

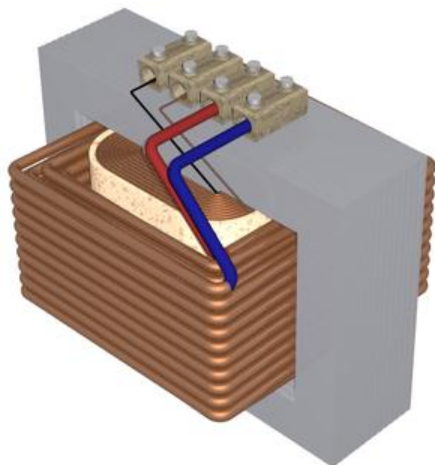
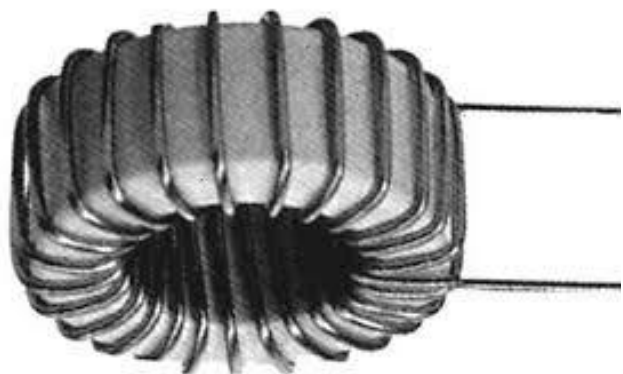
VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER,
BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: NET, ELITE.ASUV

PREDMET: ENERGETSKA ELEKTRONIKA



AKUMULACIONI ELEMENTI U KOLIMA ENERGETSKE ELEKTRONIKE- OSNOVE



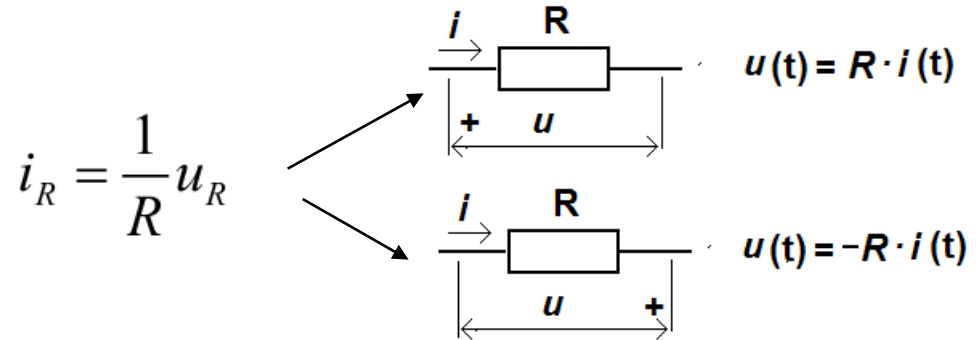
Predmetni profesor: Dr Željko Despotović

UVOD

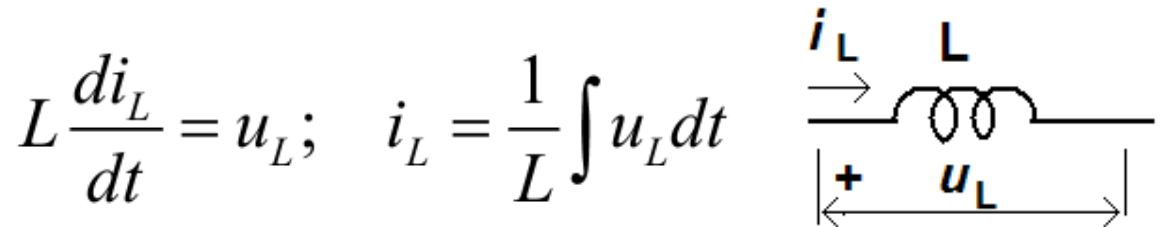
- Korišćenje i efikasnost uređaja energetske elektronike (u koje spadaju i elektroenergetski pretvarači) mogu biti značajno poboljšani razumevanjem prekidačkih karakteristika elemenata energetske elektronike (dioda, tiristora, trijaka, tranzistora,.....)
- Pošto u procesu pretvaranja energije pored prekidačkih elemenata učestvuju i akumulacioni elementi (induktivnosti, transformatori, kondenzatori i sl.) biće izložene njihovi osnovni principi rada i karakteristike, kako bi se bolje razumele topologije, upravljačka kola elektroenergetskih pretvarača i principi električnog pretvaranja energije u njima.
- Dva najbitnija akumulaciona elementa su INDUKTIVNOST (prigušnica) i KAPACITIVNOST (kondenzator)
- U nastavku detaljnije o ovim elementima

OSNOVNI ZAKONI KOJI SU NAM POTREBNI

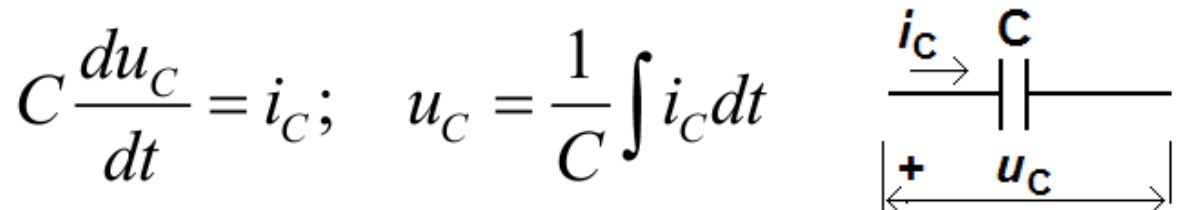
- OMOV ZAKON



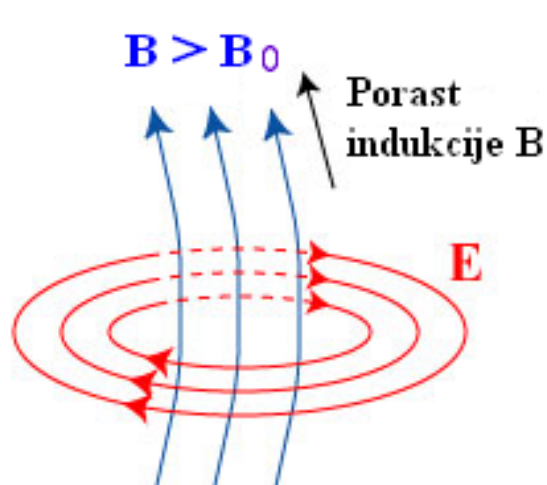
- FARADEJEV ZAKON
ELEKTROMAGNETNE
INDUKCIJE



- KULONOV ZAKON



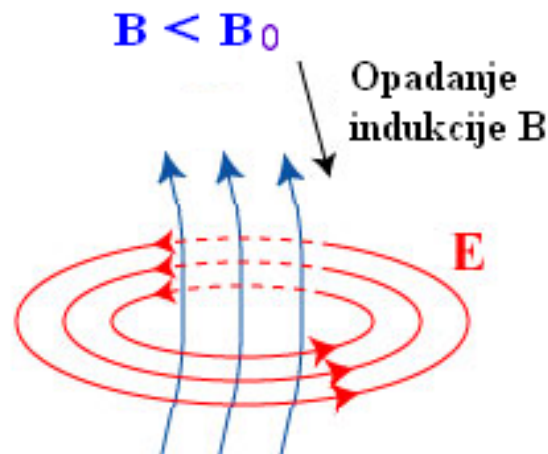
FARADEJEV ZAKON ELEKTROMAGNETNE INDUKCIJE (LENCOVO PRAVILO)



**indukovana
elektro motorna sila
(EMS)**

$$\mathbf{E} \sim \left(- \frac{\mathbf{B} - \mathbf{B}_0}{t - t_0} \right)$$

$$\mathbf{E} < 0$$



**indukovana
elektro motorna sila
(EMS)**

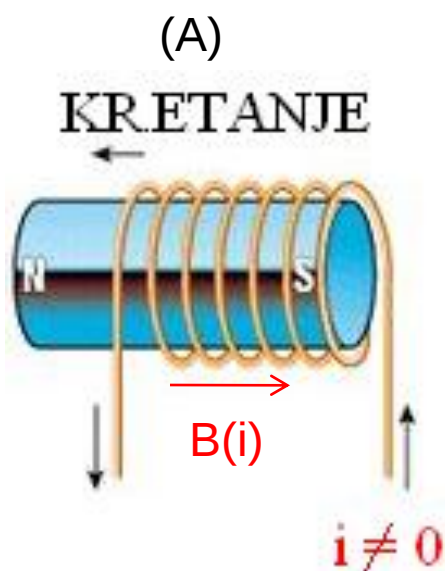
$$\mathbf{E} \sim \left(- \frac{\mathbf{B} - \mathbf{B}_0}{t - t_0} \right)$$

$$\mathbf{E} > 0$$

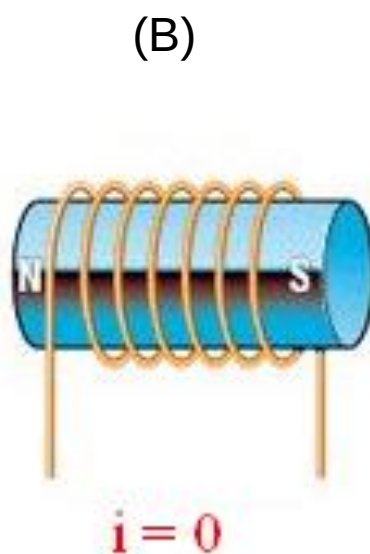
ZAKLJUČAK: Indukovana elektromotorna sila E , posledica izvornog magnetnog polja B prouzrokuje struju koja se svojim magnetnim poljem suprotstavlja promeni izvornog magnetnog polja B .

USTVARI NEMOGUĆE JE NAGLO PROMENITI MAGNETNI FLUKS!!!! OSOBINA INERCIJE ("TROMOSTI") FLUKSA

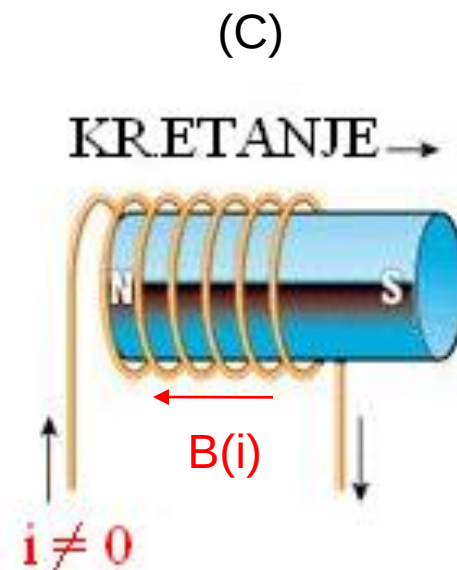
PRIMER: POMERANJE MAGNETA KROZ NAMOTAJE VAZDUŠNE PRIGUŠNICE



U ovom slučaju se indukovana struja suprotstavlja promeni (smanjenju) magnetnog fluksa u induktivnosti stoga je **indukovana struja različita od 0**



Nema pomeranja magnetu pa nema ni promene magnetnog fluksa kroz namotaje te je **indukovana struja jednaka 0**



U ovom slučaju se indukovana struja suprotstavlja promeni (povećanju) magnetnog fluksa u induktivnosti stoga je **indukovana struja različita od 0**, ali suprotnog smera u odnosu na slučaj (A)

INDUKTIVNOST KAO AKUMULACIONI ELEMENAT



- NEOBIČNO ZNAČAJAN AKUMULACIONI ELEMENAT U ENERGETSKOJ ELEKTRONICI JE INDUKTIVNOST (PRIGUŠNICA).

- ZA RAZUMEVANJA RADA POJEDINIH TOPOLOGIJA ENERGETSKIH PRETVARAČA JAKO JE BITNO SHVATITI MAGNETNU INERCIJU (“TROMOST”) OVOG AKUMULACIONOG ELEMENTA

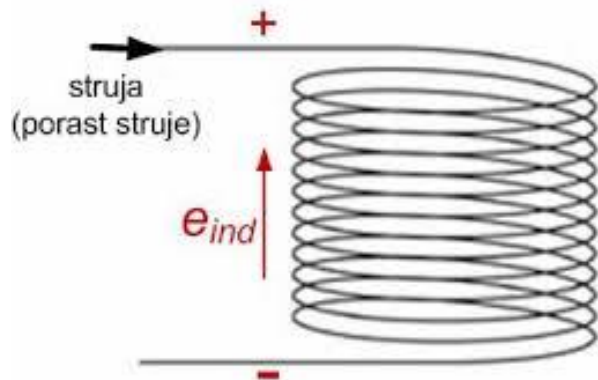
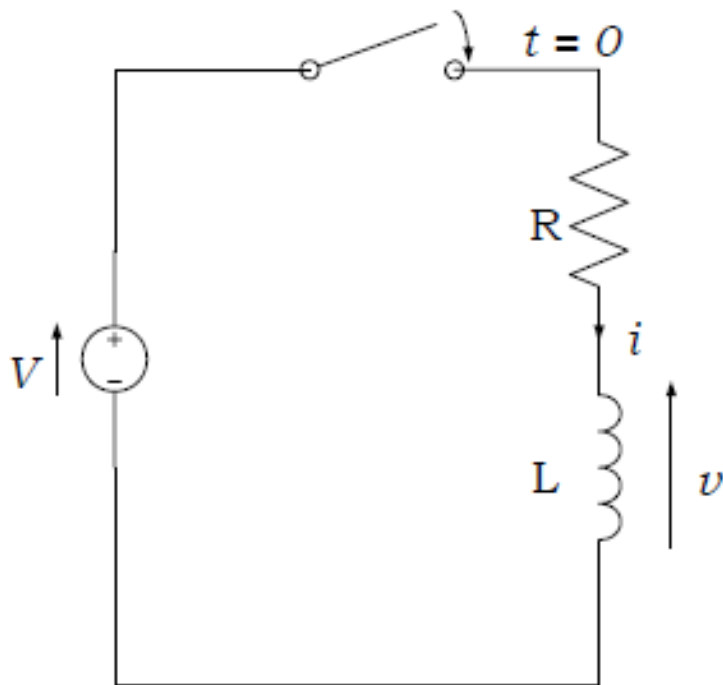
- U NASTAVKU ĆE BITI IZVRŠENA ANALIZA PONAŠANJA OVOG ELEMENTA

- IDEALNA INDUKTIVNOST (UNUTRAŠNJA OTPORNOST NULA)

- REALNA INDUKTIVNOST IMA NEKU KONAČNU VREDNOST OTPORNOSTI

- DAKLE PREDSTOJI DETALJNA ANALIZA ***R-L*** KOLA

POSMATRAJMO PRELAZNE POJAVE NA INDUKTIVNOSTI L KOJA IMA AKTIVNU OTPORNOST R



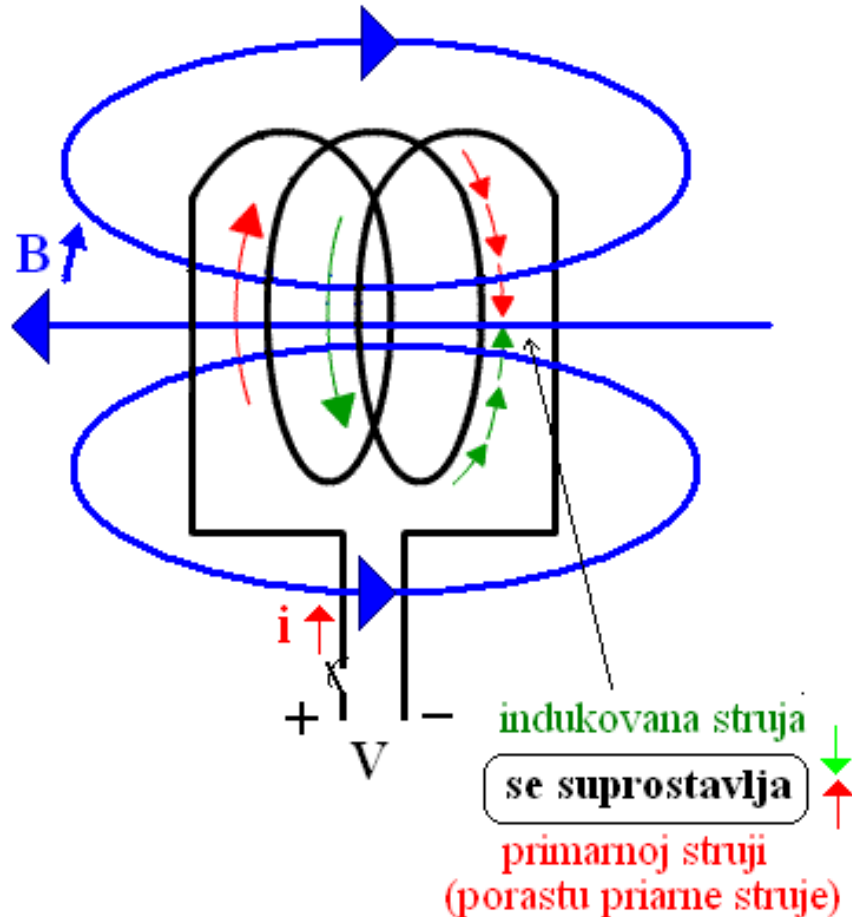
Svaka se realna induktivnost (prigušnica) može predstaviti kao redna veza aktivne otpornosti R i induktivnosti L .

*Ako dovedemo napon u kolu u kojem je vezana realna induktivnost (uključenjem prekidača) struja će od početne vrednosti $i=0$ do svoje stacionarne vrednosti $i = V/R$ tokom vremena menjati svoju vrednosti. **Koje su to vrednosti?***

Promena struje će indukovati napon samoindukcije, koji će se po Lenzovom zakonu suprotstavljati promeni struje, tj. usporavće njen porast.

Dakle **RL kolo** ima na početku uspostavljanja struje određenu magnetnu inerciju

MAGNETNO POLJE
KOJE POTIČE OD STRUJE i



→ **STRUJA IZ IZVORA
(PRIMARNA STRUJA)**

← **INDUKOVANA STRUJA**
posledica promene (porasta)
indukcije B magnetnog polja

**ŠTA SE USTVARI DEŠAVA U
PRIGUŠNICI UKLJUČENJEM
PREKIDAČA ???**

-SLUČAJ KADA SE USPOSTAVLJA
MAGNETNI FLUKS, ODNOSNO
MAGNETNA INDUKCIJA B

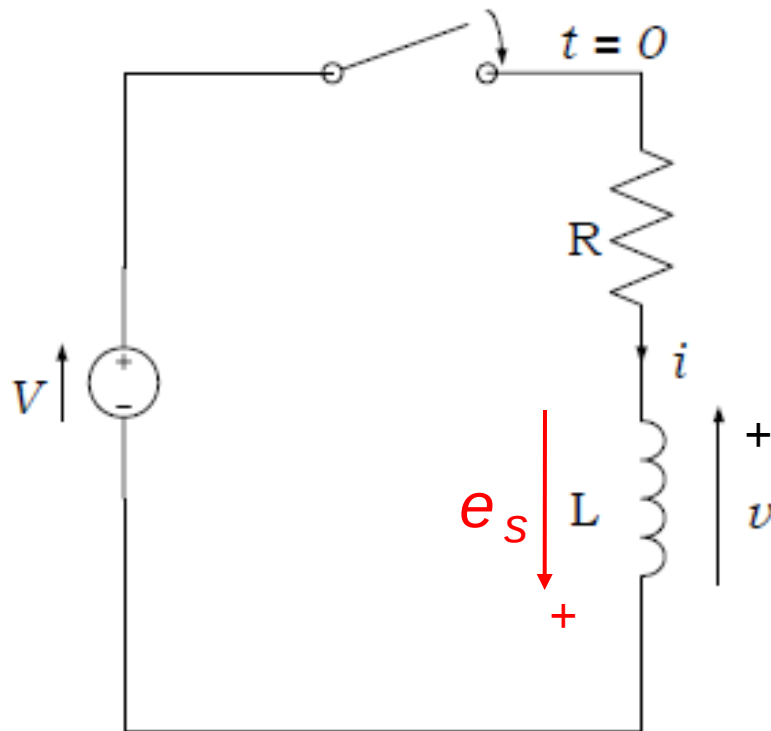
-USTVARI DOLAZI DO PORASTA
INDUKCIJE tj. $B \uparrow$

-**INDUKOVANA STRUJA** SE
SUPROSTAVLJA **PORASTU STRUJE**
IZ IZVORA (PRIMARNOJ STRUJI)

*Promena struje će indukovati napon
samoindukcije, koji će se po
Lenzovom zakonu suprotstavljati
promeni struje, tj. usporavaće njen
porast.*

ANALIZA RL KOLA

Primenom II Kirhofovog zakona se dobija:



$$e_s = - d\Phi/dt$$

Φ - fluks u induktivnosti

$$V + e_s = i \cdot R$$

$$V - L \frac{di}{dt} = i \cdot R$$

$$\frac{V}{R} - \frac{L}{R} \cdot \frac{di}{dt} = i$$

$$I - i = \tau \frac{di}{dt}$$

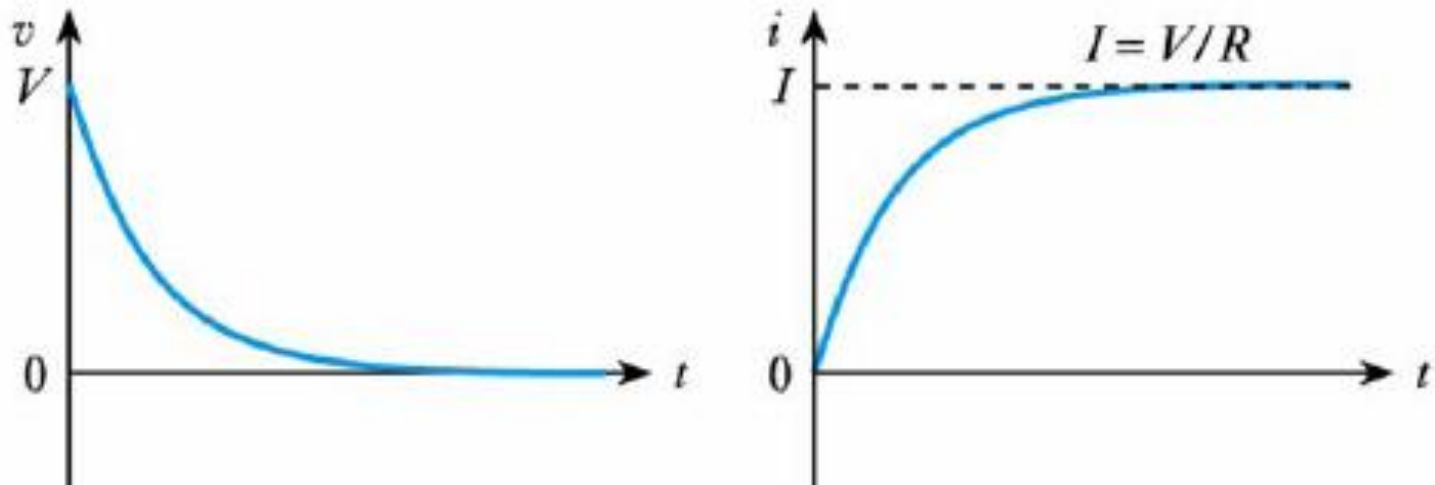
V/R je konačna (stacionarna) vrednost struje, a L/R je veličina koja ima dimenzije vremena, pa se zove vremenska konstanta kola i označava se τ

Rešenje diferencijalne jednačine

$$I - i = \tau \frac{di}{dt}$$

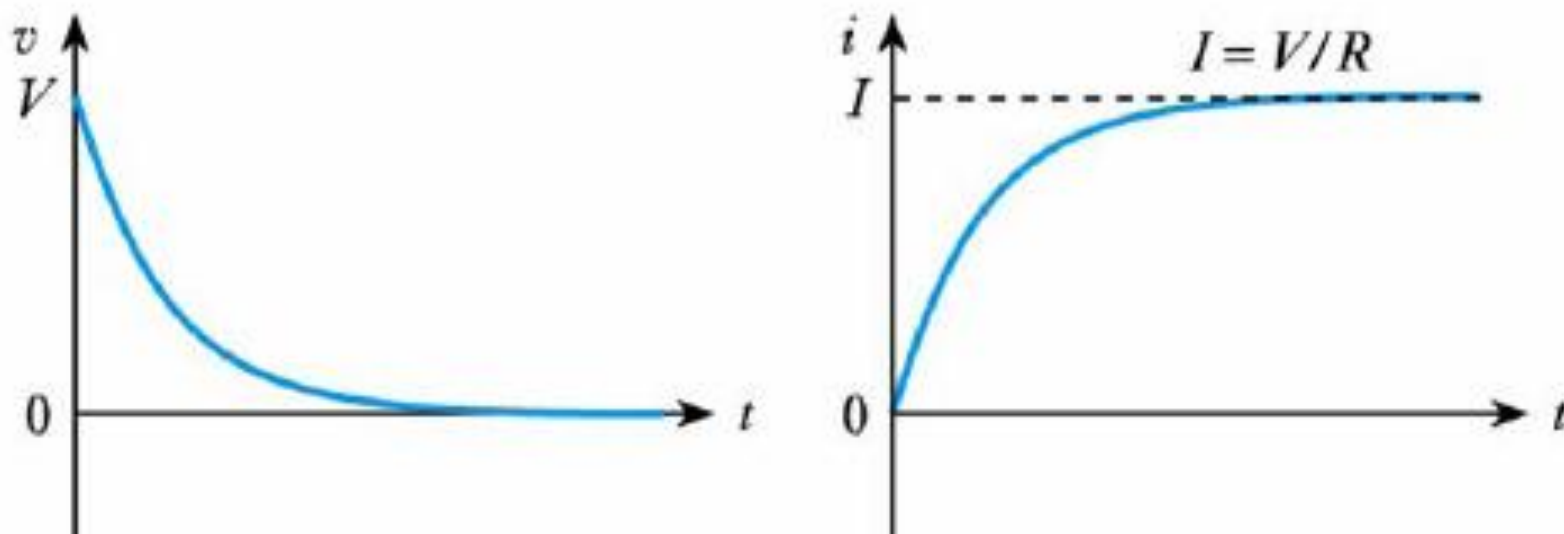
uz uslov $i=0$ za $t=0$, daje vrednost struje (inače se ona naziva promenljiva stanja):

$$i = I \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$



Napon i struja induktivnosti (prigušnice) nakon uključenja prekidača

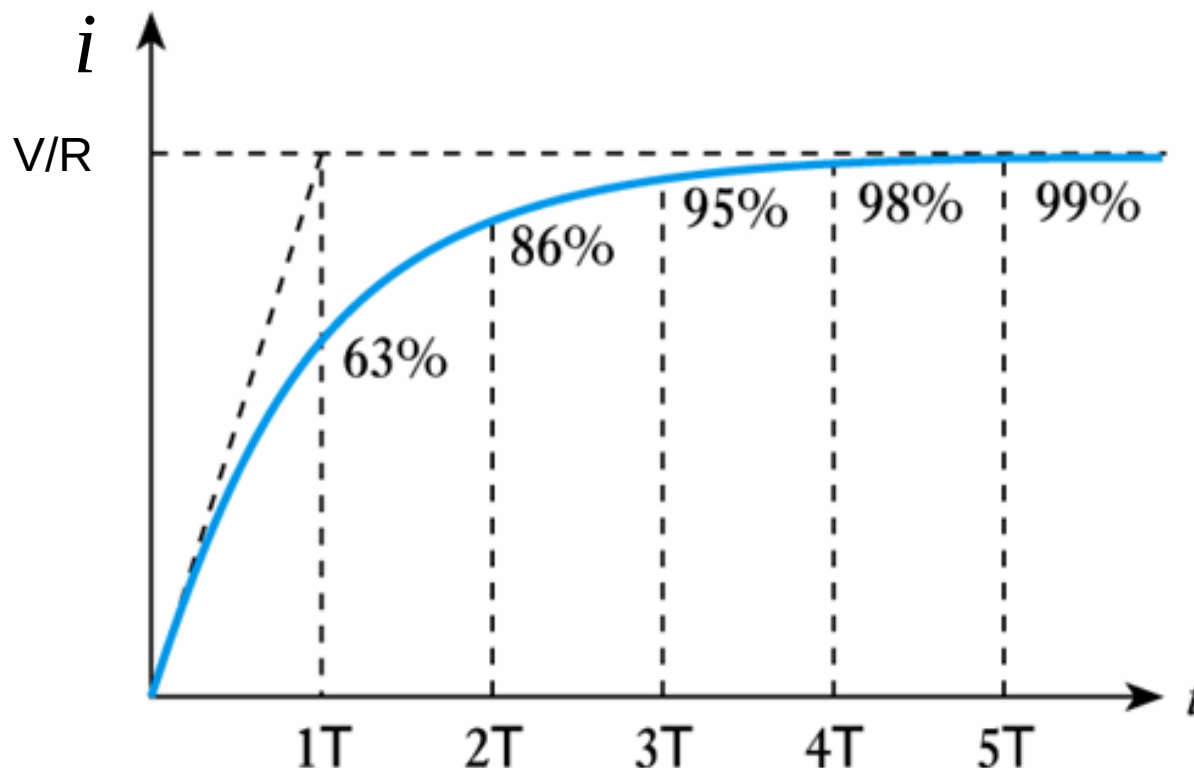
Istovremeno sa povećanjem struje u induktivnosti, dolazi do pada napon na njoj, od maksimalnog iznosa V prema nuli, koju postiže u stacionarnom stanju, kad kroz induktivnost teče konstantna struja $I=V/R$



ZAKLJUČAK: U ustaljenom stanju, kada je uspostavljena struja V/R kroz induktivnost, napon na njoj je jednak nuli:

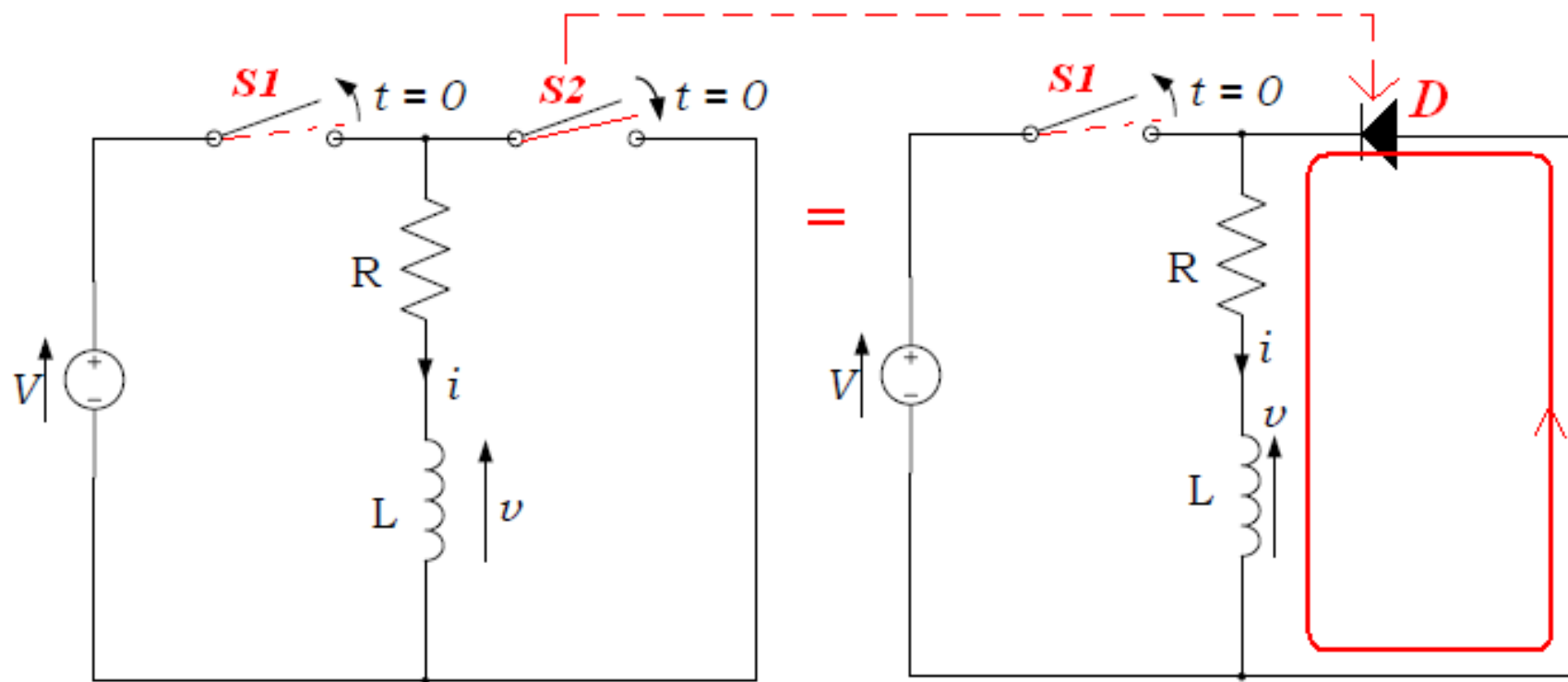
$$\frac{di_L}{dt} = 0 \Rightarrow i_L = \text{const}$$

Jačina struje raste u induktivnosti po eksponencijalnom zakonu. Za vreme jedne vremenske konstante ($t=\tau$) struja postigne 63% svoje konačne vrednosti V/R . Ta vrednost stacionarnog stanja praktično se postiže već nakon vremena od 4 do 5 vremenskih konstanti.

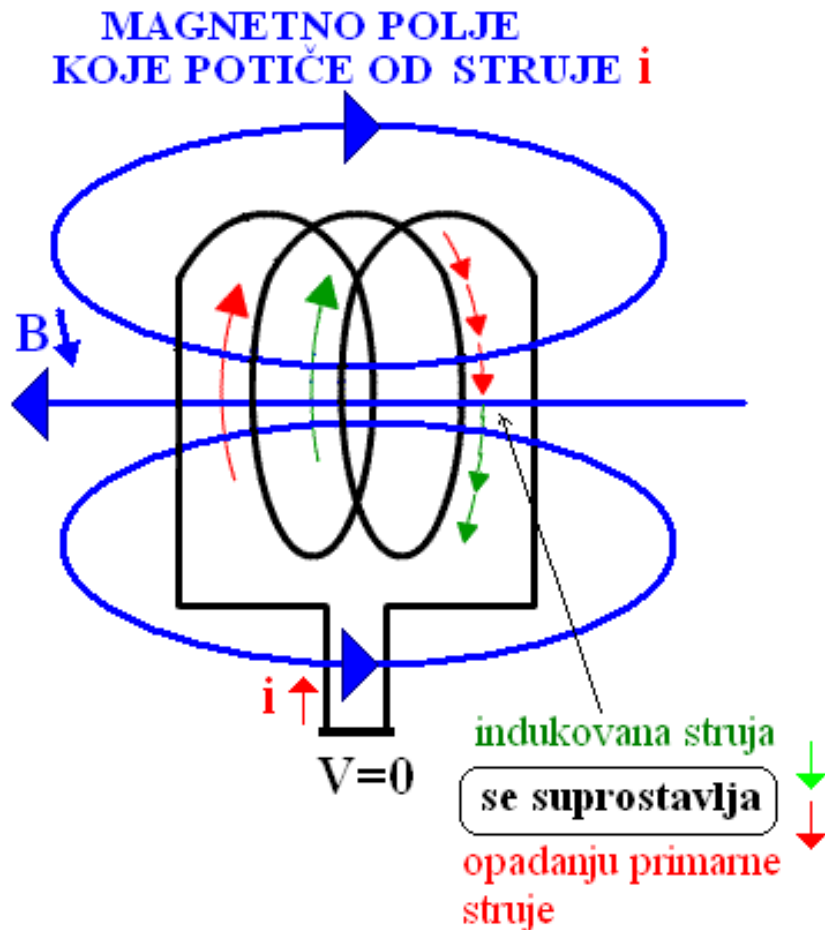


ŠTA ĆE SE DESITI KADA POKUŠAMO DA PREKINEMO USPOSTAVLJENU STACIONARNU VREDNOST STRUJE V / R ?

Prekidanje stacionarne vrednosti struje $I=V/R$, otvaranjem prekidača $S1$ u kolu napajanja iz izvora V i zatvaranjem prekidača $S2$, odnosno kratkim spajanjem induktivnosti L , R .



Ekvivalentno kolo kojim je ovo moguće postići je kolo sa idealno diodom D . Idealna dioda (pad napona u stanju vođenja je jednak 0) u ovom kolu ima prekidačku ulogu. Otvaranjem prekidača $S1$, nagomilana elektromagnetna energija iz induktivnosti se prazni preko diode D kroz unutrašnju otpornost R .



→ STRUJA KOJA SE "ZALETELA" U INDUKTIVNOSTI

→ INDUKOVANA STRUJA
posledica promene (opadanja)
indukcije B magnetnog polja

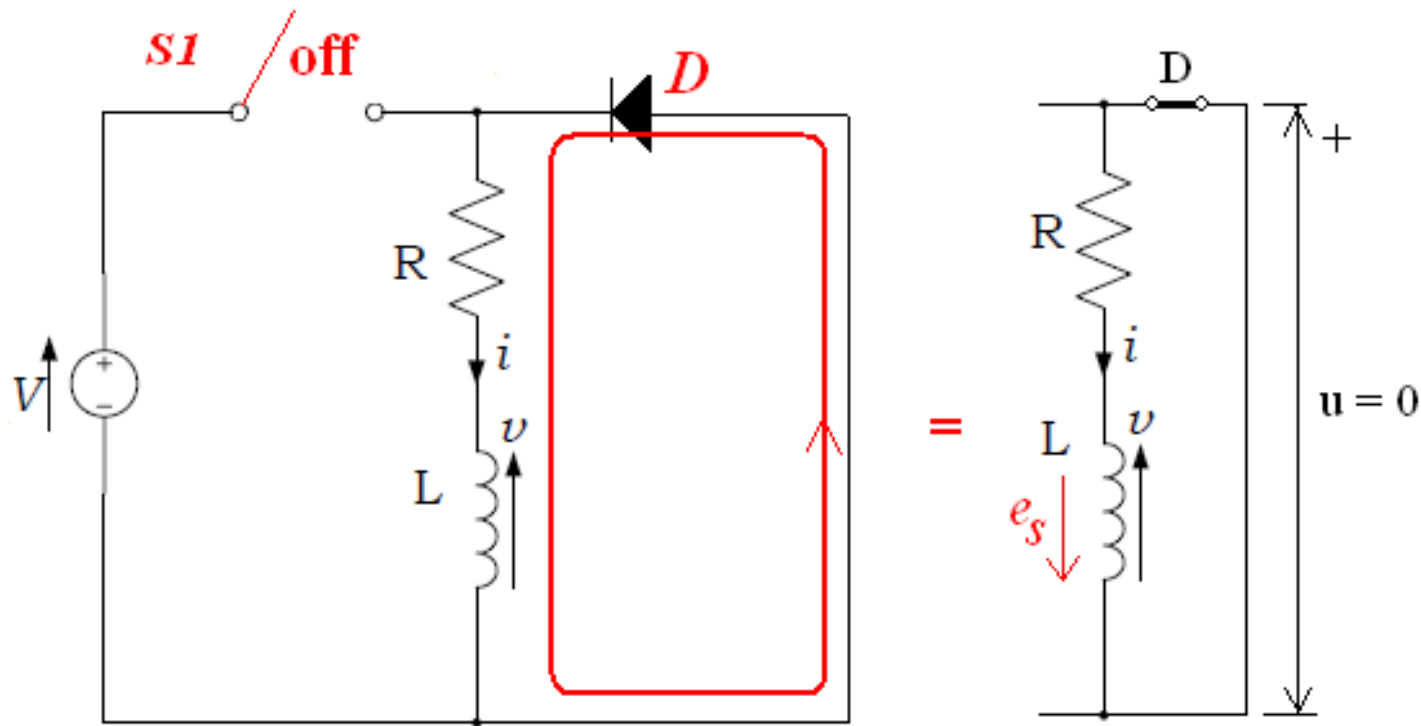
ŠTA SE USTVARI DEŠAVA U PRIGUŠNICI ISKLJUČNjem PREKIDAČA S1 A UKLJUČENJEM PREKIDAČA S2 ???

-SLUČAJ KADA DOLAZI DO OPADANJA MAGNETNOG FLUKSA , ODNOSNO MAGNETNAE INDUKCIJE B

-USTVARI DOLAZI DO SMANJENJA INDUKCIJE tj. $B \downarrow$

-INDUKOVANA STRUJA SE SUPROSTAVLJA OPADANJU STRUJE U INDUKTIVNOSTI (KOJA JE SADA PRIMARNA STRUJA)

Promena struje će indukovati napon samoindukcije, koji će se po Lenzovom zakonu suprotstavljati promeni struje, tj. usporiće njeno opadanje.



Zatvaranjem $S2$ (ili provođenjem diode) struja mora pasti na nulu. Promene struje neizbežne pri smanjivanju stacionarne vrednosti $I = V/R$ na *stacionarnu vrednost* $i=0$, usled napona samoindukcije, čiji je smer po Lenzovom zakonu takav da se suprotstavlja promeni, tj. nastoji održati dotadašnju struju.

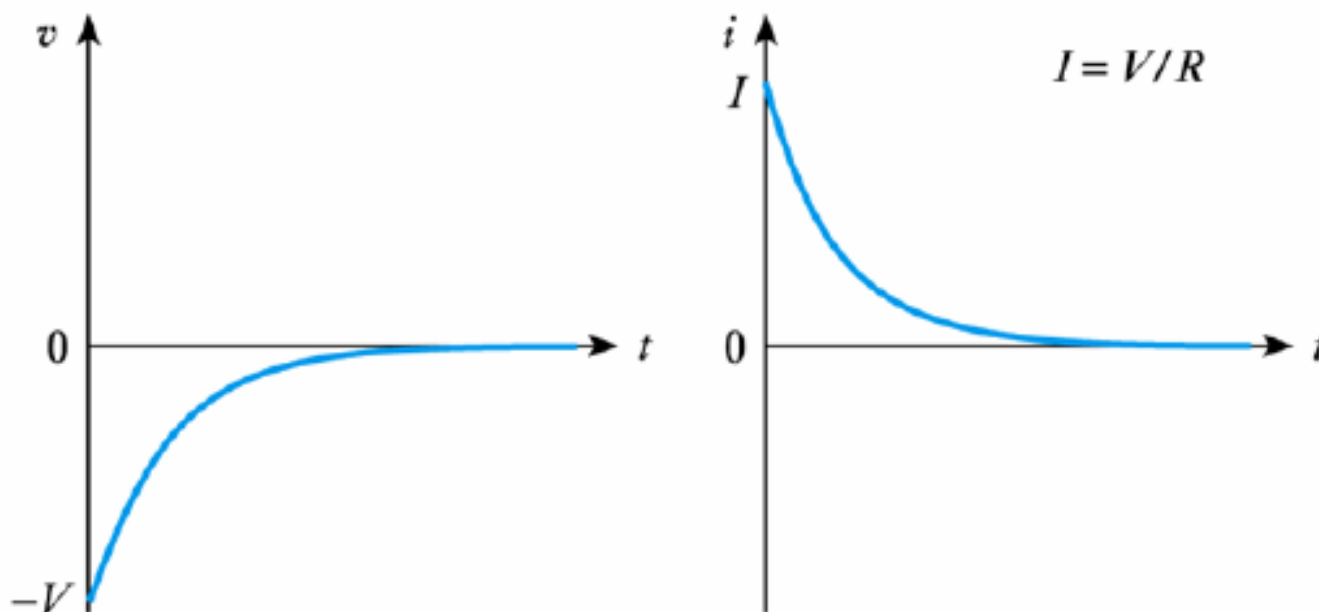
$$\begin{array}{l}
 V + e_s = i \cdot R \\
 V - L \frac{di}{dt} = i \cdot R
 \end{array}
 \xrightarrow{V=0}
 0 - L \frac{di}{dt} = i \cdot R$$

REŠAVANJE DIFERENCIJALNE JEDNAČINE

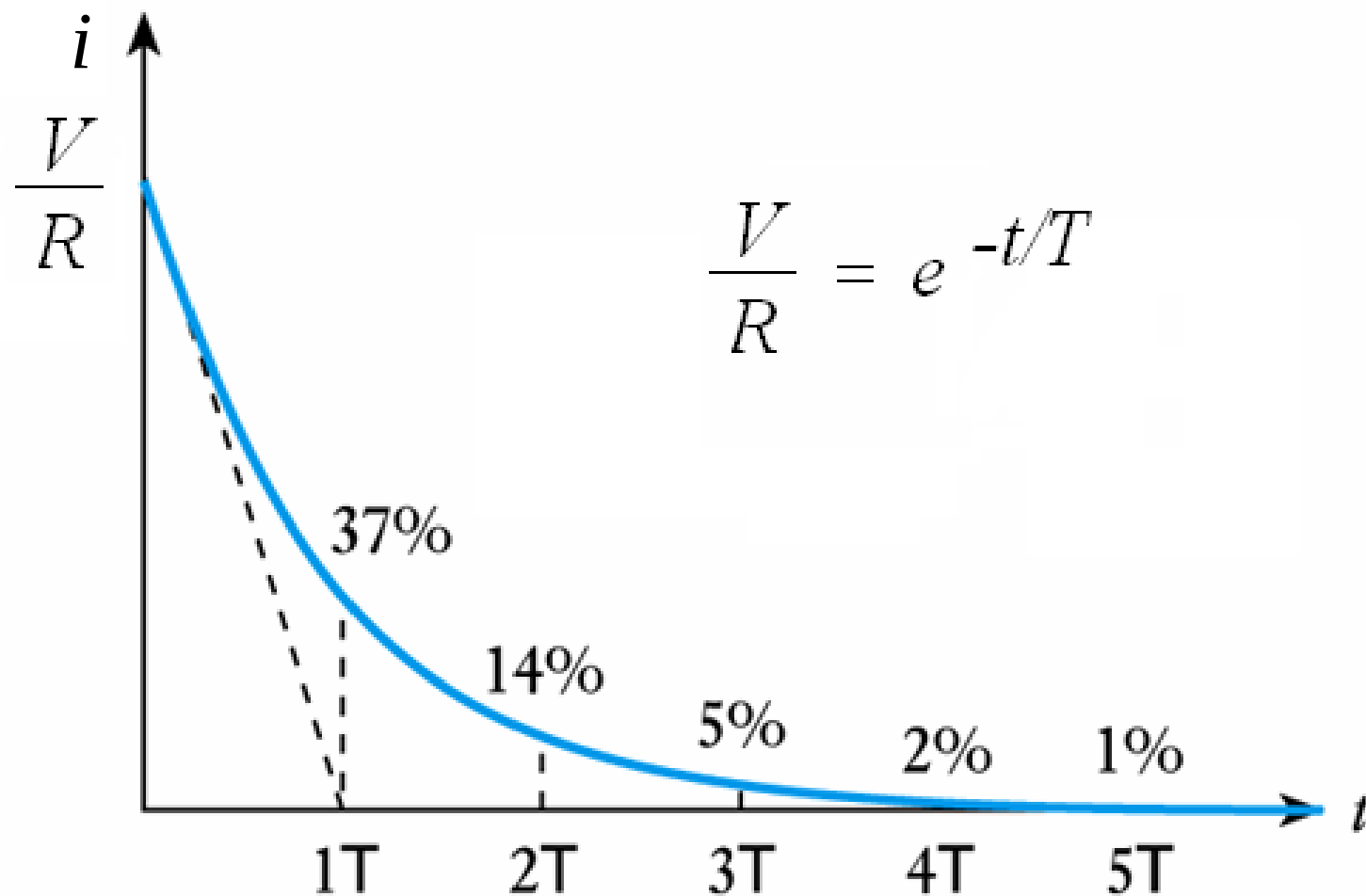
$$0 - L \frac{di}{dt} = i R$$

uz početne uslove: $t=0$ $i=I$

$$i = I e^{-t/\tau}$$



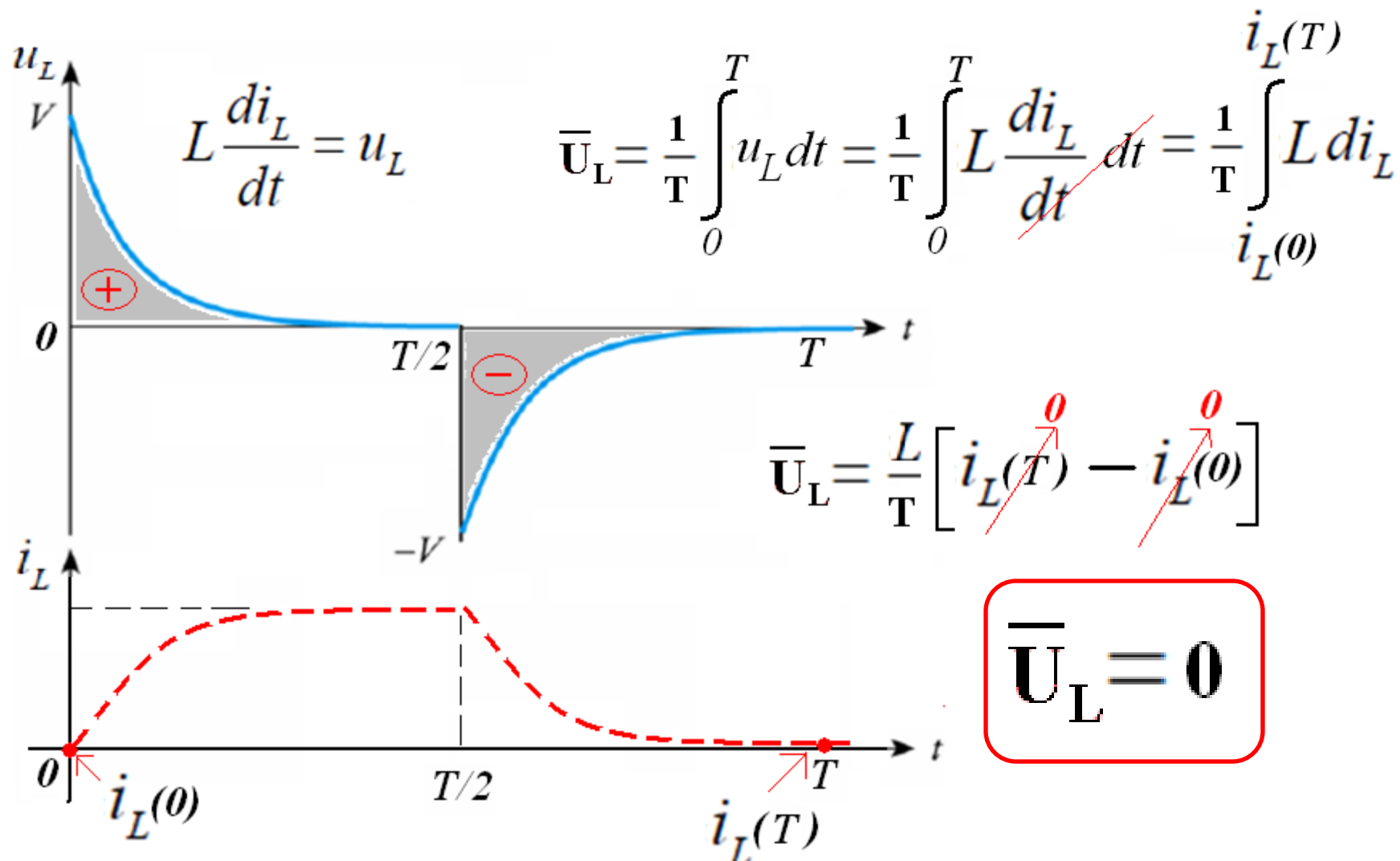
Struja dakle eksponencijalno opada do beskonačnosti (praktično nakon 4-5 T).
Brzina opadanja zavisi i u ovom slučaju od vremenske konstante T .



Jačina struje opada u induktivnosti po eksponencijalnom zakonu. Za vreme jedne vremenske konstante ($t = \tau = T$) struja opadne na 37% svoje početne vrednosti. Vrednost stacionarnog stanja (struja jednaka 0) praktično se postiže već nakon vremena od 4-5T.

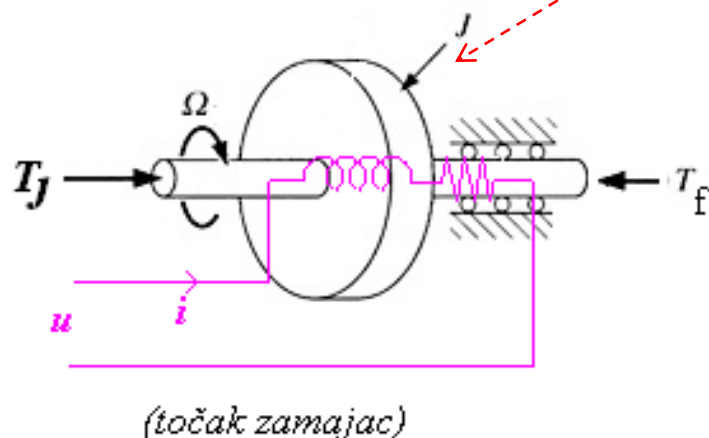
VEOMA VAŽAN ZAKLJUČAK ZA NAPON NA INDUKTIVNOSTI!!!!

SREDNJA VREDNOST NAPONA NA INDUKTIVNOSTI JE JEDNAKA NULI!!!!



SLEDI DRUGI VEOMA VAŽAN ZAKLJUČAK ŠTO SE MAGNETNE INERCIJE INDUKTIVNOSTI TIČE:

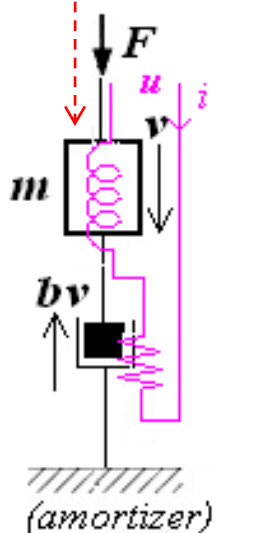
ZAKLJUČUJE SE DA ZBOG PRISUSTVA INDUKTIVNOSTI U STRUJNOM KOLU, SAMO STRUJNO KOLO POKAZUJE IZRAŽENU **INERCIJU ("TROMOST")** PRI SVAKOJ PROMENI STRUJE (I PRI PORASTU I PRI OPADANJU STRUJE). POMENUTA INERCIJA ODGOVARA MEHANIČKOJ.



$$T_J = J \frac{d\Omega}{dt} + K\Omega$$

$$E_k = \left(\frac{J}{2}\right) \Omega^2$$

vremenska
konstanta $\tau = \frac{J}{K}$



$$F = m \frac{dv}{dt} + bv$$

$$E_k = \left(\frac{m}{2}\right) v^2$$

vremenska
konstanta $\tau = \frac{m}{b}$



$$V = L \frac{di}{dt} + Ri$$

$$E_k = \left(\frac{L}{2}\right) i^2$$

vremenska
konstanta $\tau = \frac{L}{R}$

INDUKTIVNOST KAO STRUJNI IZVOR (STRUJNI PONOR)

- Pod određenim uslovima induktivnost se može približno ponašati strujni izvor odnosno strujni ponor
- Ova osobina naročito dolazi do izražaja pri relativno velikim vrednostima induktivnosti
- Na oblik struje kroz induktivnost utiču talasni oblik primenjenog napona i njegova učestanost
- Koje su to kritične vrednosti induktivnosti i učestanosti iznad kojih se induktivnost ponaša kao strujni izvor (strujni ponor)?
- Ova osobina induktivnosti ima veliki značaj, u shvatanju rada topologija energetske pretvarača
- Veoma bitna osobina je neprekidnost struje kroz induktivnost (struja se ne može naglo menjati)
- Nagla promena je moguća samo primenom jako velikih vrednosti napona
- Vrednosti napona su određene ograničenjima (preskok varnice, proboj izolacije i sl....)

NEPREKIDNOST STRUJE INDUKTIVNOSTI

Osobina neprekidnosti struje kroz induktivnost

$$L \frac{di_L}{dt} = u_L$$

-Kada je na induktivnosti konačne vrednosti L primenjena konačna vrednost napona u_L tada **porast struje**

$\frac{di_L}{dt}$ **može biti samo konačan!!!!**


$$di/dt \neq \infty$$

OVO USTVARI ZNAČI DA STRUJA NA INDUKTIVNOSTI NE MOŽE DA SE MENJA NAGLO (**NEPREKIDNOST STRUJE KROZ INDUKTIVNOST**)

Nagla promena struje bi se teoretski mogla postići primenom jako velikih vrednosti napona u_L , odnosno pri $u_L \longrightarrow \infty$. U realnosti to nije moguće ostvariti.

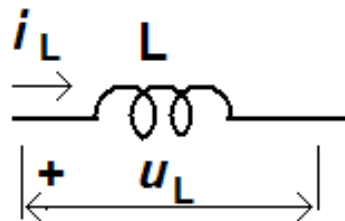
KAKO INDUKTIVNOST UTIČE NA PORAST STRUJE, ODNOSNO ŠTA ĆE SE DESITI SA PORASTOM STRUJE KADA JE INDUKTIVNOST BLISKA NULI, A ŠTA KADA ONA TEŽI VRLO VELIKOJ VREDNOSTI (TEORETSKI BESKONAČNOJ)??

DA BI ODGOVORILI NA OVO PITANJE MORAMO POSMATRATI ČLAN **$1/L$**

I. SLUČAJ KADA SU VREDNOSTI INDUKTIVNOSTI MALE (TEORETSKI $L \rightarrow 0$)

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} u_L$$

posmatrajmo
ovaj član



Za konačnu proizvoljnu vrednost napona u_L

i pri jako maloj vrednosti induktivnosti L

TEORETSKI $L \rightarrow 0$ ODNOSNO:

$$\frac{1}{L} \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{di_L}{dt} \rightarrow \infty$$

$$\frac{di_L}{dt} \rightarrow \infty \Rightarrow \dot{i}_L \neq \text{const}$$

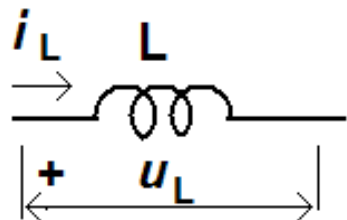
DRUGIM REČIMA ZA PROIZVOLJNU VREDNOST NAPONA NA KRAJEVIMA INDUKTIVNOSTI, STRUJA KOJA SE IMA KROZ NJU NIJE KONSTANTNA!!!! ODNOSNO ONA MOŽE DA SE NAGLO MENJA!!!

A graph showing a step function for current i_L versus time t . The current is zero until a certain point, then it jumps abruptly to a constant value. Below the graph, the text $di/dt = \infty$ is written, indicating that the rate of change of current is infinite at the point of the jump.

II. SLUČAJ KADA VREDNOSTI INDUKTIVNOSTI VELIKE (TEORETSKI $L \rightarrow \infty$)

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} u_L$$

posmatrajmo
ovaj član



Za konačnu proizvoljnu vrednost napona u_L

i pri jako velikoj vrednosti induktivnosti L

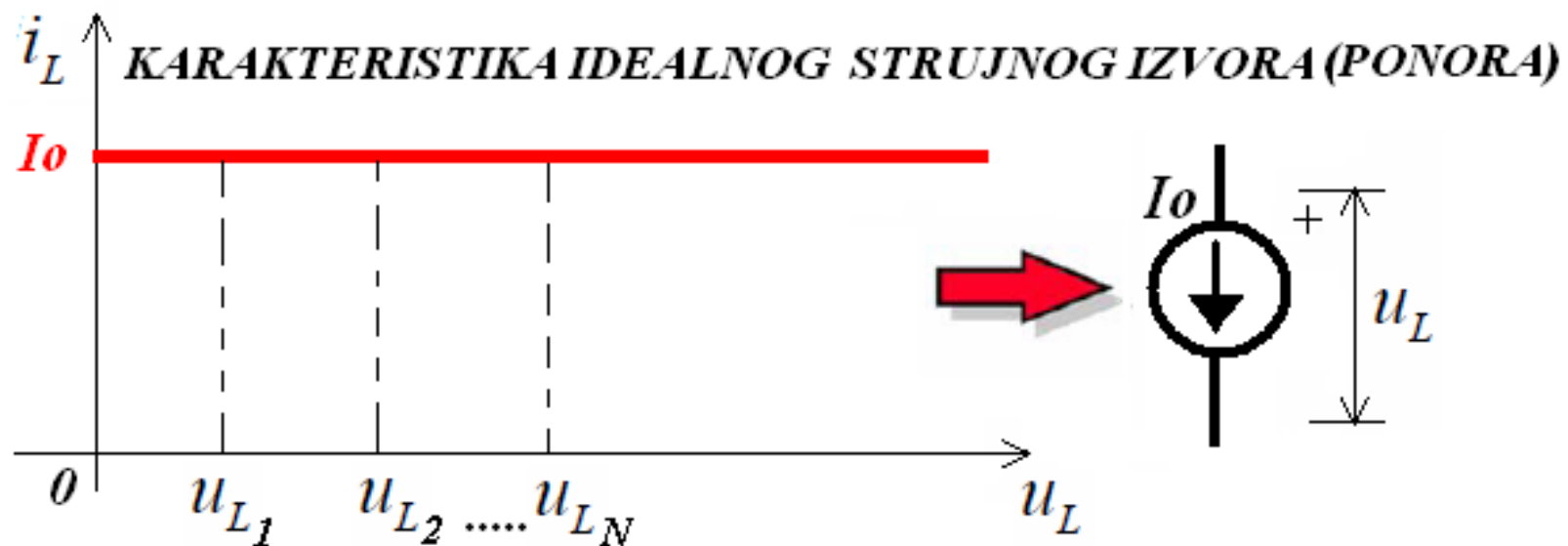
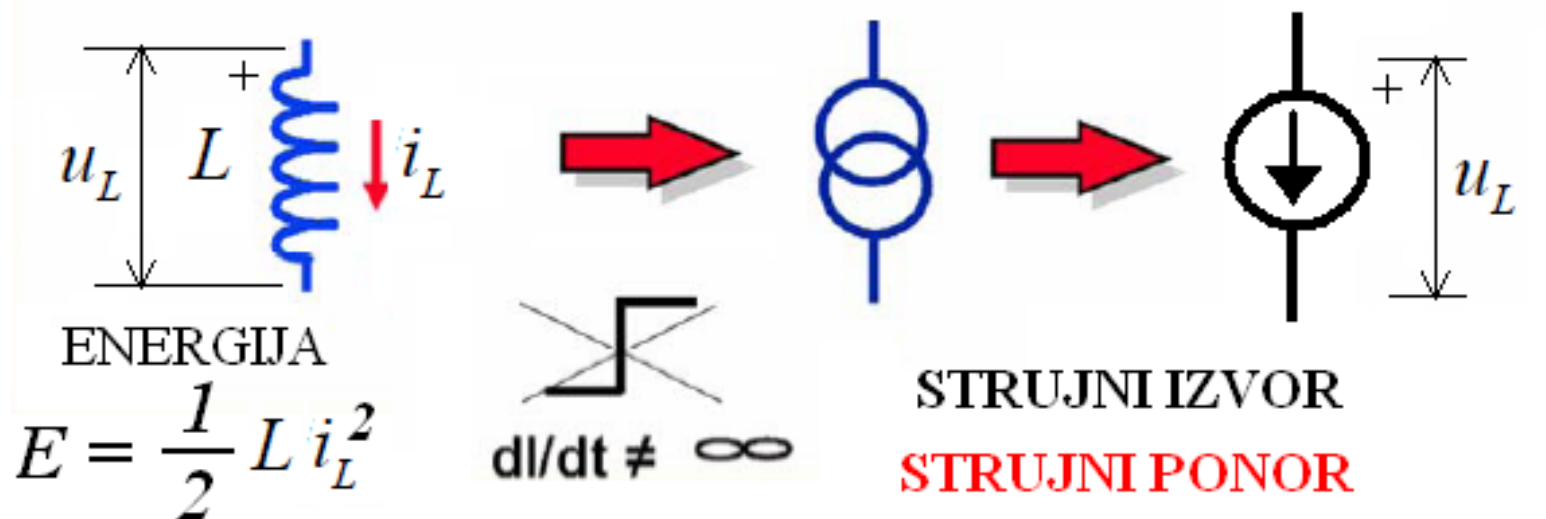
TEORETSKI $L \rightarrow \infty$ ODNOSNO:

$$\frac{1}{L} \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{di_L}{dt} \rightarrow 0$$

$$\frac{di_L}{dt} \rightarrow 0 \Rightarrow i_L = \text{const}$$

DRUGIM REČIMA ZA PROIZVOLJNU VREDNOST NAPONA NA KRAJEVIMA INDUKTIVNOSTI, STRUJA KOJA SE IMA KROZ NJU JE KONSTANTNA!!!!

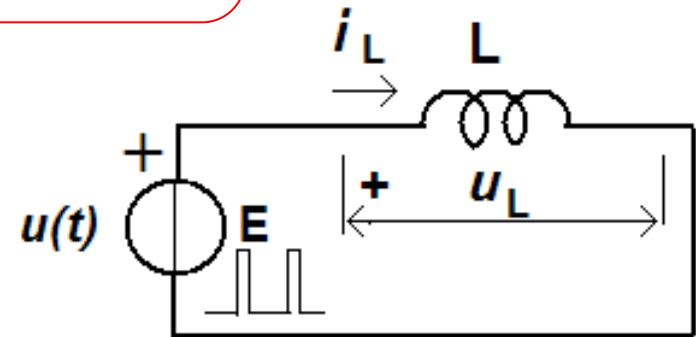
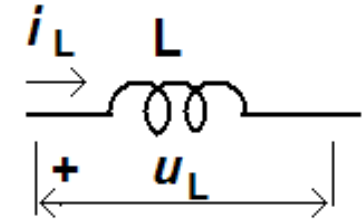
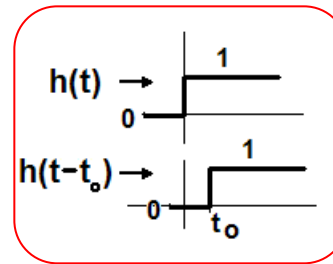
INDUKTIVNOST SE TADA PONAŠA KAO STRUJNI IZVOR, ODNOSNO PRIRODNIJE JE U ENERGETSKOJ ELEKTRONICI (ELEKTROENERGETSKIM PRETVARAČIMA) REĆI KAO **“STRUJNI PONOR”**.



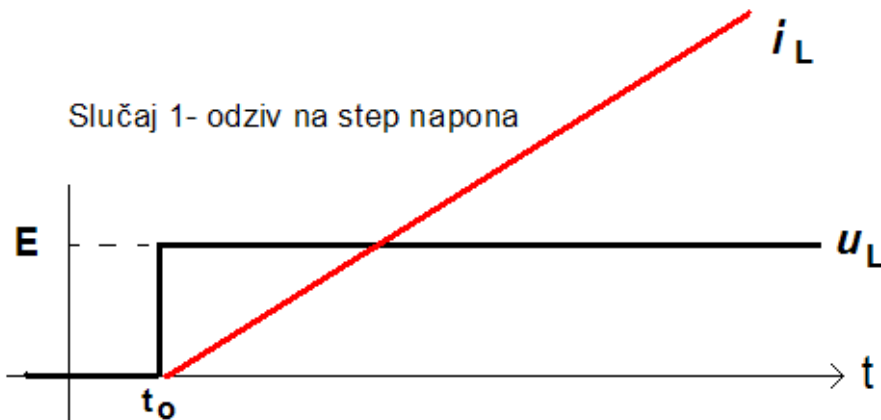
ZA PROIZVOLJNE ALI KONAČNE VREDNOSTI NAPONA, STRUJA KROZ L JE KONSTANTNA => INDUKTIVNOST L SE PONAŠA KAO STRUJNI IZVOR (STRUJNI PONOR)

INDUKTIVNOST- kao integrator

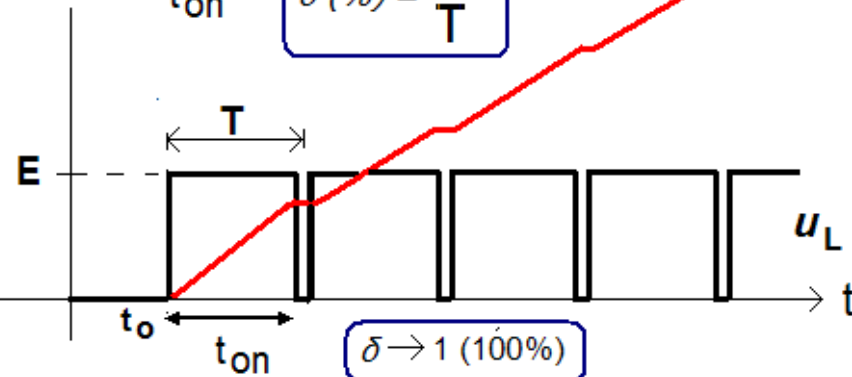
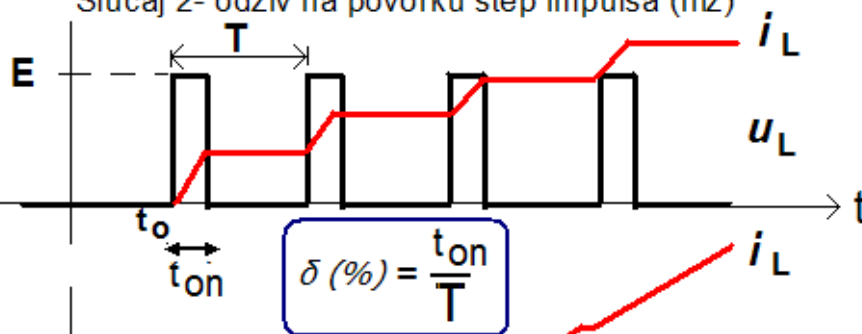
ODSKOČNA (Hevisajdova) funkcija



Slučaj 1- odziv na step napona



Slučaj 2- odziv na povorku step impulsa (niz)



SLUČAJ koji $\rightarrow$ odzivu na step napona $E \cdot h(t-t_0)$ (Slučaj 1)

Kada se na induktivnost primene odskočna (step) funkcija napona $Eh(t-t_0)$ ili unipolarni niz impulsa amplitude E , kao odziv se dobija linearni, odnosno stepenasto linearni porast struje induktivnosti u vremenu

Kakav se odziv dobija ako se primene bipolarni impulsi (pozitivnog i negativnog polariteta napona?)

ŠTA KAŽE MATEMATIKA??

U VREMENSKOM DOMENU

$$L \frac{di_L}{dt} = u_L$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt + I_0$$

**STRUJA JE PROPORCIONALNA
INTEGRALU NAPONA**

U "s" DOMENU (LAPLASOVA TRANSFORMACIJA)

PRIMENOM OPERATORA $\frac{d()}{dt} \rightarrow s$ NA STRUJU

DOBIJAMO:

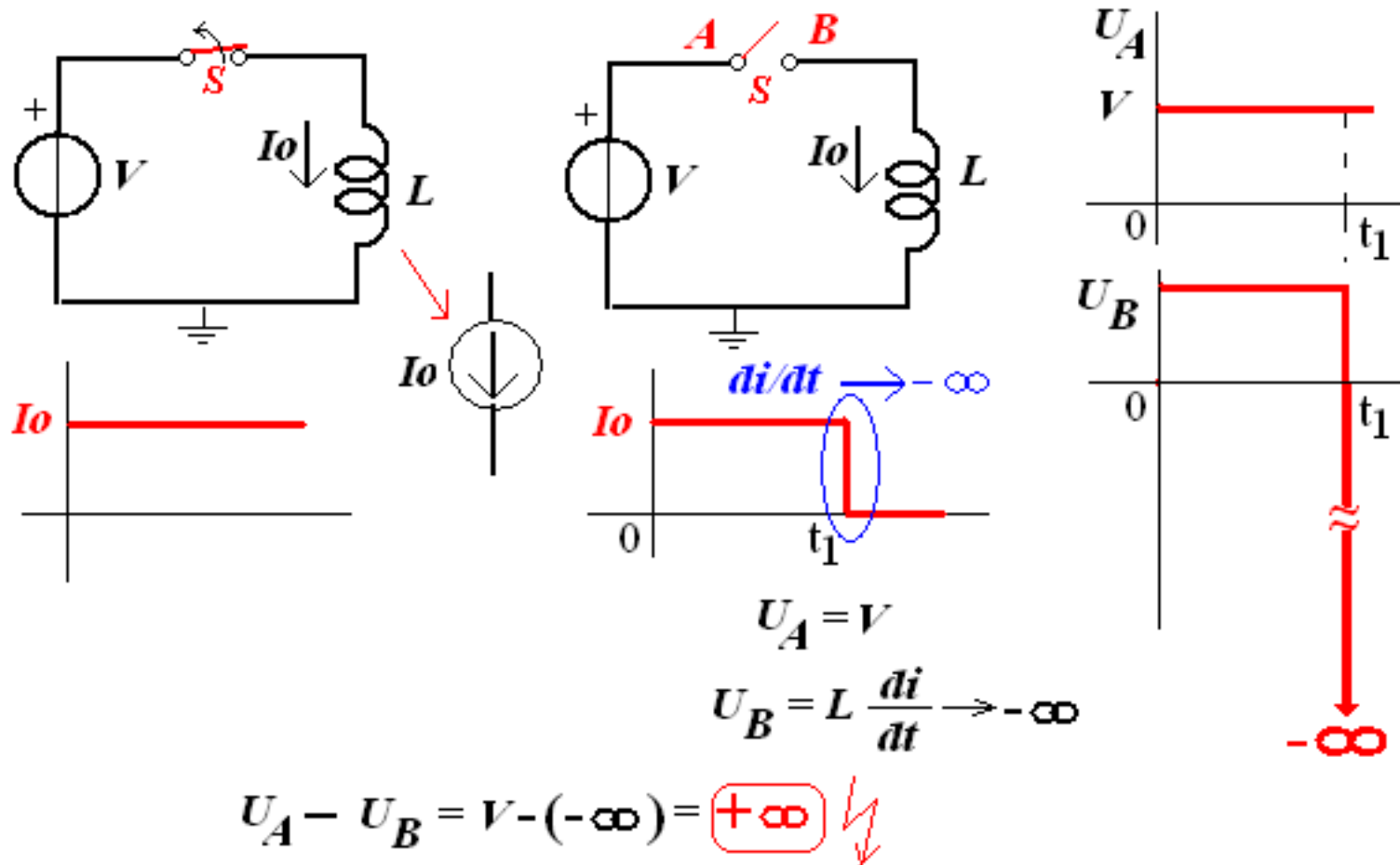
$$L s I_L(s) = U_L(s)$$

$$I_L(s) = \left[\frac{1}{sL} \right] U_L(s)$$

STRUJA JE JEDNAKA INTEGRALU NAPONA

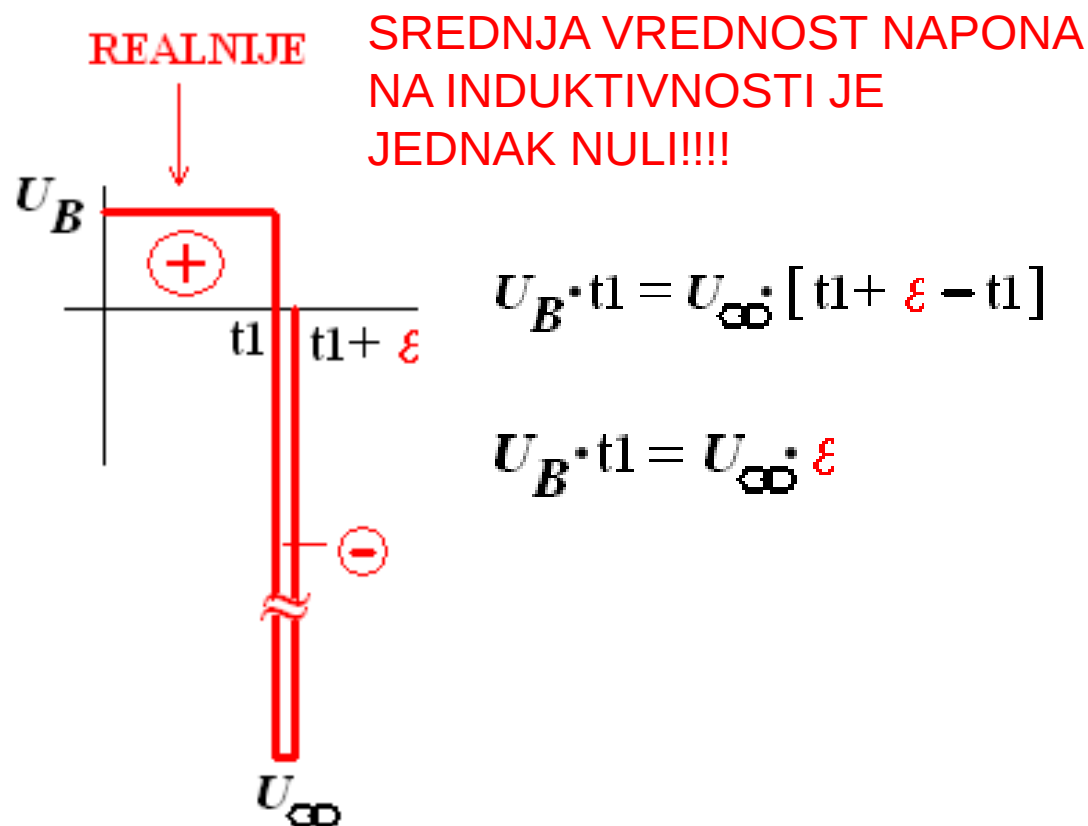
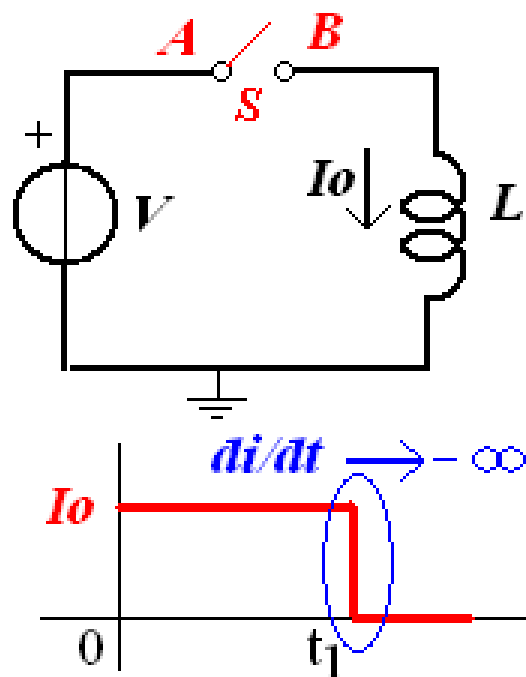
INTEGRATOR U "s" DOMENU

ŠTA ĆE SE DESITI KADA SE NAGLO PREKINE STRUJNO KOLO U KOJEM JE USPOSTAVLJENA KONSTANTNA STRUJA (GRANA KOJA SE PONAŠA KAO STRUJNI PONOR)?



VELIKA VEROVATNOĆA DA ĆE DOĆI DO **PROBOJA** NA PREKIDAČU
ŠTO JE MANJI RAZMAK IZMEĐU PRIKLJUČAKA VEĆA JE VEROVATNOĆA!!!

U REALNIJEM SLUČAJU:

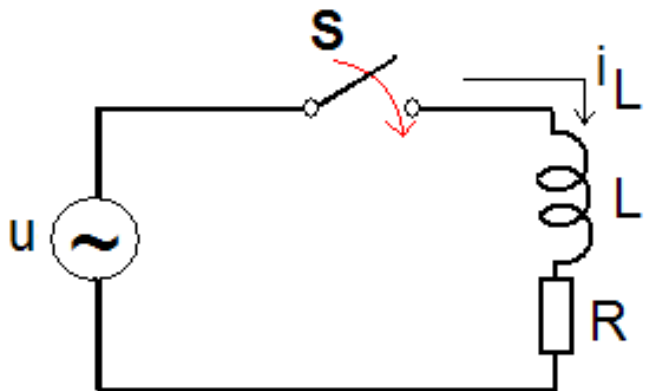


$U_\infty \cdot \varepsilon = \text{KONAČNA VELIČINA}$

$$U_\infty \rightarrow \infty \quad \varepsilon \rightarrow 0$$

NAPONSKI PROBOJ
NA
PREKIDAČU S !!!

INDUKTIVNOST U KOLU NAIZMENIČNE POBUDE



$$u = U_m \sin \omega t$$

$$u = U_m \sin 314t$$

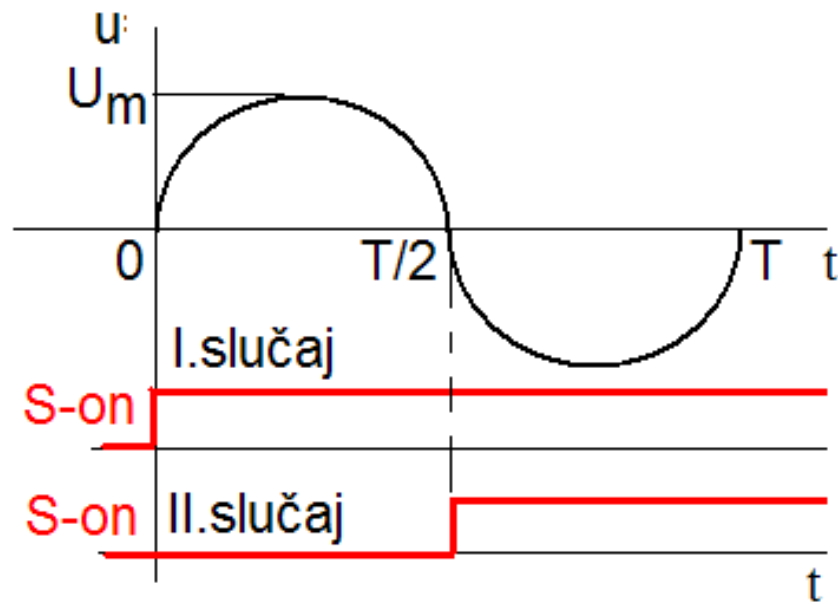
$$f = 50\text{Hz}$$

$$\omega = 2\pi f$$

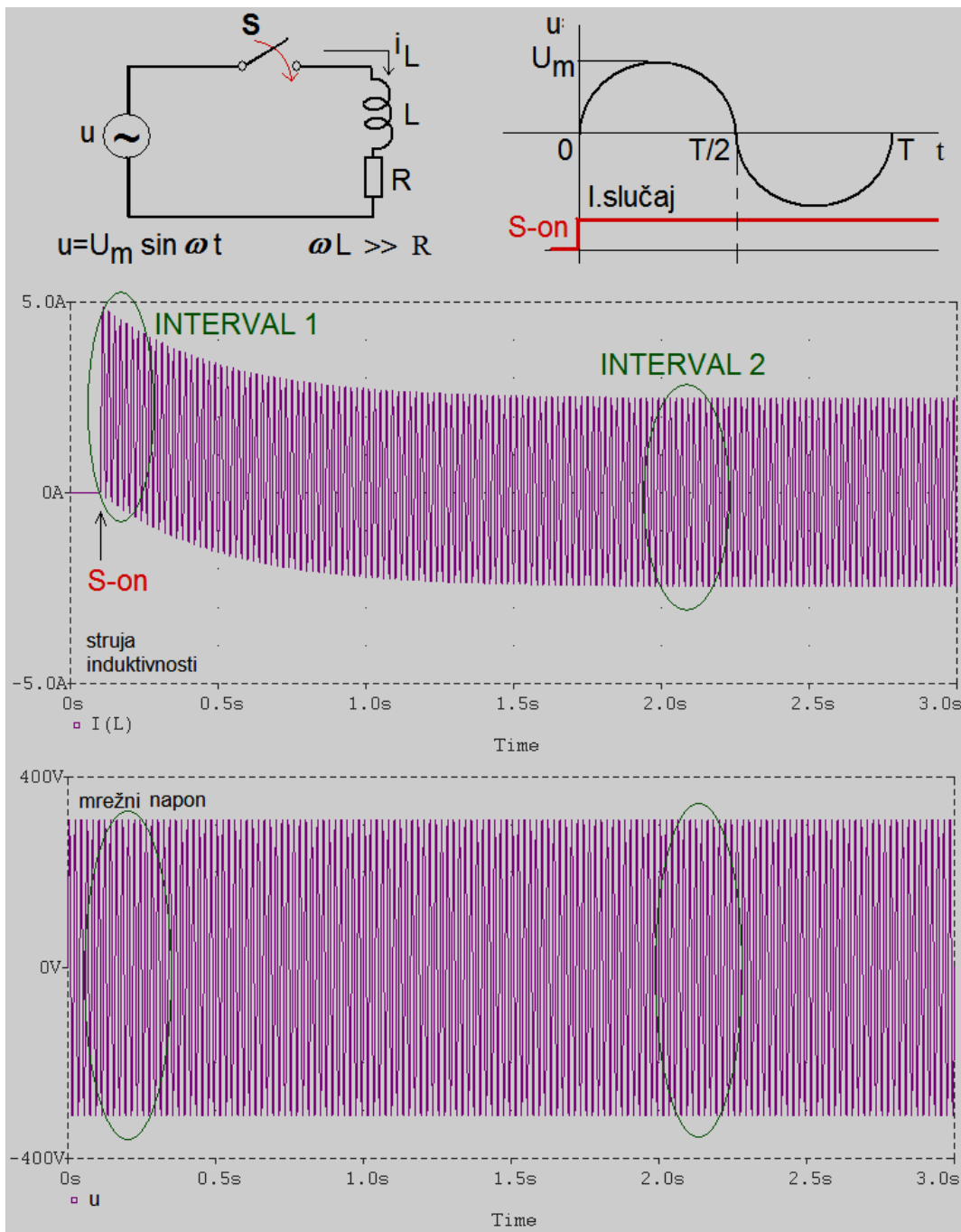
pretpostavka:

$$\omega L \gg R$$

$$T = 1/f = 1/50\text{Hz} = 20\text{ms}$$



- Razmotrićemo šta se dešava kada u prelaznom režimu uključanja induktivnosti na naizmenični izvor
- Pretpostavićemo da je u početnom trenutku prigušnica bila “prazna” odnosno da je u početnom trenutku nagomilana energija u njoj jednaka nuli
- Razmatramo dva slučaja: kada se prekidač S uključuje u trenutku $t=0$ i kada se prekidač uključuje u trenutku $t=T/2$ (nakon isteka poluperiode)



I. SLUČAJ

$$R=1\Omega$$

$$L=400\text{mH}$$

Prekidač S se uključuje u trenutku $t=0$

Posmatramo detaljno dva Intervala:

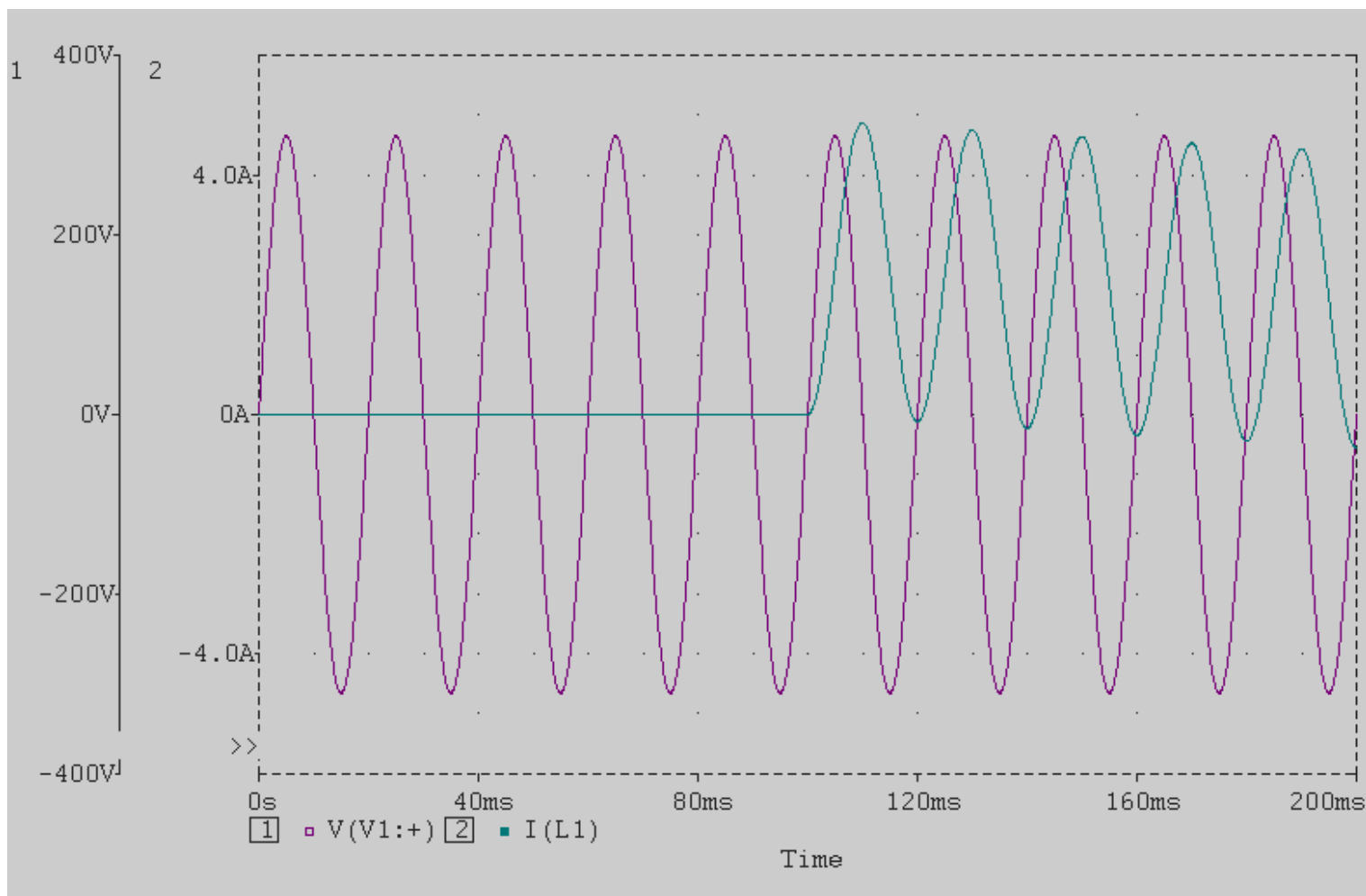
INTERVAL1- neposredno po uključanju prekidača (tranzijentni režim)

INTERVAL2- interval kada se struja ustalila (stacionarno stanje)

Uočavamo da pri uključanju postoji jednosmerna komponenta struje koja iščezava u ustaljenom režimu!!!!

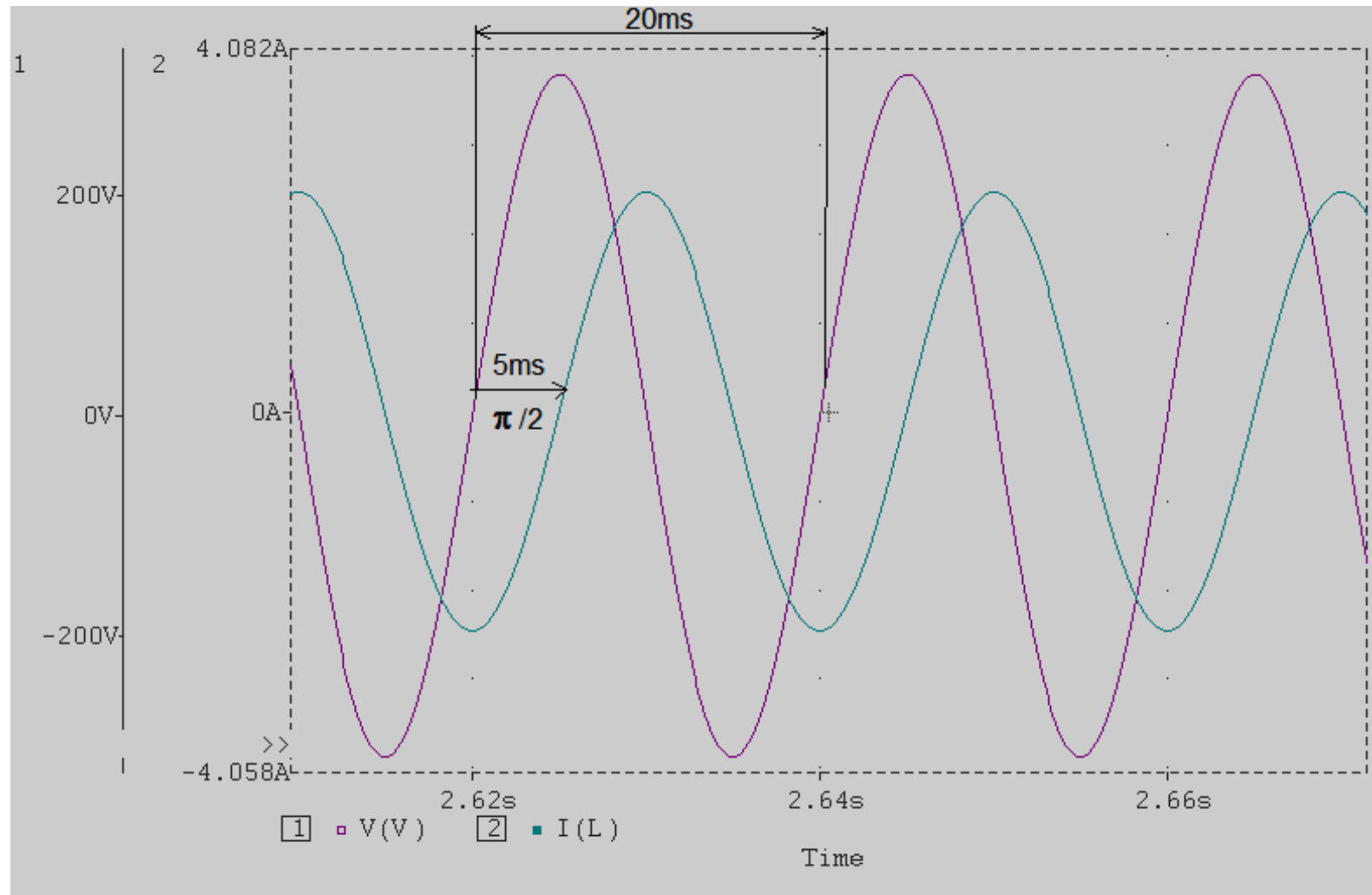
VREMENSKA KONSTANTA SA KOJOM IŠČEZAVA JEDNOSMERNNA KOMPONENTA je $L/R = 400\text{ms}$

INTERVAL- 1



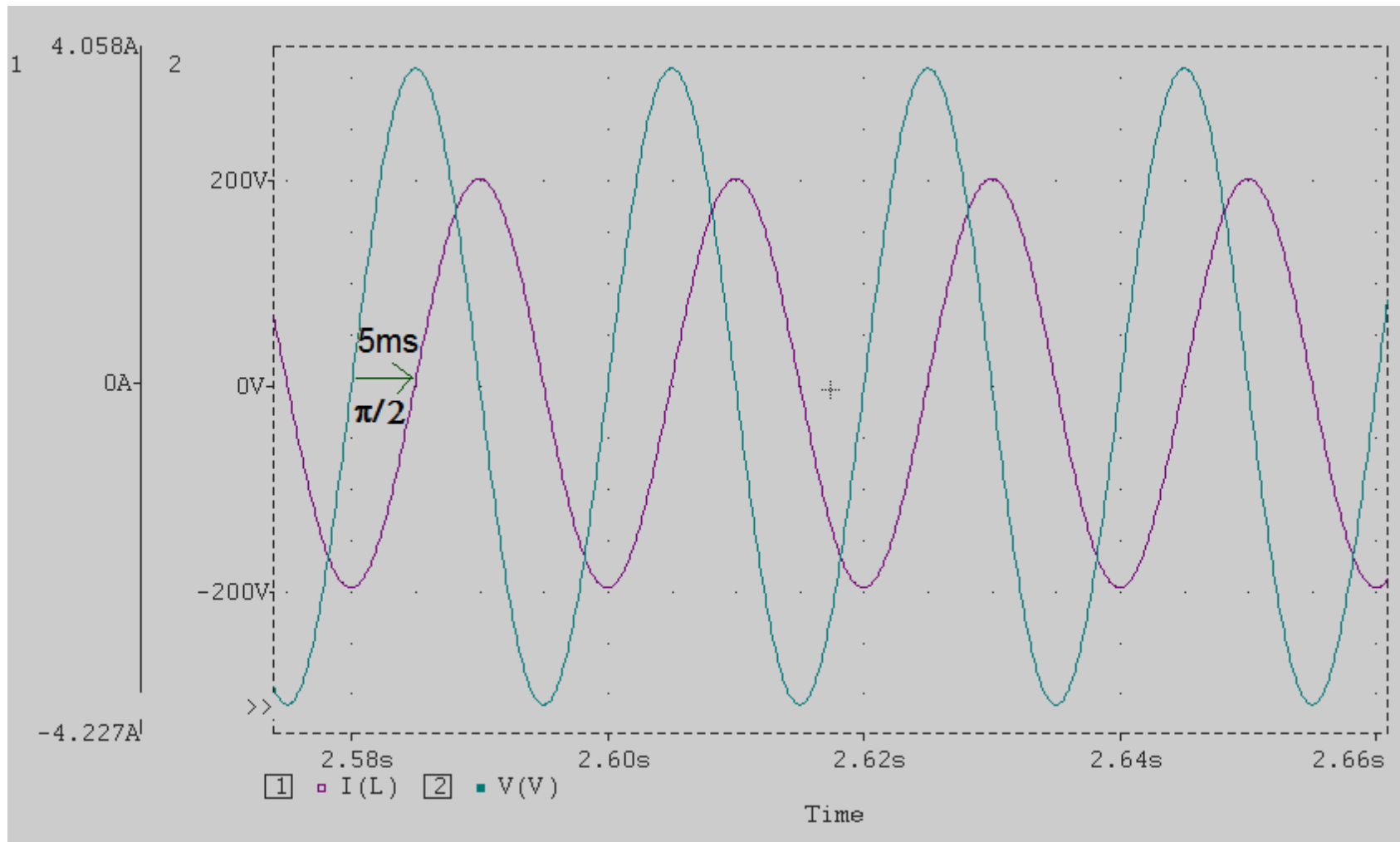
Pošto je fluks u početnom trenutku ($t=0^-$) u prigušnici bio jednak 0, a on ne može naglo da se promeni, to znači da on mora ostati isti (jednak 0) i u trenutku $t=0^+$. On ostaje nepromenjen baž zahvaljujući jednosmernoj komponenti koja se suprotstavlja njegovoj promeni

INTERVAL-2



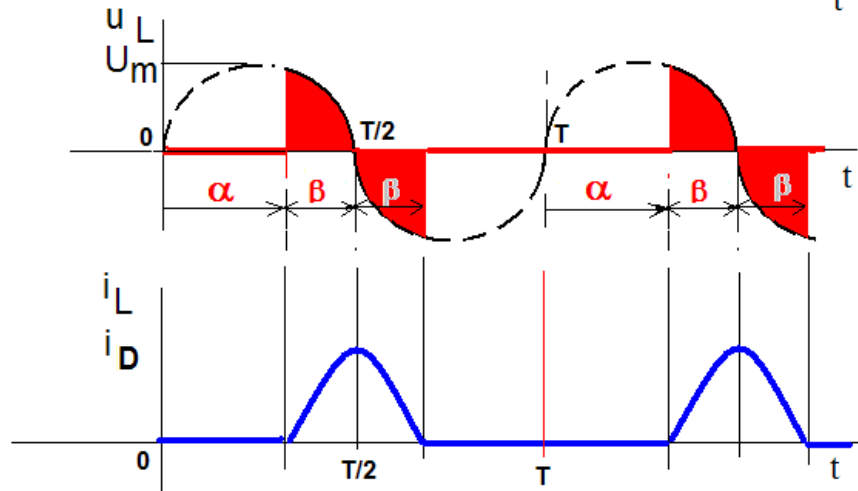
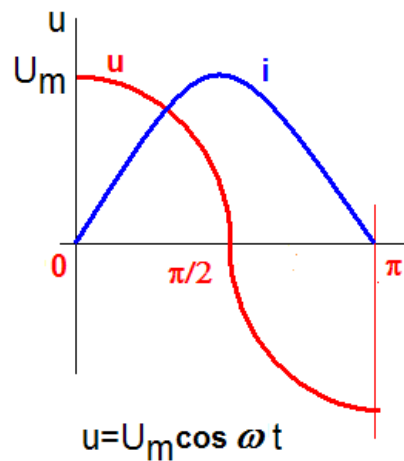
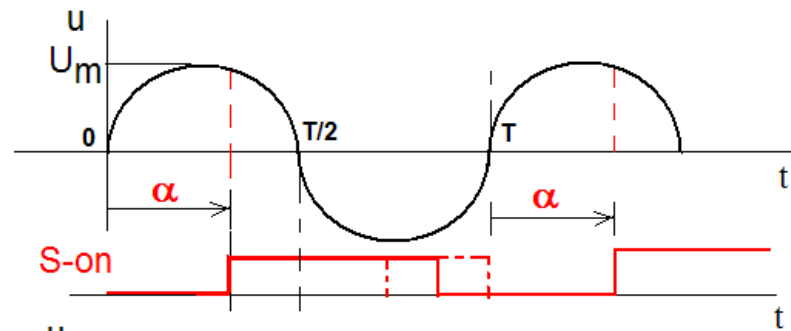
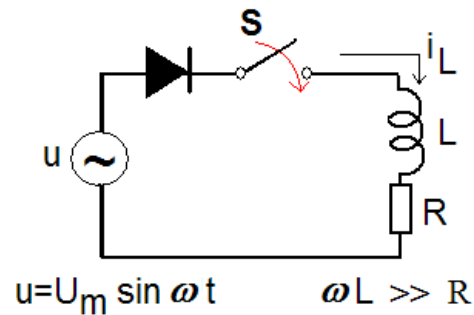
USTALJENO STANJE – fazni pomeraaj između struje i napona $\pi/2$

INTERVAL-2



USTALJENO STANJE – fazni pomeraj između struje i napona i u ovom slučaju je $\pi/2$

INDUKTIVNO KOLO SA DIODOM:

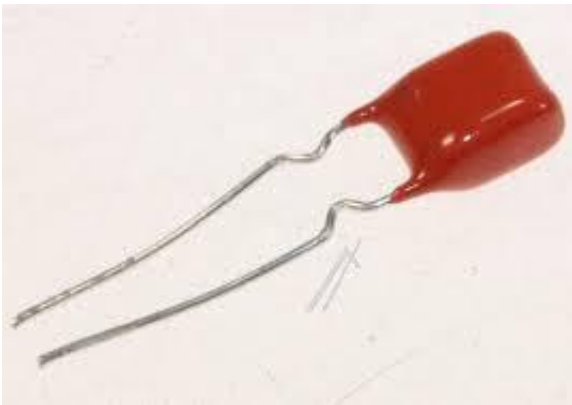


$$L \frac{di_L}{dt} = u_L \quad u = R i_L + L \frac{di_L}{dt} \rightarrow U_m \cos \omega t = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} U_m \cos \omega t$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt + I_o \rightarrow i_L = \frac{1}{\omega L} U_m \sin \omega t$$

KAPACITIVNOST KAO AKUMULACIONI ELEMENAT



- NEOBIČNO ZNAČAJAN AKUMULACIONI ELEMENAT U ENERGETSKOJ ELEKTRONICI JE I PORED INDUKTIVNOSTI I KAPACITIVNOST (KONDENZATOR).

- ZA RAZUMEVANJA RADA POJEDINIH TOPOLOGIJA ENERGETSKIH PRETVARAČA JAKO JE BITNO SHVATITI ELEKTRIČNU INERCIJU (“TROMOST”) OVOG AKUMULACIONOG ELEMENTA

- U NASTAVKU ĆE BITI IZVRŠENA ANALIZA PONAŠANJA OVOG ELEMENTA

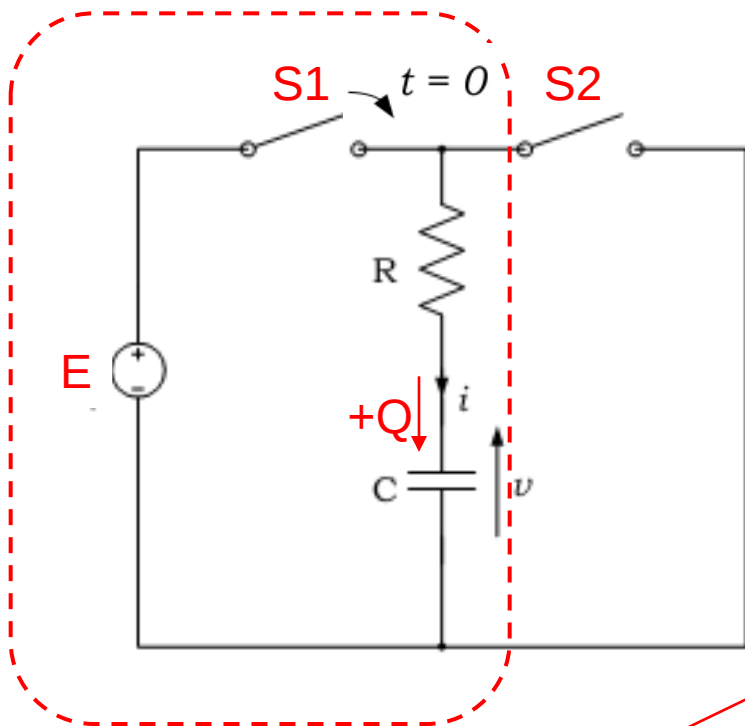
- IDEALNA KAPACITIVNOST (UNUTRAŠNJA OTOČNA OTPORNOST-ODVODNOST JAKO VELIKA)

- REALNA KAPACITIVNOST IMA NEKU KONAČNU VREDNOST OTOČNE OTPORNOSTI



PRELAZNE POJAVE U KONDENZATORU

Uključenjem kondenzatora u strujno kolo sa otporom R ostvaruje se prelazna pojava punjenja kondenzatora naelektrisanjem, dok mu napon ne postigne vrednost napona izvora. Struja punjenja kondenzatora je u početku velika, a kako naelektrisanje na pločama raste, tako njena vrednost opada (suprostavljanje dotoku naelektrisanja istog znaka).



II Kirhofov zakon za kolo kad je *S1 uključen a S2 isključen*:

$$E - v = i \cdot R$$

Jednačina struje kondenzatora:

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(C \cdot v)}{dt} = C \frac{dv}{dt}$$

$$E - v = C \cdot R \cdot \frac{dv}{dt}$$

vremenska konstanta

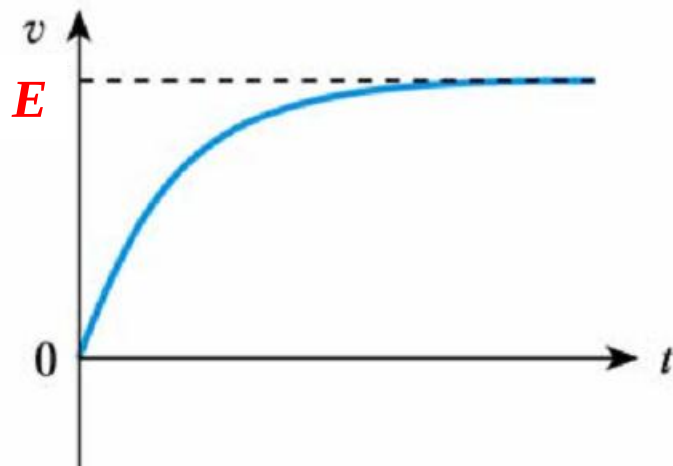
$$\tau = RC$$

Rešenje diferencijalne jednačine:

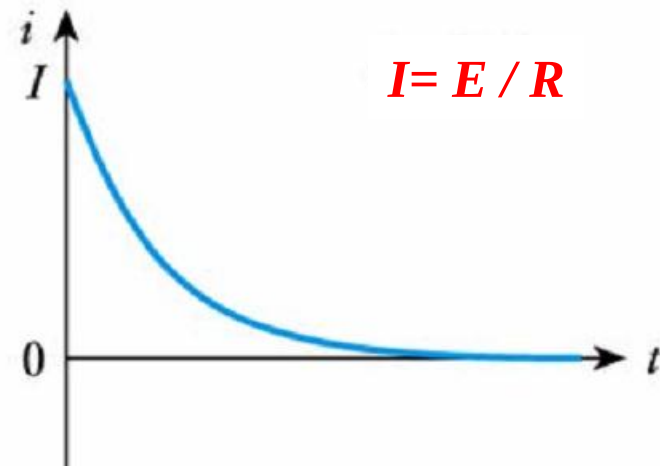
Što je ekvivalentno za prethodno opisani akumulacioni element PRIGUŠNICU

$$v = E \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$

NAPON NA KONDENZATORU



STRUJA KONDENZATORA



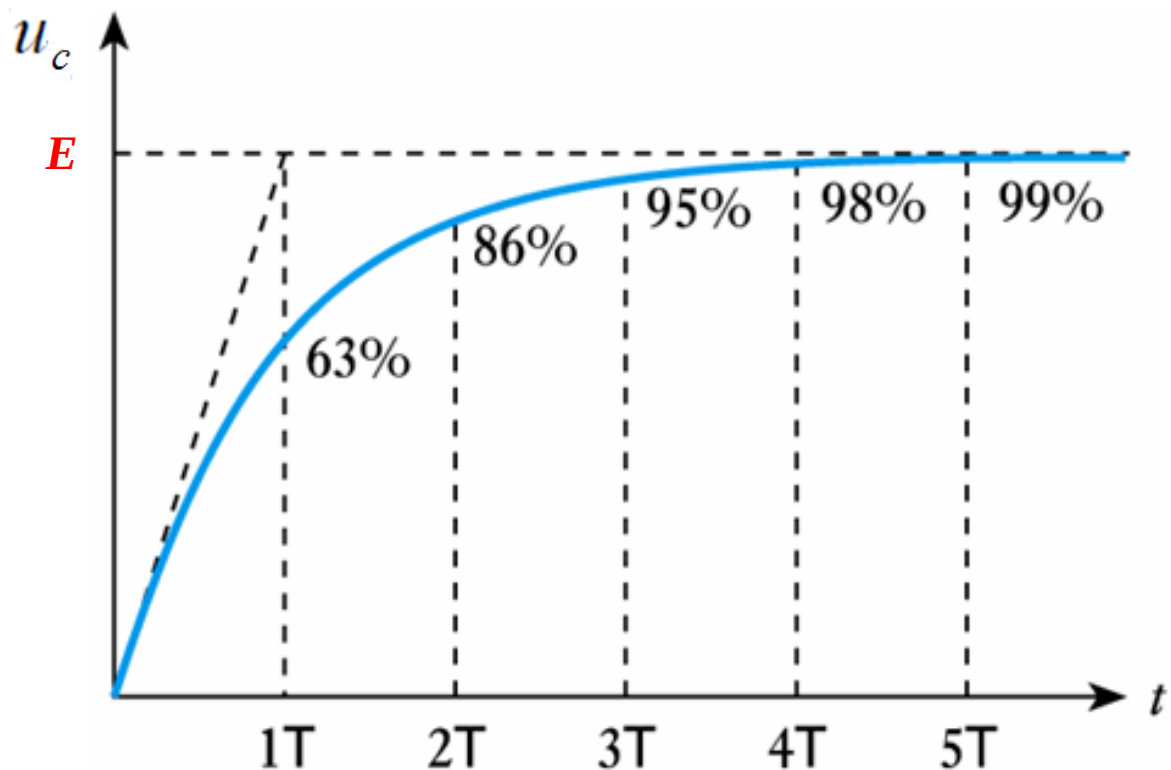
$$v = E \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$

Nakon dovoljno dugo vremena ($4-5T$) napon na kondenzatoru postiže vrednost napona izvora V , dok struja kroz kondenzator postaje jednaka nuli.

Struja postoji samo u prelaznom režimu, odnosno najveća je neposredno po uključenju i ograničena je otpornošću R , tj. $I_{\max} = E/R$.

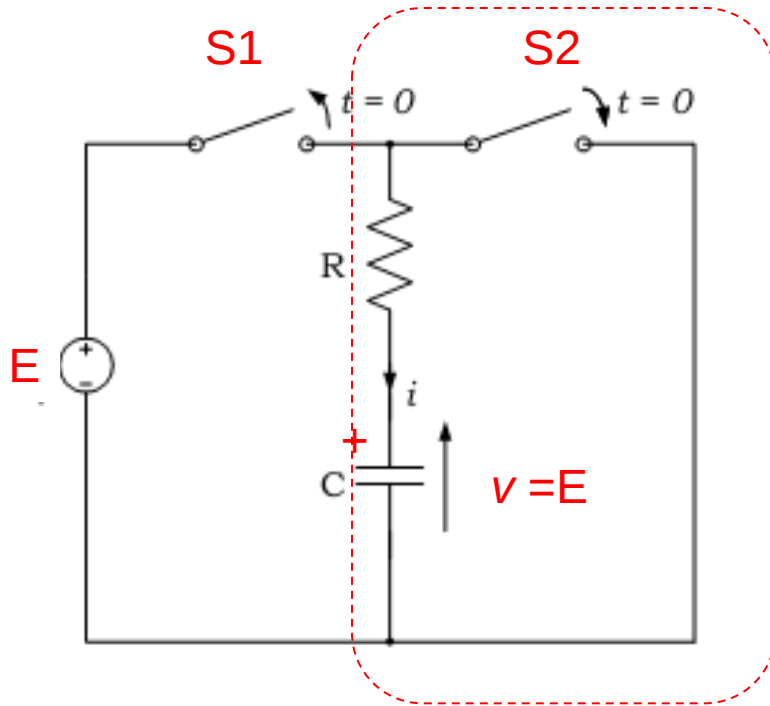
Zaključak: Kondenzator je u početnom trenutku $t=0+$ ustvari KRATAK SPOJ za izvor E

Napon na kondenzatoru po eksponencijalnom zakonu. Za vreme jedne vremenske konstante ($t=\tau=T$) struja postigne 63% svoje konačne vrednosti E . Ta vrednost stacionarnog stanja praktično se postiže već nakon vremena od 4 do 5 vremenskih konstanti.



ŠTA ĆE SE DESITI KADA PRAZNIMO KONDENZATOR?

Isključenjem S1 a uključenjem S2 dolazi do pražnjenja prethodno napunjenog kondenzatora (napon na njemu je jednak E)



Pošto je sada napon na krajevima RC kola jednak 0, važi jednačina :

$$-v = i \cdot R$$

Jednačina struje kondenzatora:

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(C \cdot v)}{dt} = C \frac{dv}{dt}$$

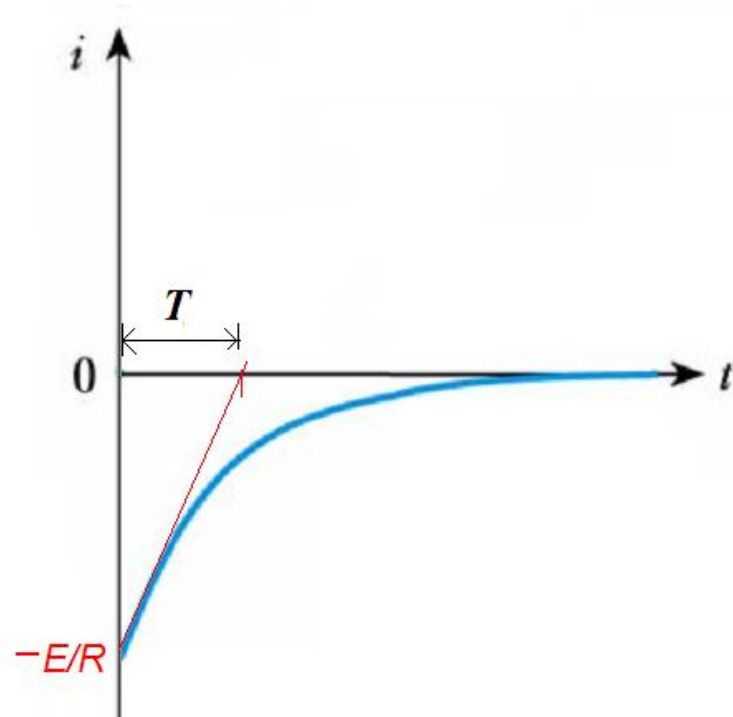
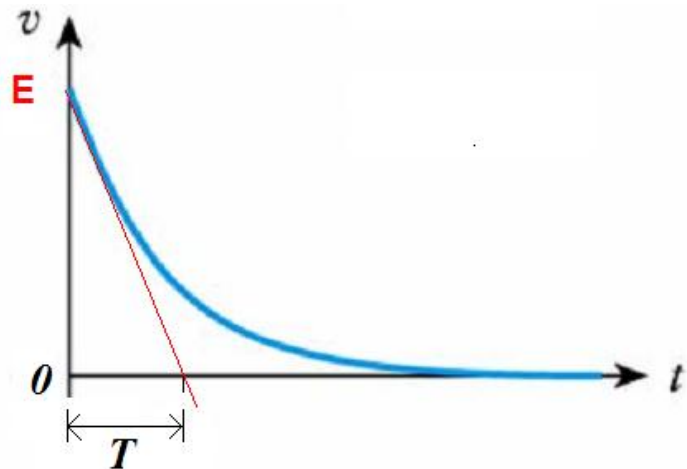
$$-v = C \cdot R \cdot \frac{dv}{dt}$$

Vremenska konstanta

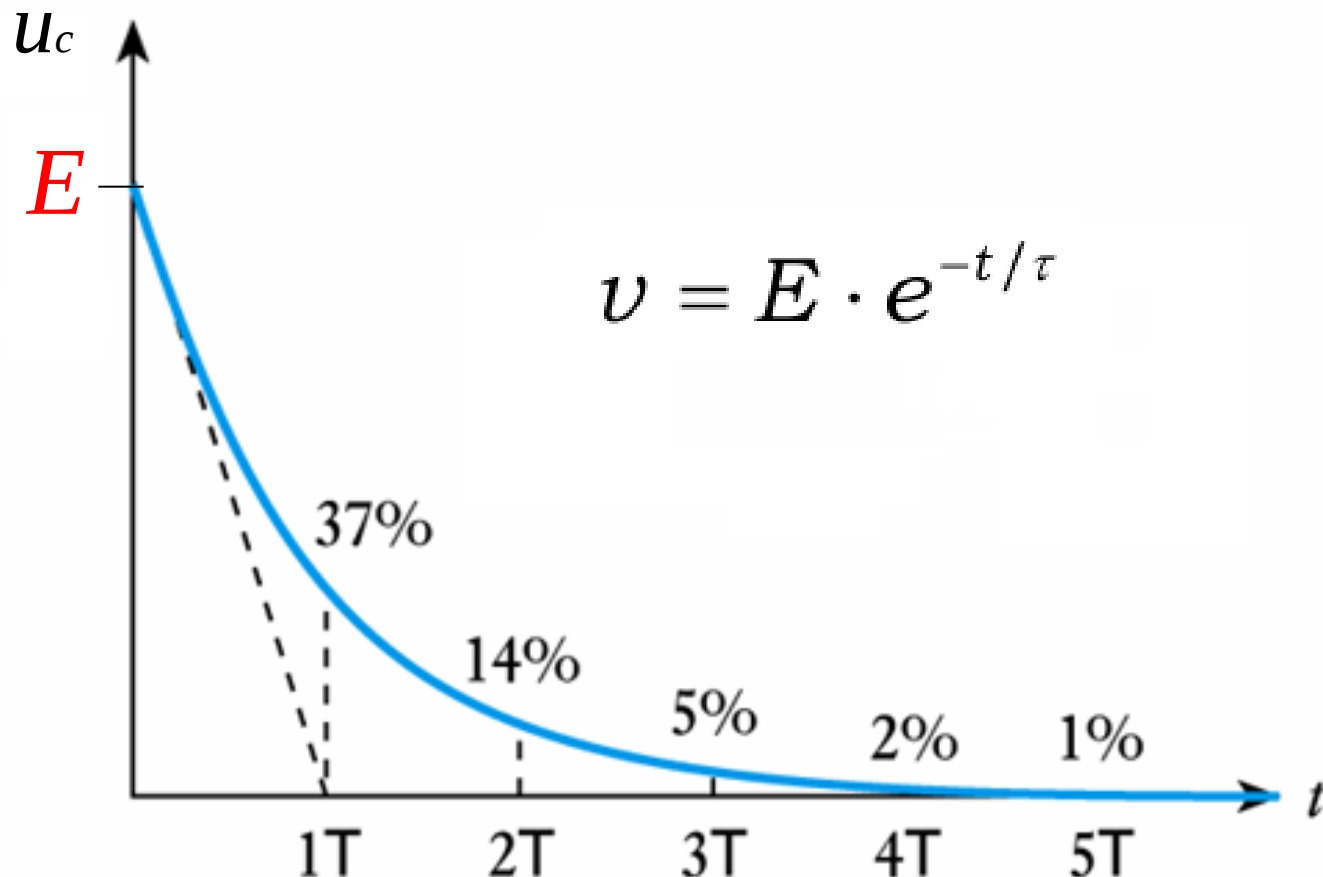
$$\tau = RC = T$$

Rešenje diferencijalne jednačine:

$$v = E \cdot e^{-t/\tau}$$



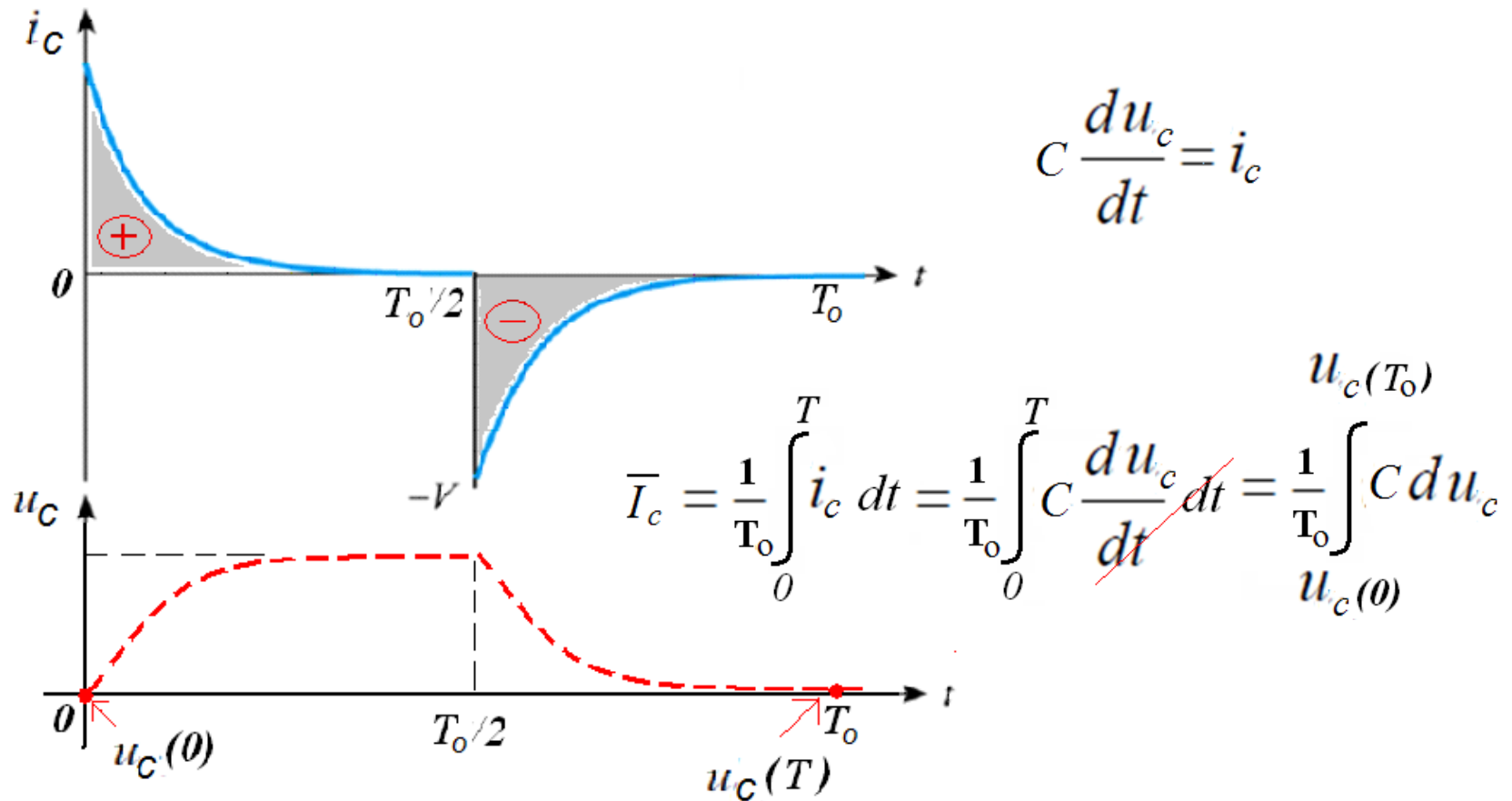
Struja kondenzatora je opet najveća u početnom trenutku i iznosi E/R , pošto napon na kondenzatoru ne može naglo da se promeni. Stoga napon na kondenzatoru opada do nule eksponencijalno (praktično nakon 4-5 T). Brzina opadanja zavisi i u ovom slučaju od vremenske konstante T .



Napon na kondenzatoru opada po eksponencijalnom zakonu. Za vreme jedne vremenske konstante ($t=\tau=T$) napon opadne na 37% svoje početne vrednosti. Vrednost stacionarnog stanja (napon jednak 0-prazan kondenzator) praktično se postiže već nakon vremena od 4-5T.

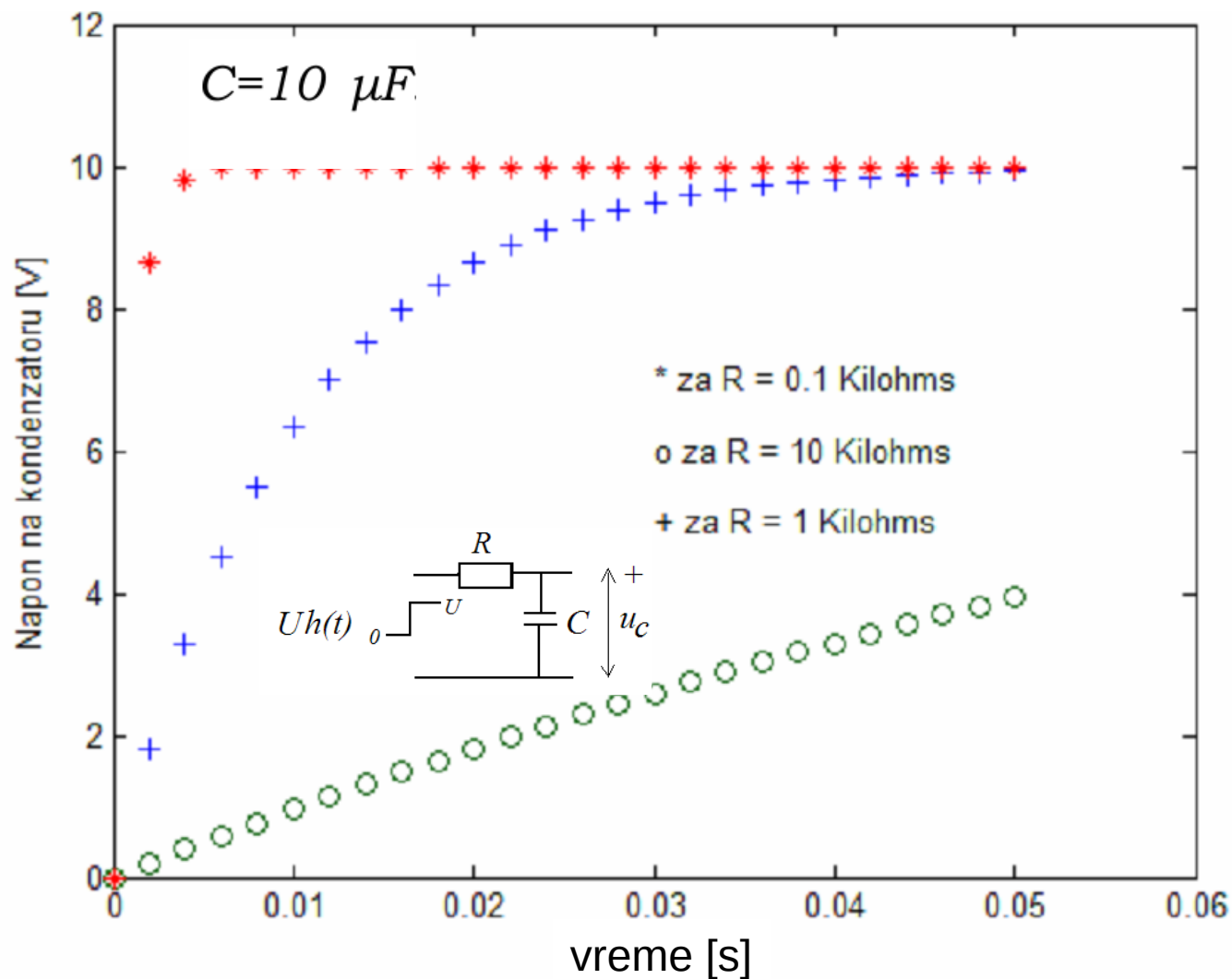
VEOMA VAŽAN ZAKLJUČAK ZA STRUJU KROZ KONDENZATOR!!!!

SREDNJA VREDNOST STRUJE KONDENZATORA JE JEDNAKA NULI!!!!

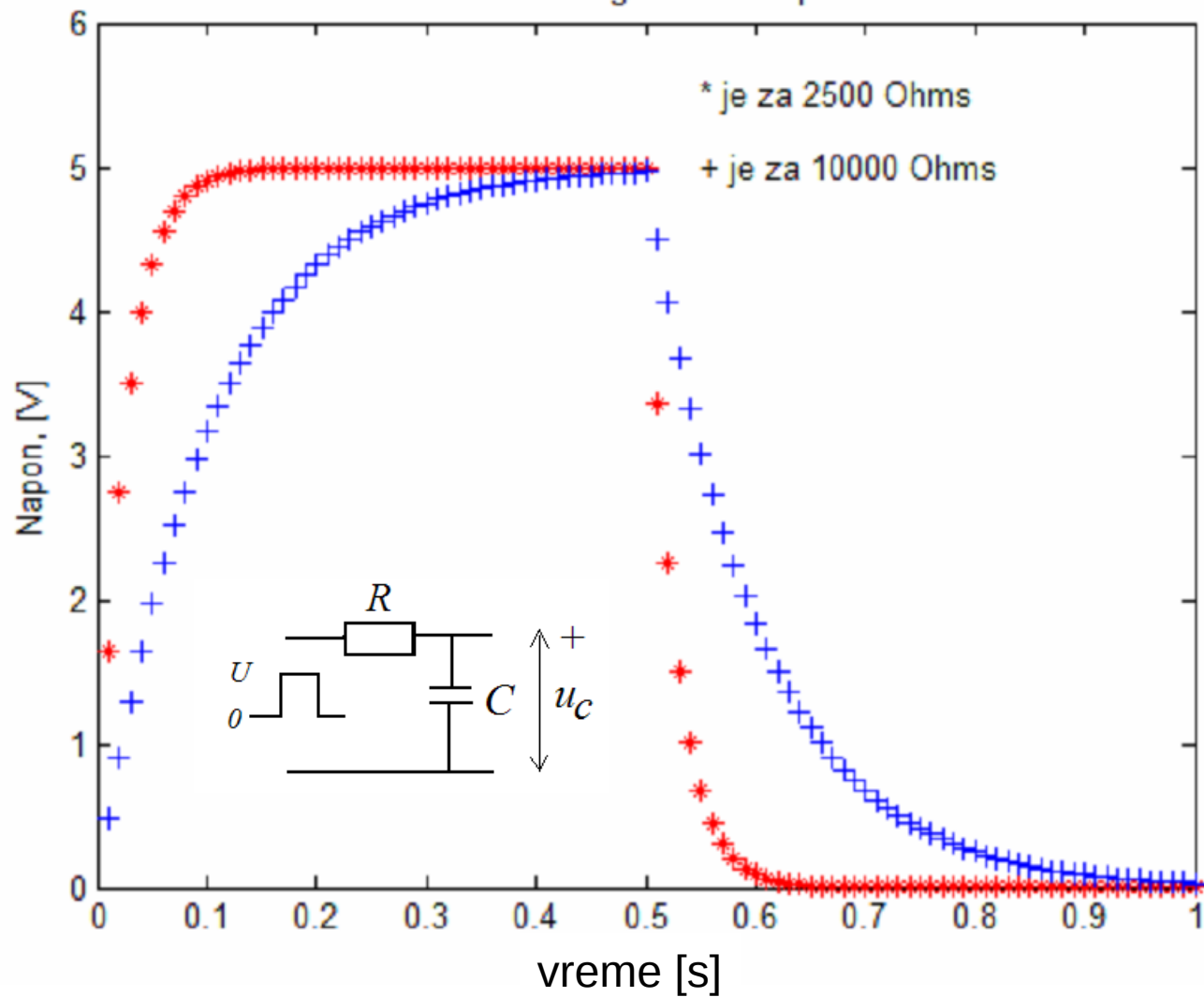


$$\bar{I}_c = 0$$

PRIMER: Odziv RC kola na odskočnu funkciju napona $5[V] \cdot h(t)$
za tri vrednosti otpornosti koje se razlikuju za red veličine



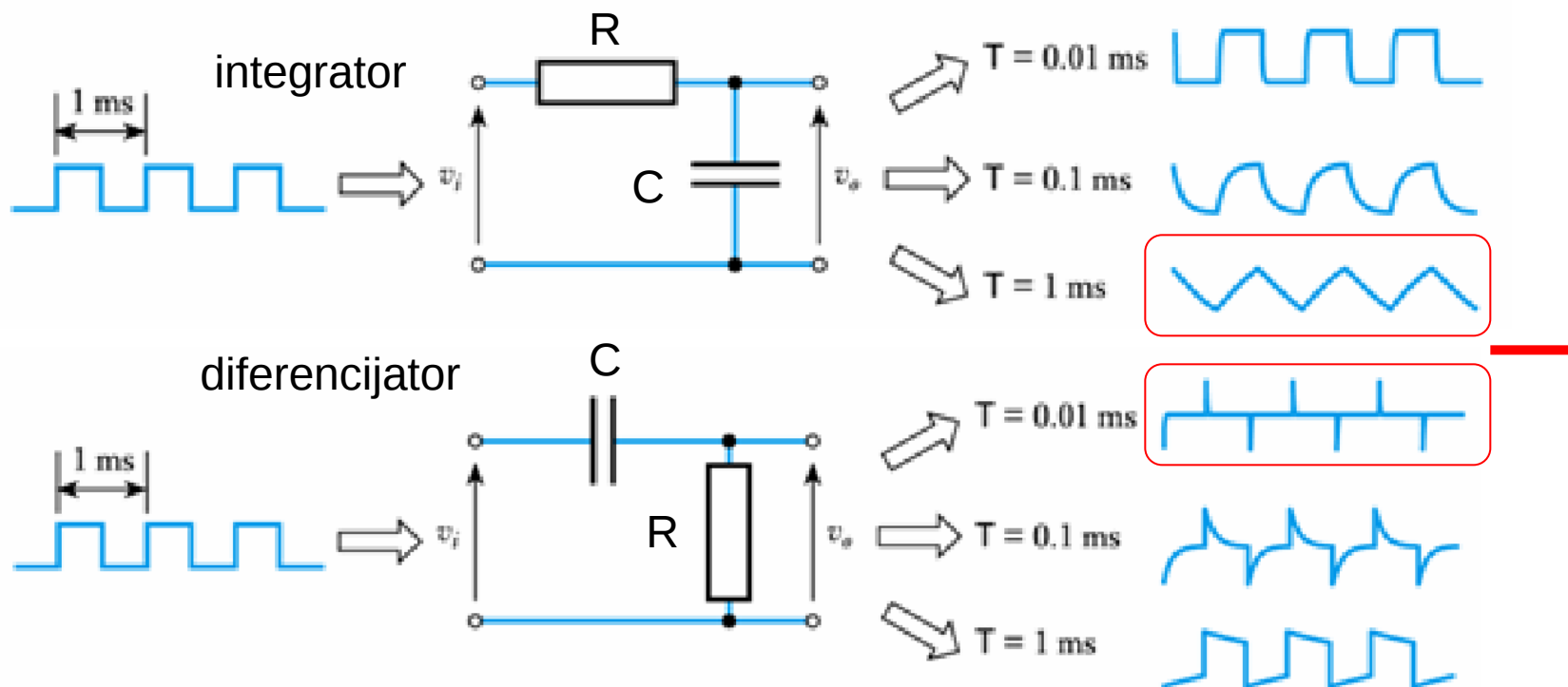
PRIMER: Odziv RC kola na pravougaoni impuls 5V/0.5s



POREĐENJE RC INTEGRATORA I DIFERENCIJATORA

Pobudna povorka pravougaonih impulsa ima učestanost 1kHz ($T_0 = 1\text{ms}$).
Posmatraju se odzivi RC integratora i RC diferencijatora na ovu povorku, i to za tri vrednosti $T=RC$ vremenske konstante: $T=0.01\text{ms}$, $T=0.1\text{ms}$ i $T=1\text{ms}$

SLUČAJEVI NEOBIČNO ZNAČAJNI ZA UPRAVLJNJE ELEKTROENERGETSKIM PRETVARAČIMA



KONDENZATOR KAO NAPONSKI IZVOR

- Pod određenim uslovima kondenzator se može približno ponašati kao naponski izvor
- Ova osobina naročito dolazi do izražaja pri relativno velikim vrednostima kapacitivnosti C
- Na oblik napona utiču talasni oblik primenjenog napona i njegova učestanost
- Koje su to kritične vrednosti kapacitivnosti i učestanosti iznad kojih se induktivnost ponaša kao naponski izvor?
- Ova osobina kondenzatora ima veliki značaj, u shvatanju rada topologija energetskih pretvarača
- Veoma bitna osobina je neprekidnost napona na kondenzatoru (napon na njemu se ne može naglo menjati)
- Nagla promena je moguća samo primenom jako velikih vrednosti struja punjenja
- Vrednosti tih struja su određene ograničenjima (potrebno je imati dovoljno jak strujni izvor, ovo je povezano sa grejanjem napojnih vodova, topljenjem izolacije provodnika i sl....)

NEPREKIDNOST NAPONA NA KONDENZATORU

1. Osobina neprekidnosti napona na kondenzatoru

$$C \frac{du_c}{dt} = i_c$$

-Kada je na kondenzatoru konačne vrednosti kapaciteta C primenjena konačna vrednost struje i_c tada porast napona

$$\frac{du_c}{dt}$$

može biti samo konačan!!!!



$$dV/dt \neq \infty$$

OVO USTVARI ZNAČI DA NAPONA NA KONDENZATORU NE MOŽE DA SE MENJA NAGLO (NEPREKIDNOST NAPONA NA KONDENZATORU)

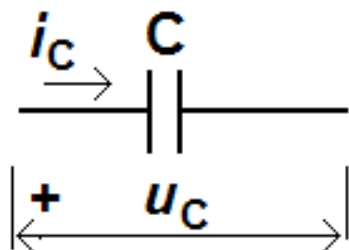
Nagla promena napona bi se teoretski mogla postići primenom jako velikih vrednosti struja i_c , odnosno pri $i_c \longrightarrow \infty$. U realnosti to nije moguće ostvariti.

KAKO KONDENZATOR UTIČE NA PORAST NAPONA, ODNOSNO ŠTA ĆE SE DESITI SA PORASTOM NAPONA KADA JE KAPACITET BLISKA NULI, A ŠTA KADA ONA TEŽI VRLO VELIKOJ VREDNOSTI (TEORETSKI BESKONAČNOJ)??

DA BI ODGOVORILI NA OVO PITANJE MORAMO POSMATRATI ČLAN **$1/C$**

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} i_c$$

posmatrajmo
ovaj član



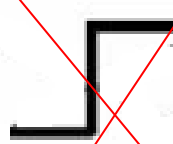
$$\frac{du_c}{dt} \rightarrow \infty \Rightarrow u_c \neq \text{const}$$

Za konačnu proizvoljnu vrednost struje i_c
i pri jako maloj vrednosti kapacitivnosti C

TEORETSKI $C \rightarrow 0$ ODNOSNO:

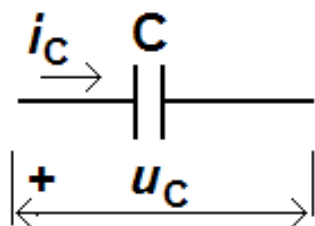
$$\frac{1}{C} \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{du_c}{dt} \rightarrow \infty$$

DRUGIM REČIMA ZA PROIZVOLJNU VREDNOST
STRUJE KROZ KONDENZATOR , NAPON NA
NJEMU NIJE KONSTANTAN!!!! ODNOSNO ON
MOŽE DA SE NAGLO MENJA!!! ALI OVO NIJE
REALAN SLUČAJ!!!

~~
 $dV/dt = \infty$~~

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} i_c$$

posmatrajmo
ovaj član



$$\frac{du_c}{dt} \rightarrow 0 \Rightarrow u_c = \text{const}$$

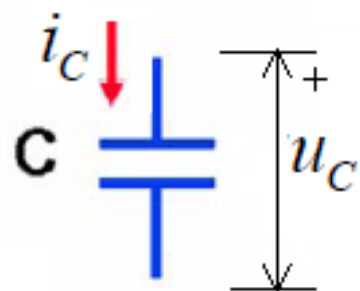
Za konačnu proizvoljnu vrednost struje i_c
i pri jako velikoj vrednosti kapacitivnosti C

TEORETSKI $C \rightarrow \infty$ ODNOSNO:

$$\frac{1}{C} \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{du_c}{dt} \rightarrow 0$$

DRUGIM REČIMA ZA PROIZVOLJNU VREDNOST STRUJE KROZ KONDENZATOR
NAPON KOJI SE IMA NA NJEMU JE KONSTANTAN!!!!

KONDENZATOR SE TADA PONAŠA KAO NAPONSKI IZVOR



ENERGIJA

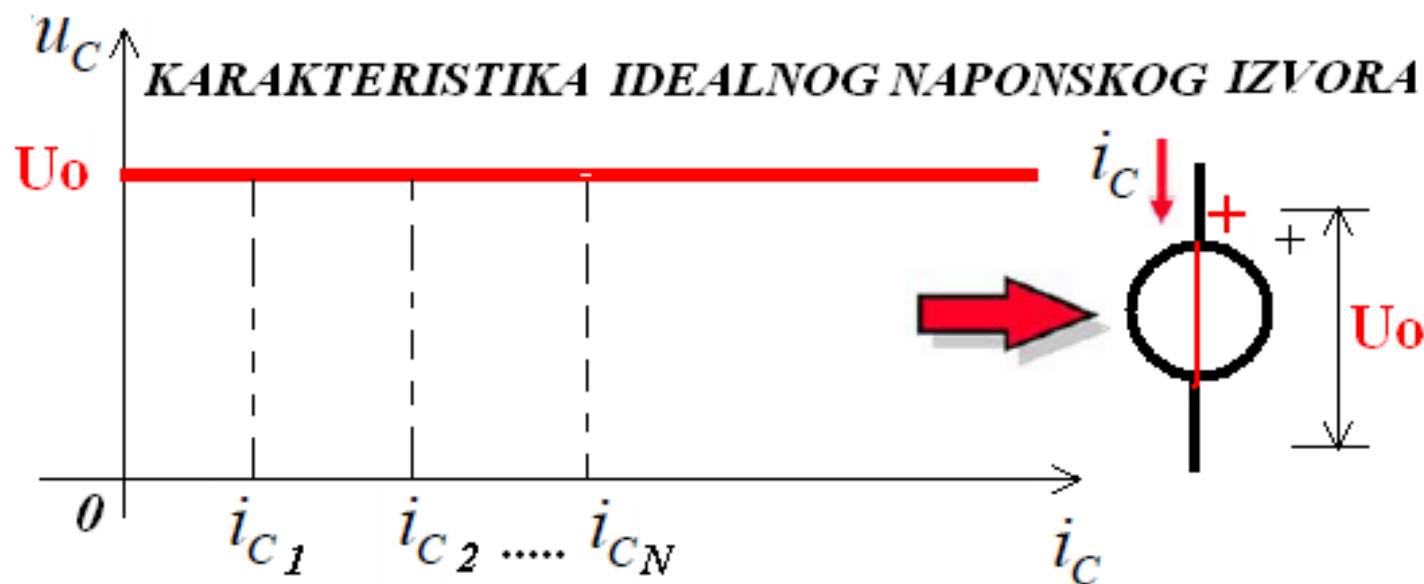
$$E = \frac{1}{2} C u_C^2$$



$$dV/dt \neq \infty$$



NAPONSKI IZVOR

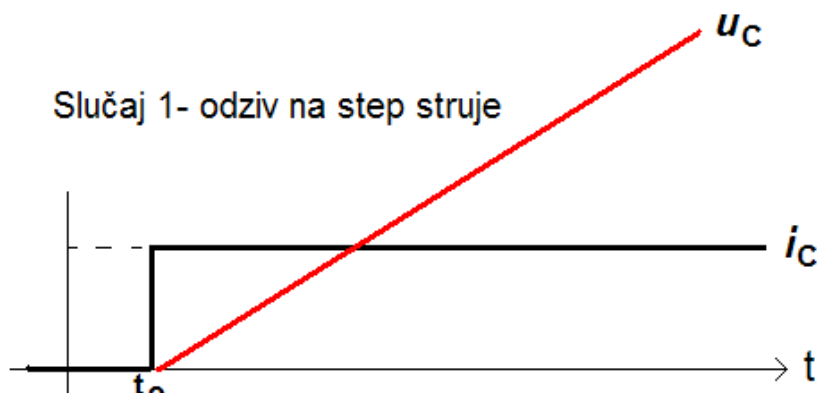


ZA PROIZVOLJNE ALI KONAČNE VREDNOSTI STRUJE NAPON NA C JE KONSTANTAN =>
KONDENZATOR SE PONAŠA KAO NAPONSKI IZVOR

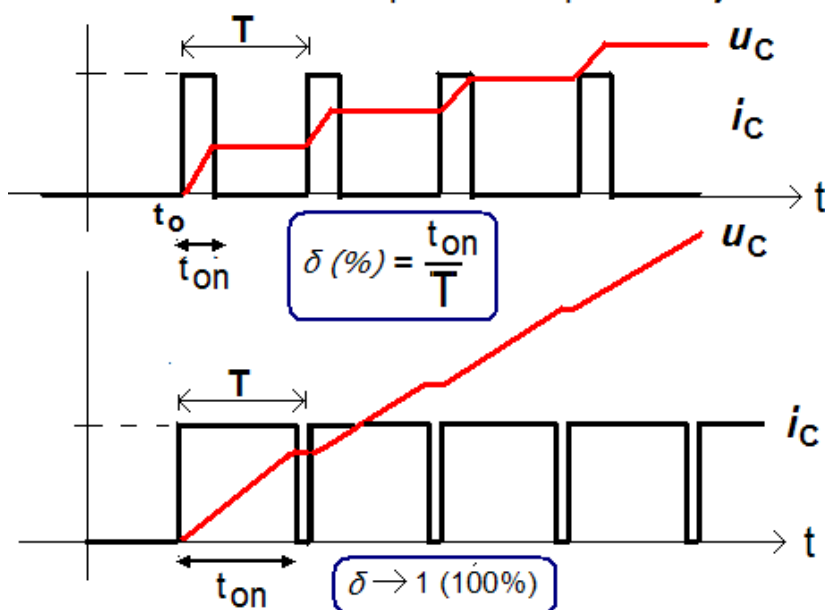
KONDENZATOR- kao integrator

ODSKOČNA (Hevisajdova) funkcija

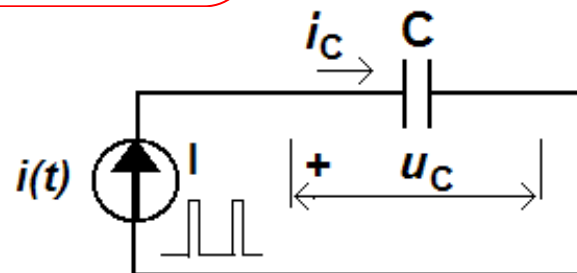
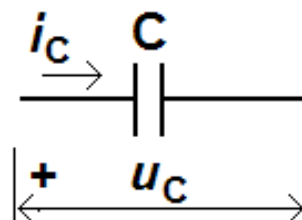
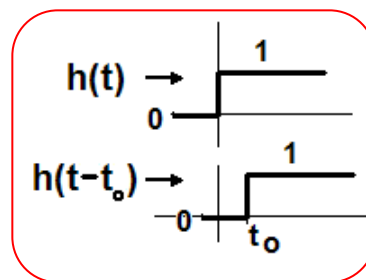
Slučaj 1- odziv na step struje



Slučaj 2- odziv na povorku impulsa struje



SLUČAJ koji $\rightarrow$ odzivu na step napona $I \cdot h(t-t_0)$ (Slučaj 1)



Kada se na kondenzator primene odskočna (step) funkcija struje $I \cdot h(t-t_0)$ ili unipolarni niz impulsa amplitude I , kao odziv se dobija linearni, odnosno stepenasto linearni porast napona na kondenzatoru u vremenu

Kakav se odziv dobija ako se primene bipolarni impulsi (pozitivnog i negativnog polariteta struje ?

ŠTA KAŽE MATEMATIKA??

U VREMENSKOM DOMENU

$$C \frac{du_c}{dt} = i_c$$

Napon na C je određen
integralom struje

$$u_c = \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt + U_o$$

U "s" DOMENU (LAPLASOVA TRANSFORMACIJA)

$$\frac{d()}{dt} \rightarrow s \text{ NA STRUJU}$$

PRIMENOM OPERATORA

DOBIJAMO:

$$sC \cdot U_c(s) = I_c(s)$$

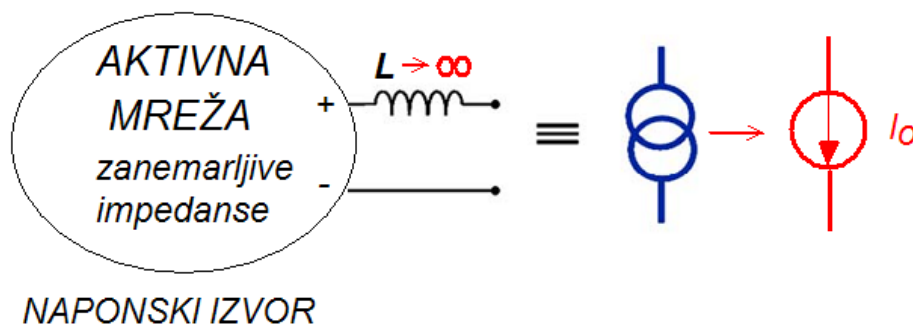
ODNOSNO:

$$U_c(s) = \frac{1}{sC} I_c(s)$$

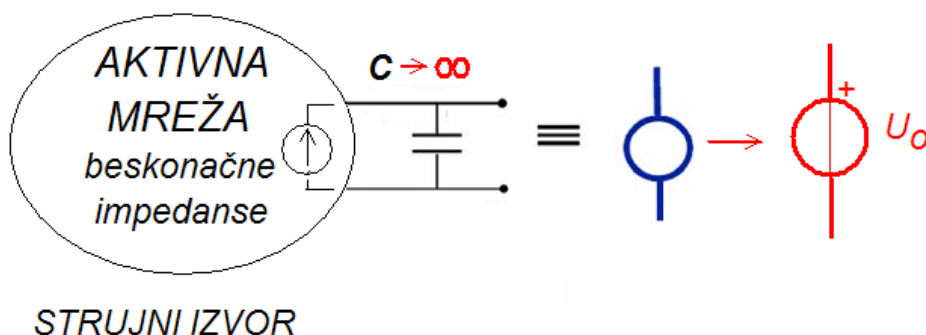
integrator u "s" domenu

NAPON NA KONDENZATORU SE DOBIJA INTEGRACIJOM STRUJE

STRUJNI I NAPONSKI IZVOR U ISTOM KOLU?



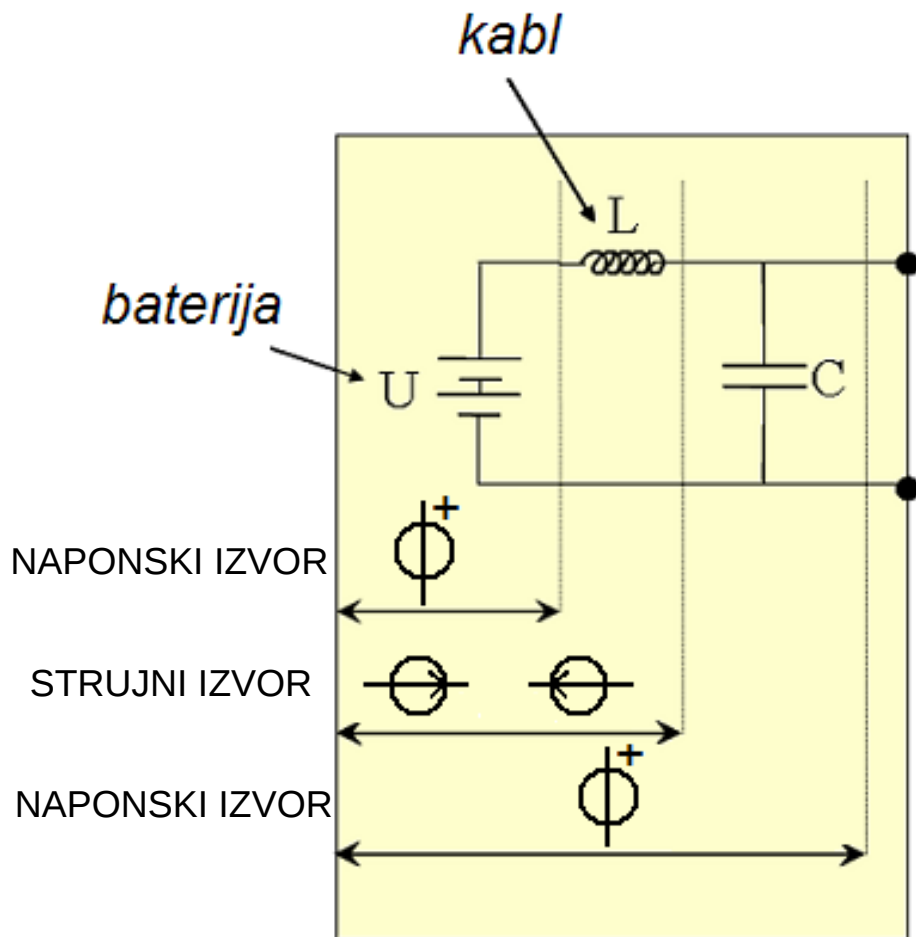
Vezivanjem veoma velike induktivnosti sa aktivnom mrežom koja se ponaša kao naponski izvor (*dipol* sa beskonačno malom unutrašnjom impedansom) dobijamo transformaciju naponskog u STRUJNI IZVOR



Vezivanjem veoma velike kapacitivnosti sa aktivnom mrežom koja se ponaša kao strujni izvor (*dipol* sa beskonačno velikom unutrašnjom impedansom) dobijamo transformaciju strujnog u NAPONSKI IZVOR

U praksi, identifikacija realnog generatora ili realnog opterećenja sa naponskim ili strujnim izvorom nije očigledna. Ovo je razlog zašto je priroda izvora često “pojačana” dodavanjem paralelnog kondenzatora (u slučaju naponskog izvora) ili redne Induktivnosti u slučaju strujnog izvora.

TIPIČAN PRIMER: Karakter izvora u jednom istom kolu može da se menja



Baterija napona U se ponaša kao generator tokom pražnjenja, a kao opterećenje tokom punjenja.

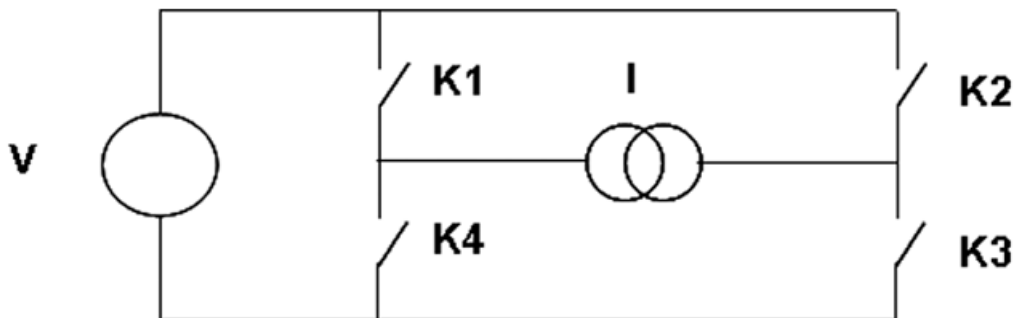
Ovaj u suštini naponski izvor DC napona je strujno reverzibilan ali ne i naponski

Ipak zbog induktivnosti L napojnih kablova ova baterija se može uzeti kao strujni izvor koji može biti trenutno naponski reverzibilan i trajno strujno reverzibilan.

Ako se doda banka kondenzatora na kraju kabla ceo sistem ponovo postaje izvor napona.

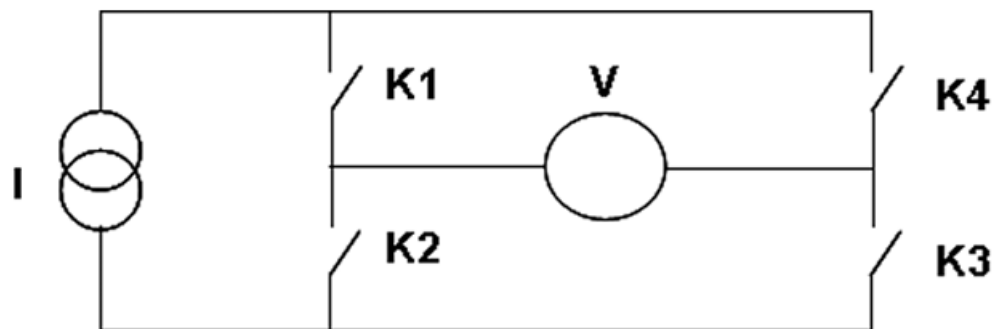
OČIGLEDNO, STRUJNI IZVOR DOBIJEN POVEZIVANJEM INDUKTIVNOSTI NA RED SA IZVOROM NAPONA DRŽI ISTU REVERZIBILNOST KAO IZVOR NAPONA

TOPOLOGIJE DIREKTNIH ENERGETSKIH PRETVARAČA



OSNOVNA KONFIGURACIJA DIREKTNOG
NAPONSKO-STRUJNOG KONVERTORA

(NAPONSKI INVERTOR = VOLTAGE SOURCE INVERTER)

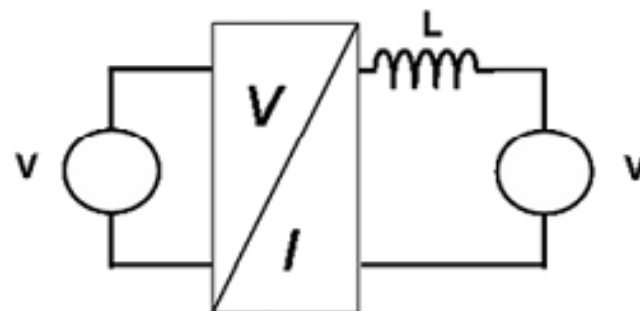
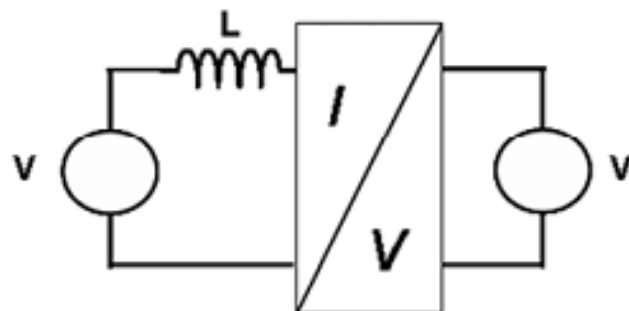


OSNOVNA KONFIGURACIJA DIREKTNOG
STRUJNO - NAPONSKOG KONVERTORA

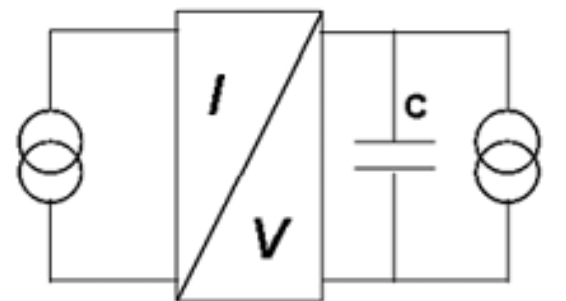
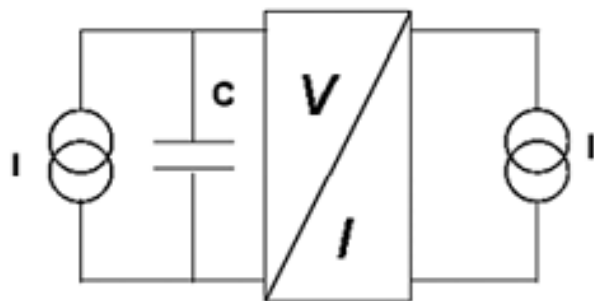
(STRUJNI INVERTOR = CURRENT SOURCE INVERTER)

TOPOLOGIJE INDIREKTNIH ENERGETSKIH PRETVARAČA

NAPONSKO-NAPONSKO
PRETVARANJE



STRUJNO - STRUJNO
PRETVARANJE



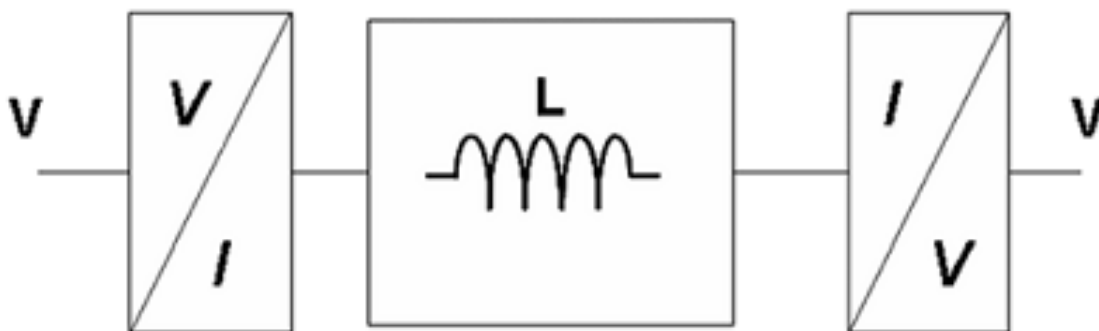
ULAZ

IZLAZ

ULAZ

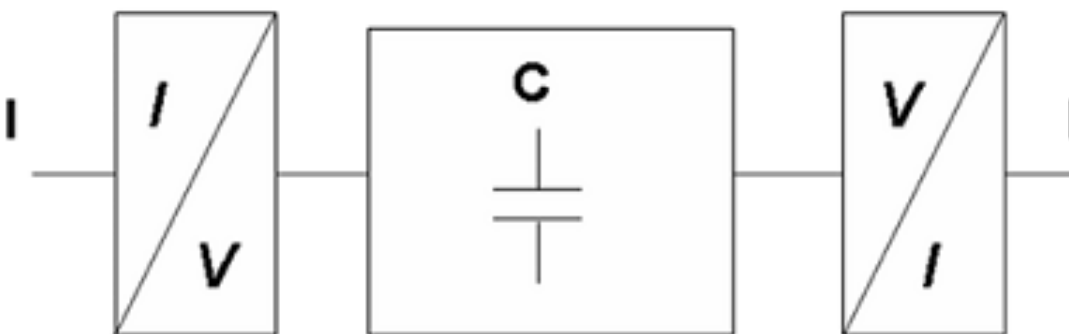
IZLAZ

NAPONSKO-NAPONSKO PRETVARANJE



INDUKTIVNOST U
MEĐUKOLU

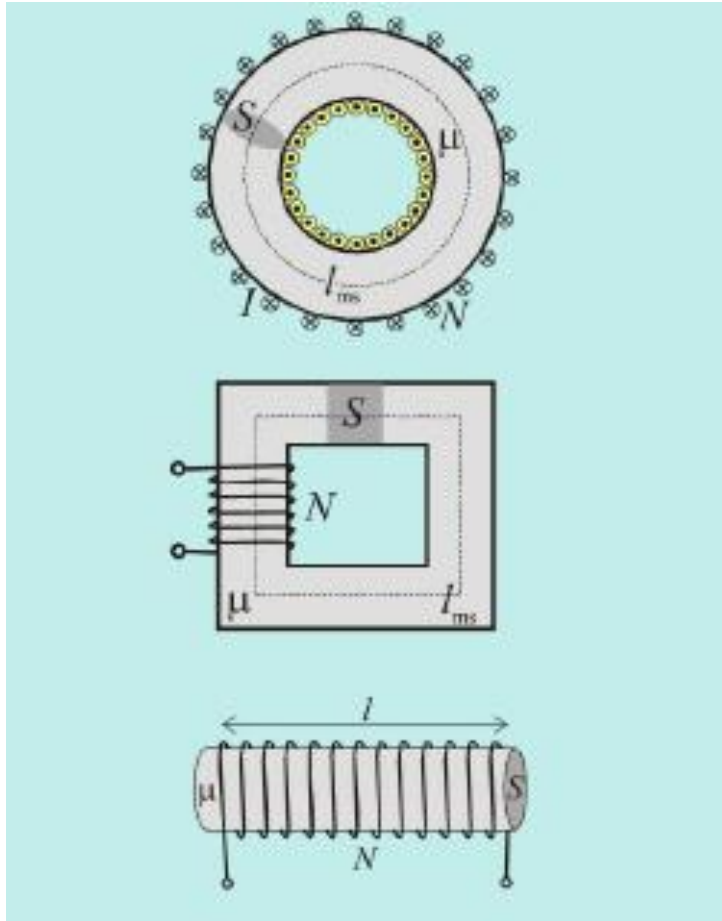
STRUJNO-STRUJNO PRETVARANJE



KAPACITIVNOST U
MEĐUKOLU

INDUKTIVNOST ILI KAPACITIVNOST SE MOGU UPOTREBITI KAO
BAFERSKO MEĐUKOLO IZMEĐU DVA DIREKTNA PRETVARAČA

HVALA NA PAŽNJI !!!



PITANJA?



OKTOBAR 2016