ne može biti beskonačno velika, napon na kondenzatoru se ne može trenutno povećati.

Prethodno razmatranje se može primeniti i na trenutno smanjivanje vrednosti napona kondenzatora. Zaključak je isti, odnosno trenutna promena nije moguća. Izuzetak čini neregularno pražnjenje. Naime, prilikom pražnjenja napunjenog kondenzatora, priključci kondenzatora se mogu kratko vezati i kondenzator nasilno trenutno isprazniti (rasteretiti). U nekim slučajevima ovo može dovesti do razaranja kondenzatora. Ukoliko je kondenzator neznatno napunjen, javiće se varnica prilikom trenutnog pražnjenja, koja zapravo predstavlja Dirakov impuls.



Slika 4. 3. Hevisajdova funkcija $h(t)$ i njen izvod Dirakova delta funkcija $\delta(t)$

U opštem slučaju, promena (komutacija) se ne mora desiti u trenuku nula, već u proizvoljnom vremenskom trenutku t_0 . Ovim uopštavanjem se ništa značajno ne dobija, s obzirom da se bilo koji trenutak može proglasiti za nulti.



Slika 4. 3. Zakašnjena (za vremenski interval t_0) Hevisajdova funkcija $h(t-t_0)$ i njen izvod zakašnjena Dirakova delta funkcija $\delta(t-t_0)$

Energija kondenzatora

Polazeći od izraza za energiju (videti deo Elektrostatika):

$$W = \frac{1}{2} Q \cdot U \quad (4. 7.)$$

i imajući u vidu da je kapacitivnost kondenzatora:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (4. 8.)$$

lako je naći energiju kondenzatora:

$$W = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (4. 9.)$$

U izrazima (4. 7.) – (4. 10) W je energija kondenzatora, Q naelektrisanje elektrode kondenzatora, U napon između elektroda kondenzatora a C kapacitivnost kondenzatora. Izraz (4. 10.) predstavlja elektrostatičku energiju kondenzatora

kapacitivnosti C , na čijim krajevima je napon U . Kondenzator može akumulirati elektrostatičku energiju.

Ukoliko se napon na kondenzatoru menja u toku vremena, menja se i energija tog kondenzatora u toku vremena.

Energija (elektrostatička) kondenzatora u trenutku t je:

$$W_C(t) = \frac{1}{2} C \cdot (u_C(t))^2 \quad (4. 10.)$$

Analizom poslednjeg izraza se lako može potvrditi već izveden zaključak da napon na kondenzatoru ne može trenutno da se promeni. Naime, ukoliko bi se napon menjao trenutno, i energija bi se menjala trenutno ($1/2$ i C u izrazu za energiju (4. 10.) su konstante). Trenutna promena energije nije moguća. To znači da se ni napon na kondenzatoru ne može trenutno menjati.

Osobina memorisanja

Kondenzator je sposoban da akumulira i čuva energiju. Kondenzator ima osobinu memorisanja, s obzirom da čuva energiju, odnosno da zadržava napon (kondenzator je moguće napuniti i ukloniti iz kola; napon na njegovim krajevima će ostati nepromenjen).

Ponašanje kondenzatora u toku prelazne pojava u kolu stalne jednosmerne struje

Dodavanjem (vezivanjem) neopterećenog ili samo delimično opterećenog kondenzatora u električno kolo u kome postoje izvori, kondenzator se može napuniti. U procesu punjenja kondenzator akumulira energiju. Priraštaj energije kondenzatora u ovom slučaju je pozitivan.

Vezivanjem opterećenog kondenzatora za otpornu mrežu ili otpornik, kondenzator se može isprazniti (rasteretiti). U procesu pražnjenja, kondenzator gubi, troši akumuliranu energiju na zagrevanje otpornika. Priraštaj energije kondenzatora u ovom slučaju je negativan.

Punjenje i pražnjenje kondenzatora traje izvesno vreme. U toku ovih procesa, koji predstavljaju prelazne pojave, dolazi do preraspodele energije između komponenata koje su ostale u kolu, odnosno koje su u novonastalom kolu. Ova preraspodela nije trenutna.

S obzirom da se u toku prelazne pojave napon kondenzatora menja u toku vremena, kroz kondenzator protiče struja koja je jednaka proizvodu kapacitivnosti kondenzatora i izvodu napona kondenzatora po vremenu (jednakost (4. 1.)). Znači, u toku prelazne pojave koja se odvija u kolu jednosmerne struje, kondenzator se ne ponaša kao otvorena veza.

❖ Zadatak

Kondenzator kapacitivnosti C , zatvaranjem prekidača P , vezuje se na naponski izvor napona E i unutrašnje otpornosti R . Odrediti: a) napon i struju kondenzatora u toku prelazne pojave koja se odvija u kolu po zatvaranju prekidača; b) priraštaj elektrostatičke energije kondenzatora između dva ustaljena režima. Pretpostaviti da je kondenzator pre zatvaranja prekidača bio neopterećen.

Rešenje je dato na predavanjima.

❖ Zadatak

Kondenzator kapacitivnosti C , zatvaranjem prekidača P , vezuje se na naponski izvor napona E i unutrašnje otpornosti R . Odrediti: a) napon i struju kondenzatora u toku prelazne pojave koja se odvija u kolu po zatvaranju prekidača; b) priraštaj elektrostatičke energije kondenzatora između dva ustaljena režima. Pretpostaviti da je kondenzator pre zatvaranja prekidača bio napunjen na napon $E/2$.

Rešenje je dato na predavanjima.

❖ Zadatak

Kondenzator kapacitivnosti C , zatvaranjem prekidača P , vezuje se na otpornik otpornosti R . Odrediti: a) napon i struju kondenzatora u toku prelazne pojave koja se odvija u kolu po zatvaranju prekidača; b) priraštaj elektrostatičke energije kondenzatora između dva ustaljena režima. Pretpostaviti da je kondenzator pre zatvaranja prekidača bio napunjen na napon U .

Rešenje je dato na predavanjima.

Kalem

Veza između napona i struje kalema

Veza između napona i struje kalema je:

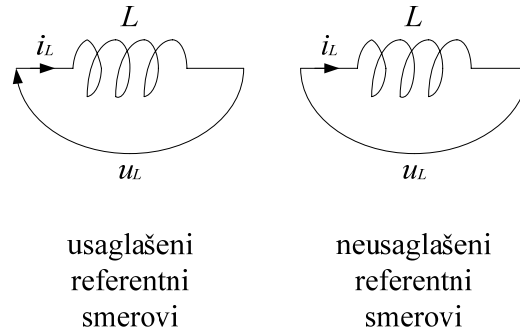
$$u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (4. 11.)$$

U izrazu (4. 11.) u_L je napon, L induktivnost i_L strujakalema. Prethodni izraz **važi za usaglašene referentne smerove napona i struje kalema.**

Ukoliko su referentni smerovi napona i struje neusaglašeni, onda je:

$$u_L = -L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (4. 12.)$$

Na slici 4. 4. prikazani su usaglašeni i neusaglašeni referentni smerovi napona i struje na kalem.



Slika 4. 4. Usaglašeni i neusaglašeni referentni smerovi napona i struje na kalem

Kalem u kolu stalne jednosmerne struje u ustaljenom režimu

U kolu stalne jednosmerne struje, u ustaljenom režimu, kalem se ponaša kao kratak spoj. Naime, u kolu stalne jednosmerne struje, u ustaljenom režimu, struja kroz sve komponente, pa i kroz kalem je konstantna. Ukoliko je $i_L = I_L = \text{const.}$, iz relacije (4. 11.) se dobija:

$$u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} = L \cdot \frac{dI_L}{dt} = C \cdot 0 = 0 \quad (4. 13.)$$

Napon nula znači kratak spoj.

Kontinualne promene struje kalema

Struja kalema ne može trenutno (skokovito) da se promeni. U dva izuzetno bliska vremenska trenutka t^+ i t^- struja kalema je ista:

$$i_L(t^-) = i_L(t^+) \quad (4. 14.)$$

Ukoliko bi struja kalema mogla trenutno da se promeni, onda bi takva trenutna promena matematički mogla da se prikaže proizvodom skokovitog priraštaja struje (npr. sa 0 na I), koji se dešava u nekom nultom trenutku vremena i jedinične (Hevisajdove) funkcije $h(t)$. S obzirom da je veza između napona i struje kalema data izrazom (4. 11.), i da je izvod Hevisajdove funkcije Dirakov impuls (Dirakova funkcija) $\delta(t)$, za trenutnu promenu struje kalema bi trebalo obezbediti beskonačno veliki napon:

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} = L \cdot \frac{d(I \cdot h(t))}{dt} = C \cdot I \cdot \frac{dh(t)}{dt} = C \cdot I \cdot \delta(t) = \infty \quad (4. 15.)$$

S obzirom da napon ne može biti beskonačno veliki, struja kalema se ne može trenutno promeniti.

Energija kalema

Kalem može akumulirati elektromagnetnu energiju. Energija (elektromagnetna) kalema induktivnosti L , kroz koji protiče struja I , je:

$$W = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad (4. 16.)$$

Ukoliko se struja kalema menja u toku vremena, menja se i energija tog kalema u toku vremena.

Energija (elektromagnetna) kalema u trenutku t je:

$$W_L(t) = \frac{1}{2} L \cdot (i_L(t))^2 \quad (4. 17.)$$

Analizom poslednjeg izraza se lako može potvrditi već izveden zaključak da struja kalema ne može trenutno da se promeni. Naime, ukoliko bi se struja menjala trenutno, i energija bi se menjala trenutno ($1/2$ i L u izrazu za energiju (4. 17.) su konstante). Trenutna promena energije nije moguća. To znači da se ni struja kalema ne može trenutno menjati.

Kalem je sposoban da akumulira i čuva energiju.

Ponašanje kalema u toku prelazne pojava u kolu stalne jednosmerne struje

Dodavanjem (vezivanjem) kalema u električno kolo u kome postoje izvori, kroz kalem počinje da protiče struja i on akumulira energiju. Priraštaj energije kalema u ovom slučaju je pozitivan.

Prevezivanjem kalema na otpornu mrežu ili otpornik (bez izvora), kalem može potrošiti akumuliranu energiju. U ovom procesu kalem gubi, troši akumuliranu energiju na zagrevanje otpornika. Priraštaj energije kalema u ovom slučaju je negativan.

Akumuliranje i trošenje energije kalema traje izvesno vreme. U toku ovih procesa, koji predstavljaju prelazne pojave, dolazi do preraspodele energije između komponenata koje su ostale u kolu, odnosno koje su u novonastalom kolu. Ova preraspodela nije trenutna.

S obzirom da se u toku prelazne pojave kalema menja u toku vremena, napon na kalemu jednak je proizvodu induktivnosti kalema i izvodu struje kalema po vremenu (jednakost (4. 11.)). Znači, u toku prelazne pojave koja se odvija u kolu jednosmerne struje, kalem se ne ponaša kaokratak spoj.

❖ Zadatak

Kalem induktivnosti L , zatvaranjem prekidača P , vezuje se na naponski izvor napona E i unutrašnje otpornosti R . Odrediti: a) napon i struju kalema u toku prelazne pojave koja se odvija u kolu po zatvaranju prekidača; b) priraštaj elektromagnetne energije kalema između dva ustaljena režima.

Rešenje je dato na predavanjima.

Tabelarni prikaz nekih najvažnijih karakteristika kondenzatora i kalema

	Kondenzator kapacitivnosti C	Kalem induktivnosti L
Veza između napona i struje	$i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt}$	$u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$
U ustaljenom režimu u kolu stalne jednosmerne struje	otvorena veza	kratak spoj
Kontinualnost	$u_C(t^-) = u_C(t^+)$	$i_L(t^-) = i_L(t^+)$
Energija u trenutku t	$W_C(t) = \frac{1}{2} C \cdot (u_C(t))^2$	$W_L(t) = \frac{1}{2} L \cdot (i_L(t))^2$

Za kalem i kondenzator se kaže da su dualni elementi.

Trajanje prelaznih pojava

Teoretski, prelazne pojave traju beskonačno dugo. U praksi, prelazne pojave mogu trajati i relativno kratko, odnosno nekada se i posle nekog kraćeg vremenskog perioda teško mogu uočiti bilo kakve promene. Vremenska konstanta je parametar koji govori o brzini prelazne pojave.