

Elektronske komponente

(Osnovne akademske studije, II semestar, 6 ESPB)

Elektronske komponente - Syllabus

1. Elektronske komponente i štampane ploče

2. Otpornici stalne otpornosti

3. Otpornici promenljive otpornosti. Nelinearni otpornici

4. Kondenzatori

5. Kalemovi

6. Transformatori

7. Prekidači i osigurači

8. Poluprovodnici

9. pn spoj

10. Diode

11. Bipolarni tranzistor

12. Osnovne primene bipolarnog tranzistora

13. MOS tranzistor

14. Osnovne primene MOS tranzistora

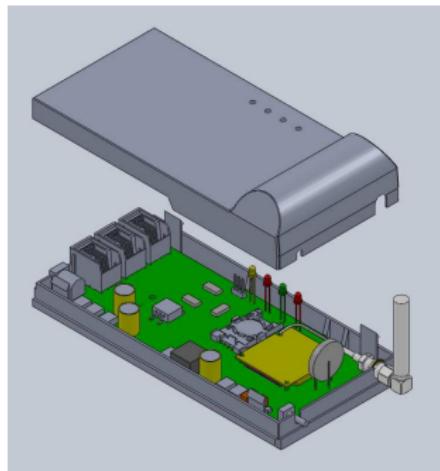
15. Praktični aspekti primene elektronskih komponenata

Deo I

Elektronske komponente i štampane ploče

Sadržaj

- 1 Elektronske komponente
- 2 Štampane ploče



Deo 1

Elektronske komponente

Elektronske komponente

Definicija i podela

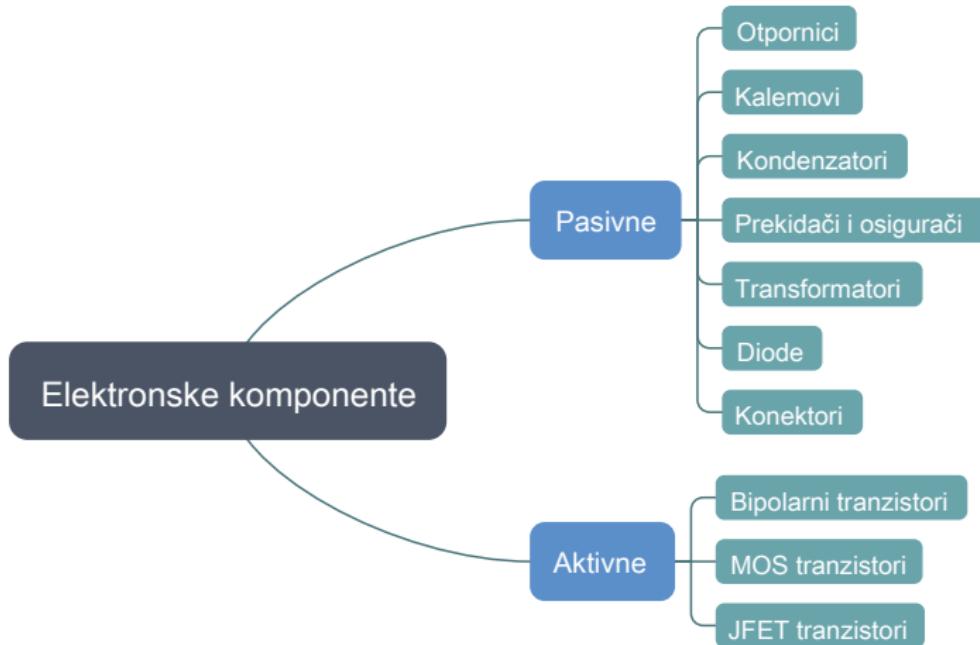
Elektronske komponente predstavljaju naprave koje na određeni način formiraju ili utiču na elektrostatičko polje, elektromagnetno polje i raspodelu nanelektrisanja, odnosno protok elektrona u električnim i elektronskim kolima.

Prema mogućnosti da kontrolišu električni signal mogu se podeliti na **pasivne i aktivne**. Pasivne komponente se uobičajeno definišu kao komponente koje ne mogu da pojačavaju snagu električnog signala. Nasuprot njima, aktivne komponente mogu da pojačavaju snagu električnog signala.

Formalno gledano, električno kolo (*electric circuit*) koje sadrži najmanje jednu aktivnu komponentu naziva se elektronsko kolo (*electronic circuit*). Praktično, terminologija nije jedinstvena, pa je češće u upotrebi termin elektronsko kolo.

Elektronske komponente

Podela



Elektronske komponente

Podela

Prema broju komponenata u kućištu:

- **diskretne komponente** – u jednom kućištu se nalazi samo jedna komponenta.
- **integrisana kola** – u jednom kućištu se nalazi više komponenta, povezanih u funkcionalnu celinu.

Integrirana kola se dele na:

- debeloslojna i tankoslojna (sadrže isključivo pasivne komponente u obliku slojeva *na* jednom komadu materijala – supstratu)
- monolitna (sadrže i aktivne i pasivne komponente u obliku struktura *u* jednom komadu materijala – supstratu)
- hibridna (sadrže i aktivne i pasivne komponente sa različitim supstratima)

Elektronske komponente

Kućišta

Svrha kućišta je fizičko–hemijska zaštita komponente, kao i ostvarivanje električnog kontakta sa ostalim delovima kola. Postoji veliki broj tipova kućišta, od kojih su neka definisana odgovarajućim standardima, a neka specificiraju sami proizvođači. Zatvaranje komponente u kućište naziva se enkapsulacija i ona obezbeđuje zaštitu od uticaja spoljašnje sredine, pre svega zaštitu od mehaničkih oštećenja, vlage i saliniteta. Na kućištima se takođe nalaze i otvori ili žljebovi za pričvršćivanje odgovarajućih hladnjaka. Ako su kućišta dovoljnih dimezija, na njima se nalaze oznake tipa komponente i proizvođača.

Ista komponenta se može naći u više različitih tipova kućišta!

Elektronske komponente

Podela

Elektronske komponente se tipično montiraju na štampane ploče, kao i na panele uređaja. Panel predstavlja deo stranice *kućišta uređaja*¹.

Prema načinu montaže kućišta na štampanu ploču, komponente se dele na:

- komponente sa izvodima (*Through Hole – TH*)
- komponente za površinsku montažu (*Surface Mounting Devices – SMD*)

Komponente koje se montiraju na panele nazivaju se *Panel Mounted Devices*.

¹Ne kućišta komponente.

Elektronske komponente

Tehničke specifikacije

Tehničke specifikacije (*Datasheet*) predstavljaju skup podataka koji karakterišu komponentu, pre svega sa stanovišta primene u elektronskim kolima, a ne materijala i konstrukcije. Podaci se generalno mogu podeliti u tri grupe:

- numerički parametri
- parametarski dijagrami
- mehanički podaci

Numerički parametri se prikazuju u tabelarnom obliku i obuhvataju: granične radne uslove (*Absolute Maximum Ratings*), termičke karakteristike (*Thermal Characteristics*) i tipične vrednosti električnih karakteristika (*Electrical Characteristics*). Parametarski dijagrami predstavljaju skup dijagrama koji opisuju promene karakteristika komponente, a u zavisnosti od radnih uslova. Mehanički podaci obuhvataju opis i dimenzije kućišta komponente, kao i zbirnih pakovanja u kojima se isporučuju.

Deo 2

Štampane ploče

(Informativno²)

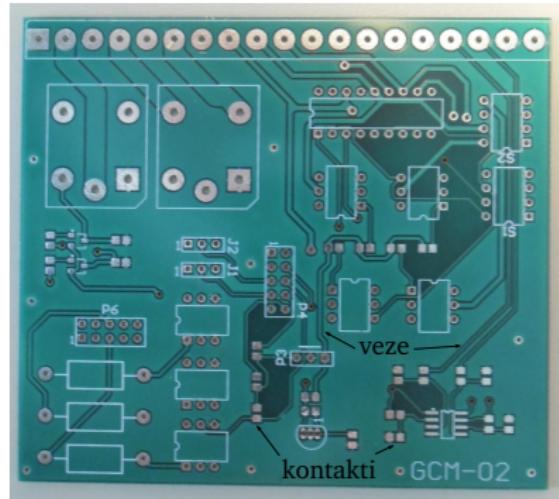
²Materijal sa oznakom „Informativno“ nije neophodan za polaganje ispita.



Štampane ploče

Definicija

Štampana ploča (*Printed Circuit Board – PCB*) predstavlja objekat od izolacionog materijala, na čijim se površinama nalaze električni kontakti za elektronske komponente, kao i veze između njih, koje su od provodnog materijala.



Štampane ploče

Poprečni presek



FR4 je fiberglas očvrstnut epoksidnom smolom. Električni je izolator i nije lako zapaljiv. Najčešće se koristi FR4 debljine 1,6 mm. Debljina bakra je najčešće 35 μm . Linije veza i električni kontakti se definišu na slojevima bakra, selektivnim nagrizanjem (bakar se zaštiti na mestima gde treba da budu linije veza i električni kontakti, a ostatak se ukloni hemijskim putem).

Štampane ploče

Podela

Prema broju slojeva na kojima se nalaze električne veze:

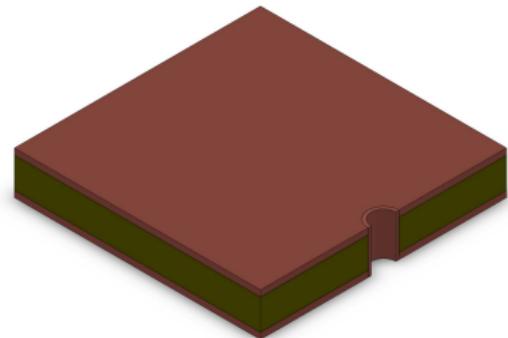
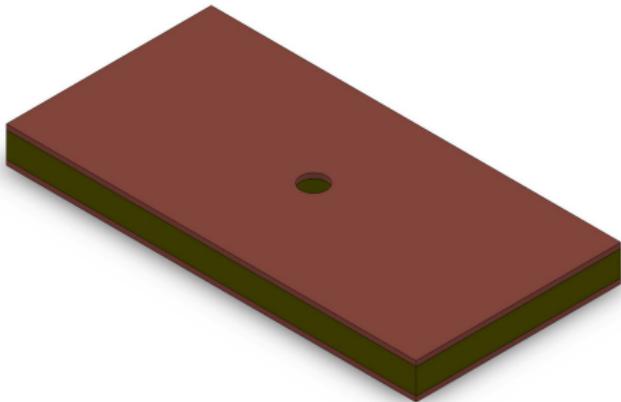
- jednoslojne
 - jednostrane: električne veze samo sa jedne strane
 - dvostrane: električne veze sa obe strane
- višeslojne (sastoje se od više jednoslojnih ploča, koje su međusobno električno izolovane i jedna preko druge slepljene pod pritiskom na odgovarajućoj temperaturi)

Prema vrsti izolacionog materijala:

- čvrste (*rigid*)
 - fiberglas
 - teflon
 - ...
- savitljive (*flexy*)

Štampane ploče

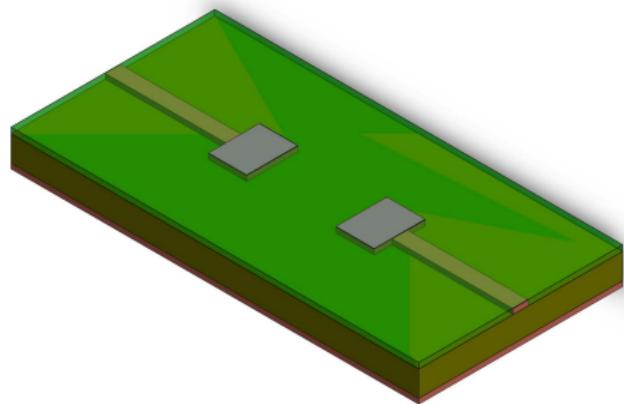
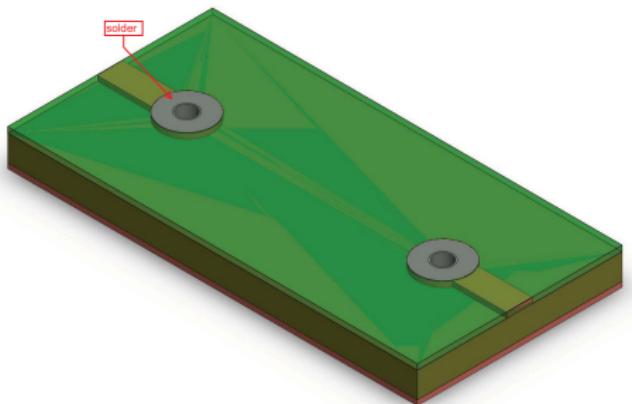
Veze između slojeva



Veze između slojeva realizuju se bušenjem rupa i oblaganjem njihove unutrašnjosti bakrom. Veza između dva susedna sloja bakra naziva se *via*.

Štampane ploče

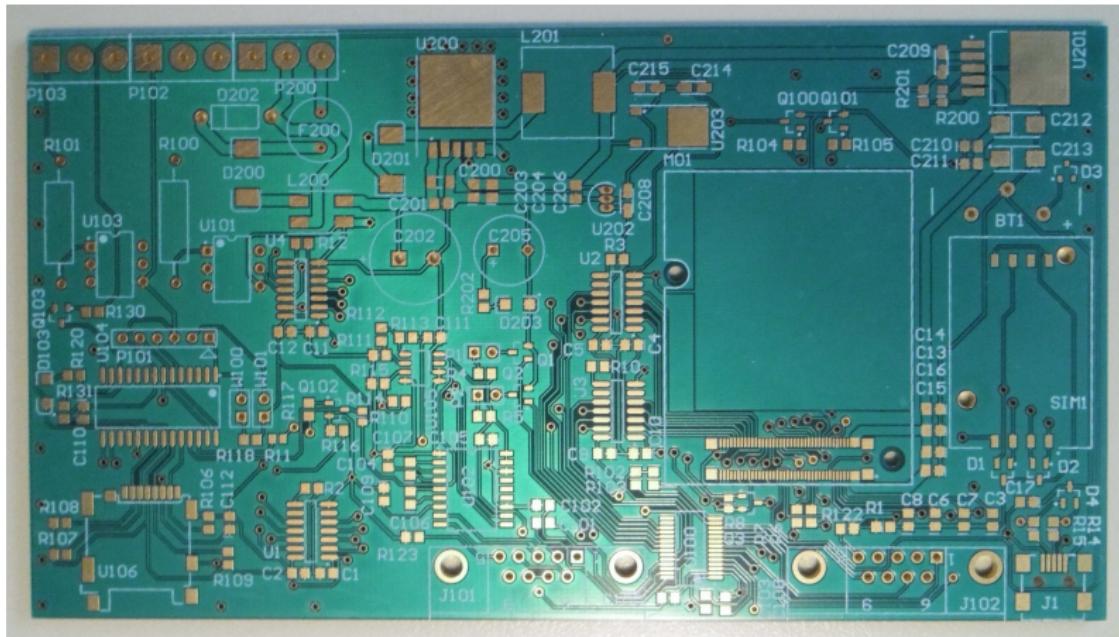
Električni kontakti



Električni kontakti su od legura visokoprovodnih materijala koje se nanose preko bakra (*solder*). Linije veza se prekrivaju slojem polimera koji je tipično zelene, a može biti i neke druge boje. Polimer štiti linije veza od oksidacije.

Štampane ploče

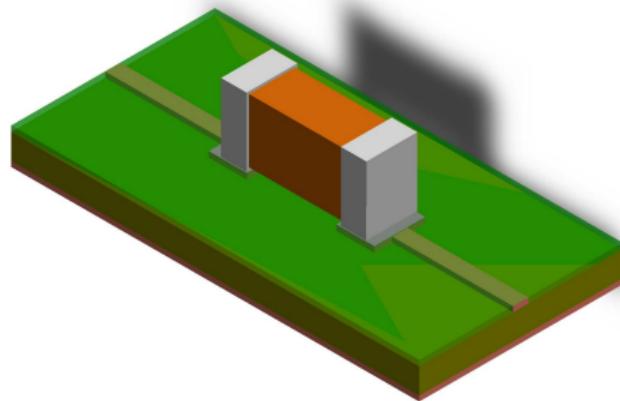
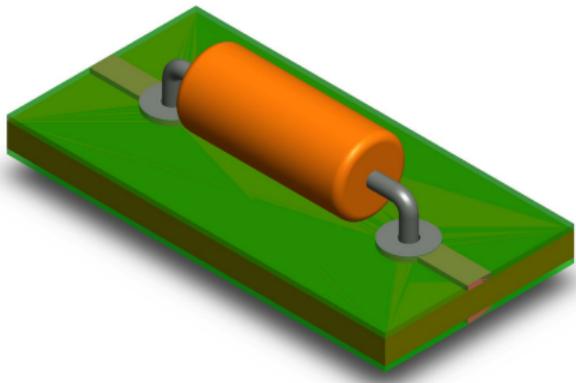
Oznake



Označavanje se vrši sito–štampom.

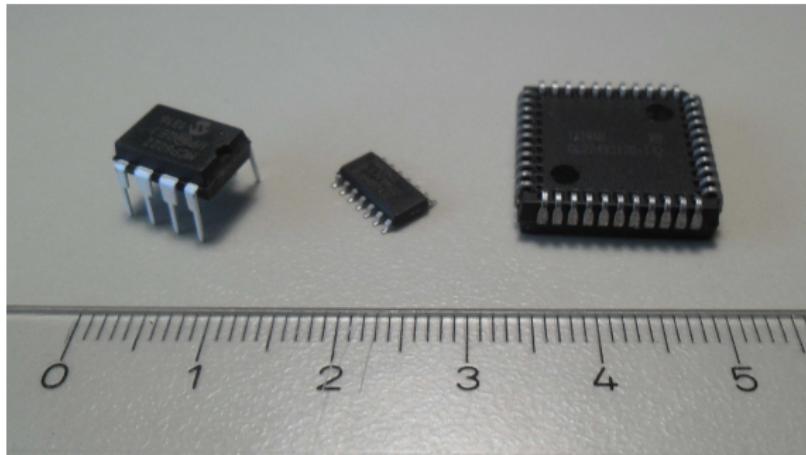
Štampane ploče

Umetanje komponenata



Komponente sa izvodima (levo) i komponente za površinsku montažu (desno) se umeću na štampatu ploču, a zatim se vrši njihovo lemljenje. Umetanje se vrši automatski, specijalizovanim mašinama. Lemljenje može biti talasno (*wave soldering*) ili razливanjem (*reflow soldering*).

Štampane ploče



Integrисана kola u kućištima sa izvodima (prvo s leva) i SMD kućištima pre montaže na štampanu ploču. Integrисана kola u kućištima sa izvodima mogu se montirati i u odgovarajuća podnožja, tako da se po potrebi mogu zameniti bez razlemljivanja.

Štampane ploče

Štampana ploča spremna za ugradnju



Štampane ploče

Prednosti SMD komponenata

U odnosu na komponente sa izvodima, SMD komponente imaju sledeće prednosti:

- zauzimaju manje mesta na štampanoj ploči, jer su manjih dimenzija;
- pouzdanost im je veća, jer nemaju izvode koji su podložni mehaničkim naprezanjima;
- uticaj parazitnih komponenata³ je manji, takođe zbog nepostojanja izvoda;
- brzina montaže na štampanu ploču je veća, pa su vreme i troškovi proizvodnje manji;

Međutim, iz tehnoloških i konstrukcionih razloga, ne postoje sve komponente u obe varijante.

³Parazitna komponenta je „nusproizvod“ koji neizbežno nastaje kao posledica konstrukcije regularne komponente.

Deo I

Otpornici

Sadržaj

1 Uvodne napomene

- Jednosmerni signali
- Naizmenični signali

2 Otpornici stalne otpornosti

3 Otpornici promenljive otpornosti

- Potenciometri
- Trimeri

4 Nelinearni otpornici

- NTC otpornici
- PTC otpornici
- Varistori
- Fotoootpornici

Deo 1

Uvodne napomene

Sadržaj

1 Uvodne napomene

- Jednosmerni signali
- Naizmenični signali

2 Otpornici stalne otpornosti

3 Otpornici promenljive otpornosti

- Potenciometri
- Trimeri

4 Nelinearni otpornici

- NTC otpornici
- PTC otpornici
- Varistori
- Fotootpornici

Jednosmerni signali

DC - *Direct Current*

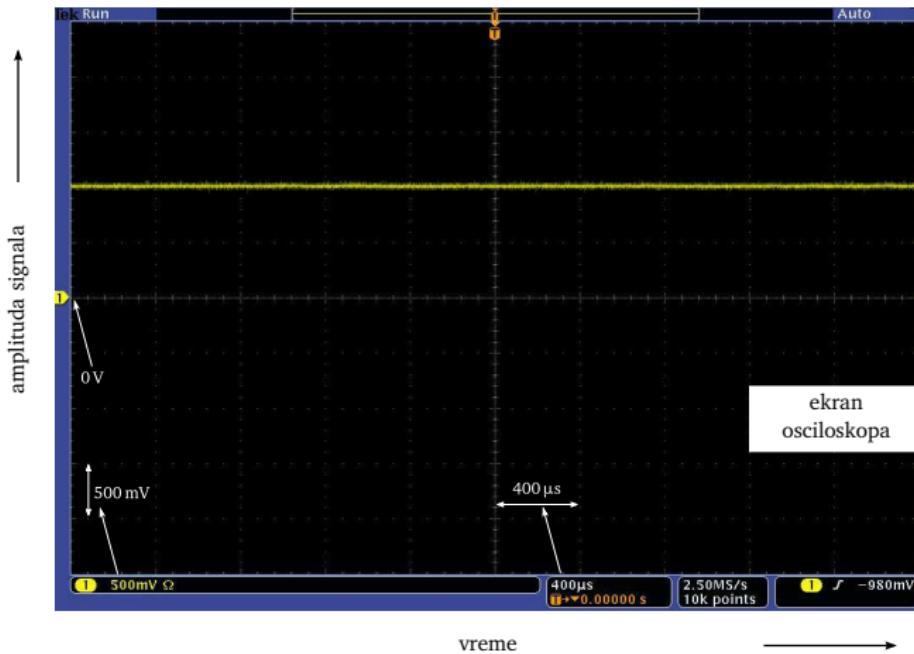
Jednosmerni električni signal ne menja svoj intenzitet (amplitudu) u vremenu.

Električni simboli za izvore jednosmernog napona:



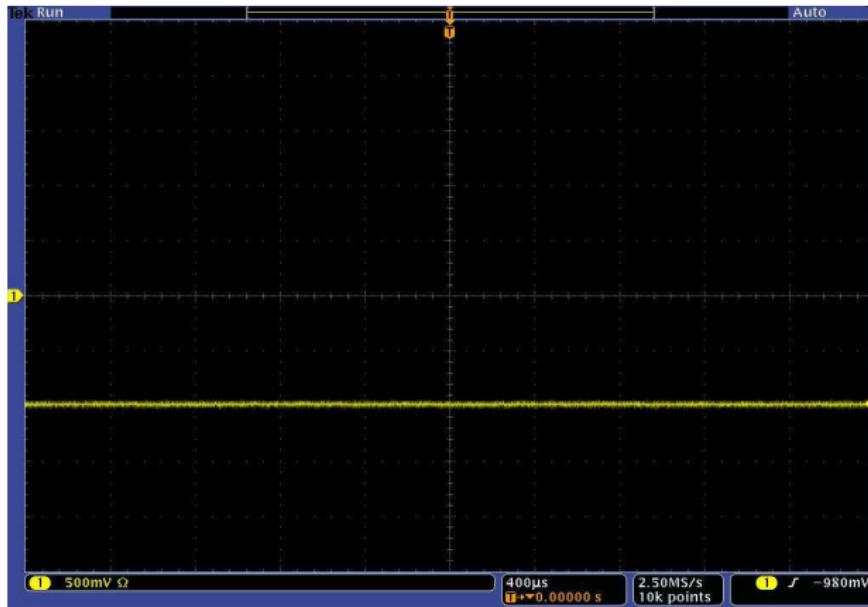
Jednosmerni signali

Jednosmerni napon amplitude $U = 1\text{V}$



Jednosmerni signali

Jednosmerni napon amplitude $U = -1\text{ V}$



Sadržaj

1 Uvodne napomene

- Jednosmerni signali
- Naizmenični signali

2 Otpornici stalne otpornosti

3 Otpornici promenljive otpornosti

- Potenciometri
- Trimeri

4 Nelinearni otpornici

- NTC otpornici
- PTC otpornici
- Varistori
- Fotootpornici

Naizmenični signali

AC - *Alternating Current*

Naizmenični električni signal menja svoj intenzitet (amplitudu) u vremenu, oko neke referentne vrednosti.

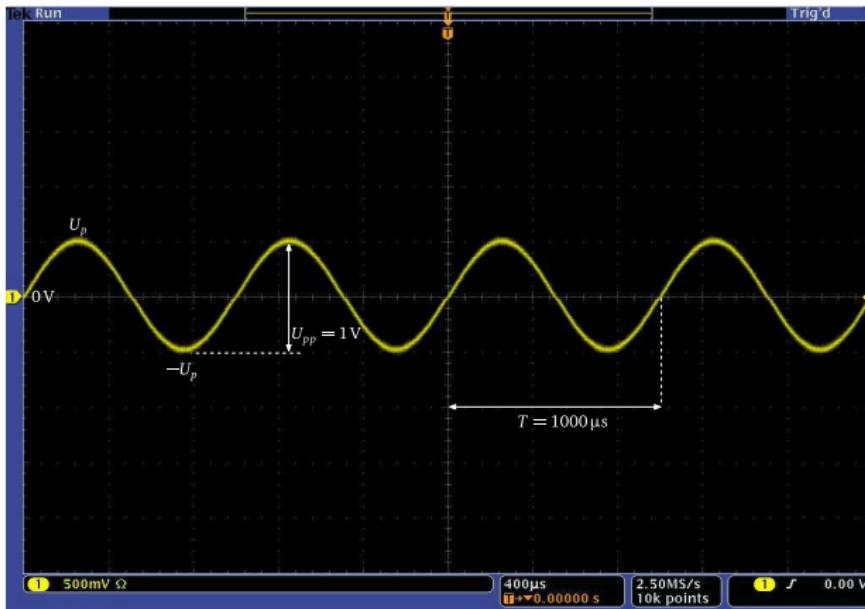
Električni simbol za izvor naizmeničnog napona:



Naizmenični signal se karakteriše periodom T , odnosno učestanošću $f = \frac{1}{T}$. Smatra se da je signal prostoperiodična funkcija (sin ili cos), koja se ponavlja u vremenu.

Naizmenični signali

Naizmenični napon amplitude $U_p = 0,5 \text{ V}$ i učestanosti $f = 1 \text{ kHz}$



Naizmenični signali

Vršna i efektivna vrednost

Maksimalna vrednost amplitudine naizmeničnog signala naziva se *vršna vrednost* (*peak value*) U_p . Ukupna promena amplitudine predstavlja razliku između dve vršne vrednosti (*peak-to-peak*) U_{pp} . Definiše se još i efektivna vrednost¹ (*root mean square*) $U_{eff} \equiv U_{rms}$.

Za signal oblika sinusa je $U_{eff} = \frac{U_p}{\sqrt{2}}$.

Iz praktičnih razloga se za opis naizmeničnih signala koristi *ugaona učestanost* (*angular frequency*) $\omega = 2\pi f$.

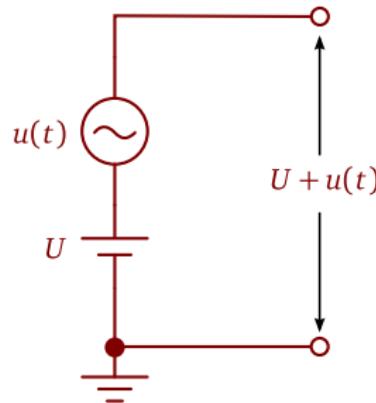
$$u(t) = U_p \sin(\omega t)$$

¹Videti predavanja iz predmeta Elektrotehnika II, kao i predavanja o kondenzatorima.

Naizmenični signali

Superpozicija signala

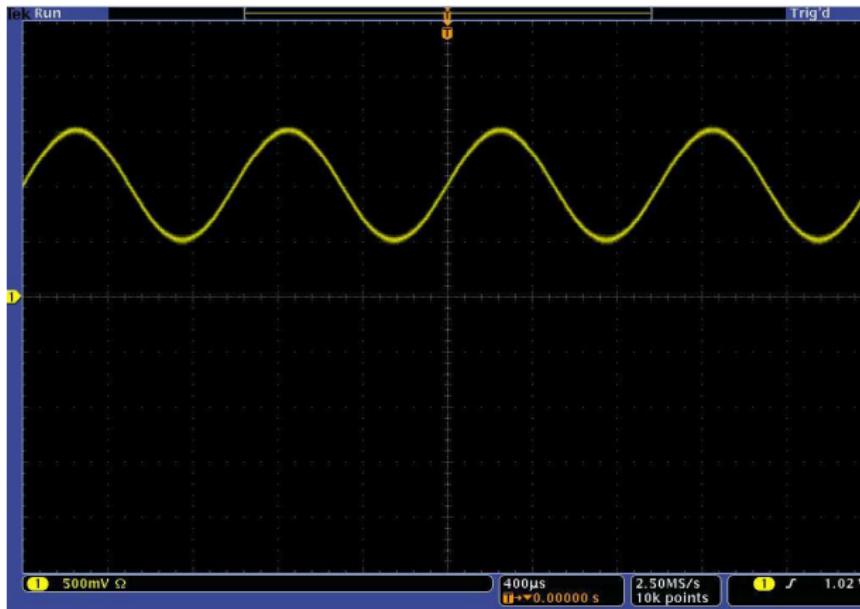
Za jednosmerne i naizmenične signale važi princip superpozicije.



DC signal koji je superponiran na AC signal naziva se *offset (offset)*.

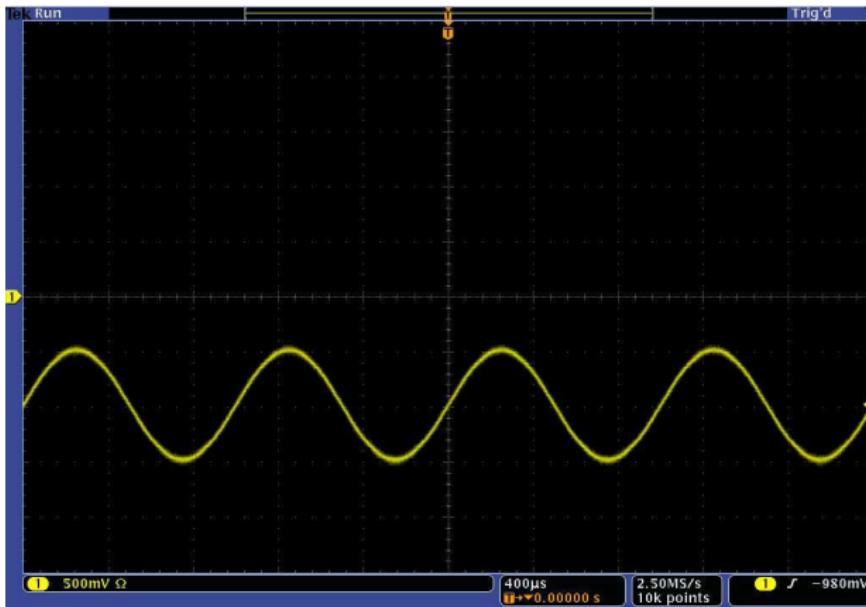
Naizmenični signali

Naizmenični napon amplitude $U_p = 0,5 \text{ V}$ i učestanosti $f = 1 \text{ kHz}$ sa ofsetom $U = 1 \text{ V}$



Naizmenični signali

Naizmenični napon amplitude $U_p = 0,5 \text{ V}$ i učestanosti $f = 1 \text{ kHz}$ sa ofsetom $U = -1 \text{ V}$



Deo 2

Otpornici stalne otpornosti

Definicije

Otpornici (*resistors*) su elektronske komponente koje se karakterišu tačno određenom vrednošću otpornosti, a čija je namena regulacija raspodele električne energije između delova elektronskog kola.

Otpornost (resistance) predstavlja kvantitativnu meru sposobnosti otpornika da se suprotstavi protoku električne struje kroz njega.

Specifična električna otpornost (resistivity) predstavlja fizičku karakteristiku materijala od koga je otpornik napravljen i opisuje sposobnost tog materijala da se suprotstavi protoku električne struje.

Otpornost

Otpornost

Kod otpornika stalne otpornosti struja i napon su direktno proporcionalni, pa je otpornost R konstantna.

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

Uobičajeni električni simboli za otpornike stalne otpornosti:



Otpornost

Specifična električna otpornost ρ

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

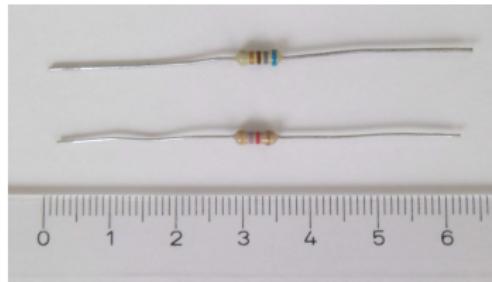
l i S su dužina i površina poprečnog preseka tela otpornika, respektivno. Jedinica za specifičnu električnu otpornost je Ωm , a u upotrebi je i $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

Materijal	ρ (Ωm) na 20°C
zlato	$2,45 \cdot 10^{-8}$
morska voda	$2 \cdot 10^{-1}$
suvo drvo	$10^3 - 10^4$
vazduh	$(1,3 - 3,3) \cdot 10^{16}$
teflon	$10^{22} - 10^{24}$

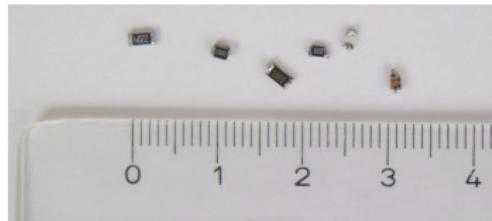
Osnovni tipovi

Podela prema načinu montaže

- Otpornici sa izvodima koji prolaze kroz rupe na štampanoj ploči (*through hole*).



- Otpornici za površinsku montažu (SMD ili čip otpornici).



Osnovni parametri

- **Nazivna (nominalna) otpornost.**
- **Tolerancija (klasa tačnosti).**
- **Nazivna (nominalna) snaga.**

Nazivna otpornost se izražava u Ω (npr. $33\ \Omega$, $47\ k\Omega$, $1\ M\Omega$). Toleranca predstavlja odstupanje u odnosu na vrednost nazivne otpornosti i izražava se u procentima (npr. $\pm 5\%$). Nazivna snaga predstavlja maksimalnu dozvoljenu snagu na otporniku i izražava se u W (npr. $0,5\ W$).

Primer: Otpornik nazivne otpornosti $100\ \Omega$ sa 5% tolerancije može imati otpornost u opsegu $95\ \Omega$ do $105\ \Omega$.

Nazivna otpornost

Standardne vrednosti otpornosti

Standardne vrednosti otpornosti su raspodeljene po dekadama:

1Ω	-	10Ω
10Ω	-	100Ω
100Ω	-	$1k\Omega$
$1k\Omega$	-	$10k\Omega$
$10k\Omega$	-	$100k\Omega$
$100k\Omega$	-	$1M\Omega$
$1M\Omega$	-	$10M\Omega$

Postoje i vrednosti manje od 1Ω i veće od $10M\Omega$.

Nazivna otpornost

Standardne vrednosti otpornosti

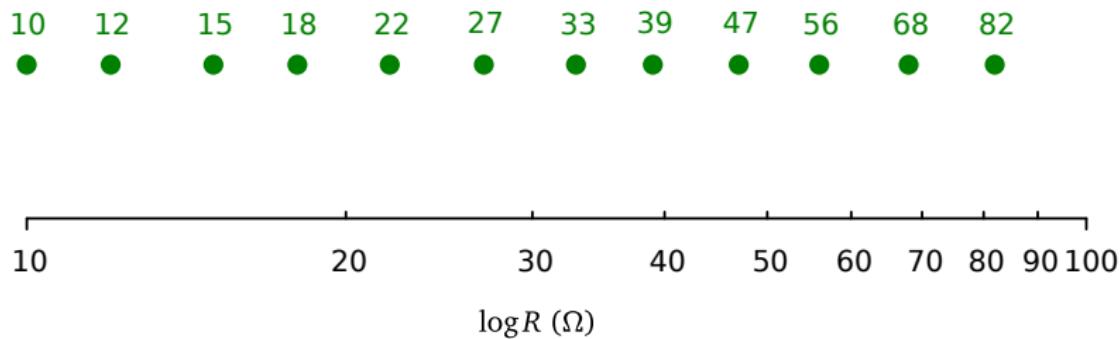
Unutar svake dekade nalazi se određeni broj standardnih vrednosti otpornosti, tako da se formiraju E-nizovi (*E-series*). Broj iza slova E u oznaci niza označava koliko standardnih vrednosti otpornosti ima u jednoj dekadi.

Primer: Oznaka E12 govori da se unutar jedne dekade nalazi 12 standardnih vrednosti otpornosti. Korak između vrednosti otpornosti određen je kao $10^{(\frac{1}{12})} \approx 1,2$. Svaka naredna vrednost unutar dekade se dobija kao proizvod prethodne vrednosti i koeficijenta 1,2. Vrednosti se zaokružuju tako da su približno ekvidistantne unutar jedne dekade na logaritamskoj skali (10Ω , 12Ω , 15Ω , 18Ω , 22Ω , 27Ω , 33Ω , 39Ω , 47Ω , 56Ω , 68Ω , 82Ω). Vrednost 100Ω pripada narednoj dekadi.

Nazivna otpornost

Standardne vrednosti otpornosti

Primer: Niz E12



Za svaku dekadu u E12 nizu postoji odgovarajuća vrednost otpornosti, npr. $2,2\ \Omega$, $22\ \Omega$, $220\ \Omega$, $2,2\text{ k}\Omega$, $22\text{ k}\Omega$, $220\text{ k}\Omega$, $2,2\text{ M}\Omega$

Nazivna otpornost

Standardne vrednosti otpornosti - E nizovi

Niz	Tolerancija
E6	$\pm 20\%$
E12	$\pm 10\%$
E24	$\pm 5\%$ i $\pm 1\%$
E48	$\pm 2\%$
E96	$\pm 1\%$
E192	$\pm 0,5\%$, $\pm 0,25\%$ i $\pm 0,1\%$

U praksi se najčešće koriste otpornici iz niza E24:

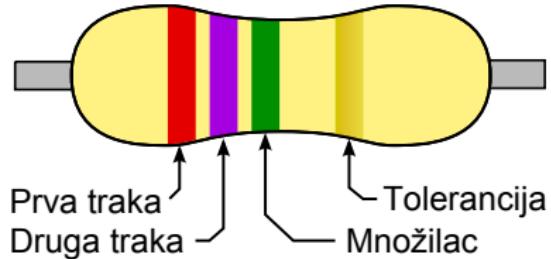
10	11	12	13	15	16
18	20	22	24	27	30
33	36	39	43	47	51
56	62	68	75	82	91

Označavanje otpornika

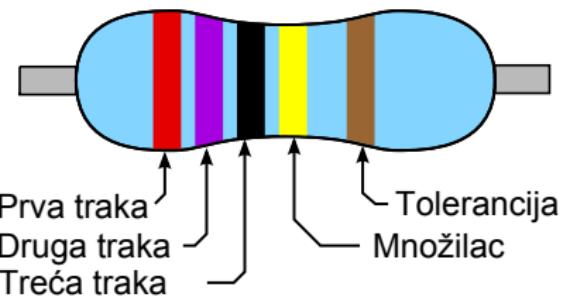
Označavanje otpornika sa izvodima

Označavanje se vrši pomoću obojenih traka na telu otpornika.

4 trake



5 trake



Označavanje otpornika

Označavanje otpornika sa izvodima

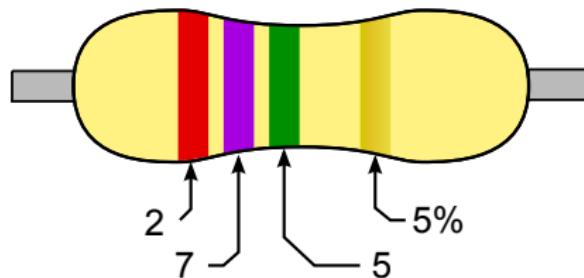
Boja	Prva traka	Druga traka	Treća traka	Množilac	Tolerancija
Crna	0	0	0	$\times 10^0$	
Braon	1	1	1	$\times 10^1$	1%
Crvena	2	2	2	$\times 10^2$	2%
Narandž.	3	3	3	$\times 10^3$	
Žuta	4	4	4	$\times 10^4$	
Zelena	5	5	5	$\times 10^5$	0,5%
Plava	6	6	6	$\times 10^6$	0,25%
Ljubič.	7	7	7	$\times 10^7$	0,1%
Siva	8	8	8	$\times 10^8$	0,05%
Bela	9	9	9	$\times 10^9$	
Zlatna				$\times 10^{-1}$	5%
Srebrna				$\times 10^{-2}$	10%
Nema boje					20%

Označavanje otpornika

Označavanje otpornika sa izvodima

Primer:

4 trake



$$R = 27 \times 10^5 \Omega \pm 5\% = 2,7 \text{ M}\Omega \pm 5\%$$

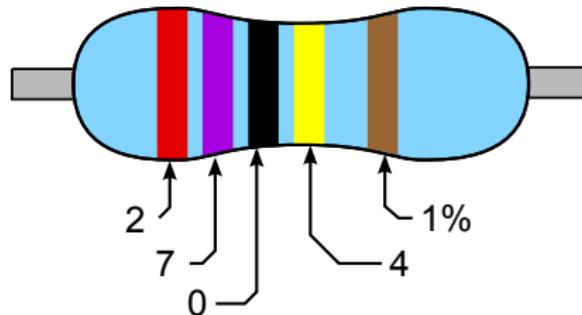
Nizovi E6, E12 i E24.

Označavanje otpornika

Označavanje otpornika sa izvodima

Primer:

5 traka



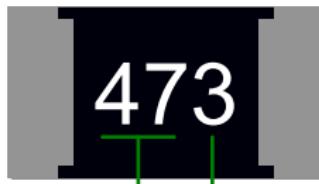
$$R = 270 \times 10^4 \Omega \pm 1\% = 2,7 \text{ M}\Omega \pm 1\%$$

Nizovi E24, E48, E96 i E192.

Označavanje otpornika

Označavanje SMD otpornika

Označavanje se vrši pomoću 3 ili 4 cifre na telu otpornika.



značajne
cifre množilac



značajne
cifre množilac

$$473 \Rightarrow 47 \times 10^3 \Omega = 47 \text{ k}\Omega$$

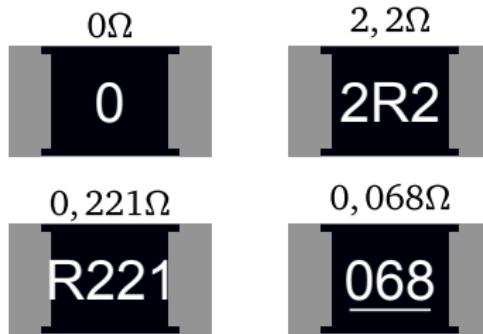
$$4703 \Rightarrow 470 \times 10^3 \Omega = 470 \text{ k}\Omega$$

Oznaka sa 3 cifre podrazumeva toleranciju $\pm 5\%$, a oznaka sa 4 cifre toleranciju $\pm 1\%$.

Označavanje otpornika

Označavanje SMD otpornika

Označavanje otpornika malih otpornosti².

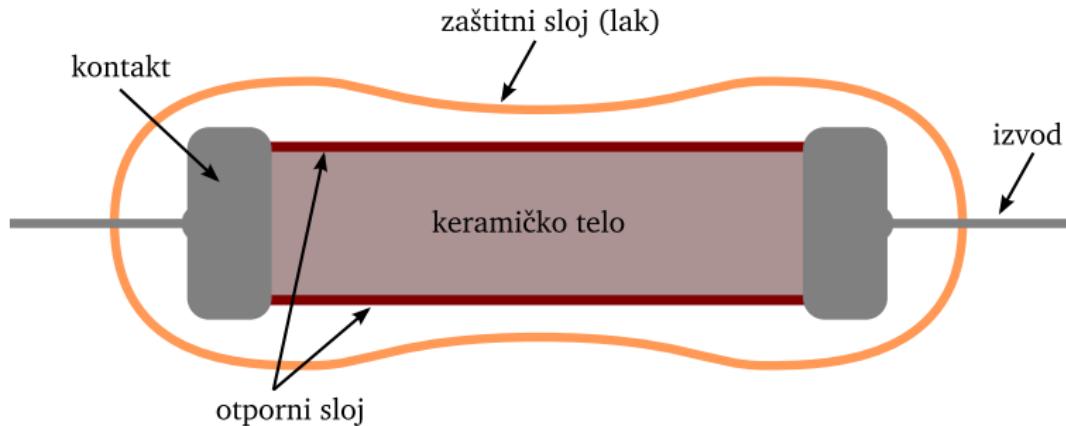


SMD otpornici se označavaju i pomoću posebnih kodova, prema standardu EIA-96. Na nekim otpornicima, zbog malih dimenzija, ne-ma oznaka.

²Otpornik otpornosti $0\ \Omega$ ima primenu u elektronskim kolima.

Konstrukcija otpornika

Ilustracija konstrukcije otpornika sa izvodima (gore) i SMD otpornika (dole)



Materijali

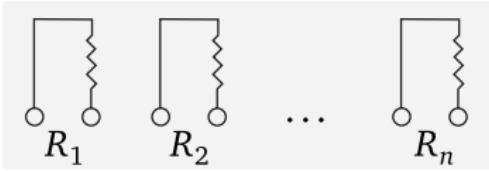
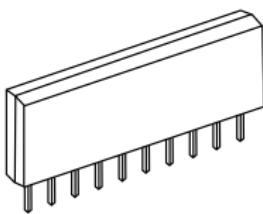
Podela prema materijalu od kojeg je izrađen otporni sloj

- *ugljenični*, sa otpornim slojem od pirolitičkog ugljenika; (tipično otpornici sa 5% tolerancije)
- *metuloslojni*, sa otpornim slojem od legura metala (metalizirani), ili od oksida metala (metaloksidni), ili od metala i dielektrika (kermetni); (tipično otpornici sa 1% tolerancije)
- *kompozitni*
- *poluprovodnički*

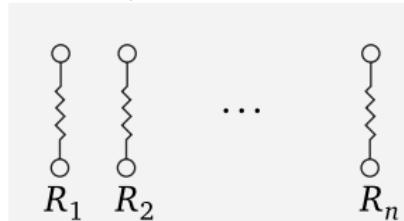
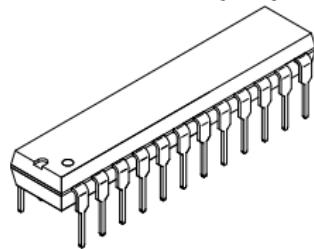
Otpornički moduli (mreže)

Više otpornika unutar jednog kućišta

Single In Line (SIL)



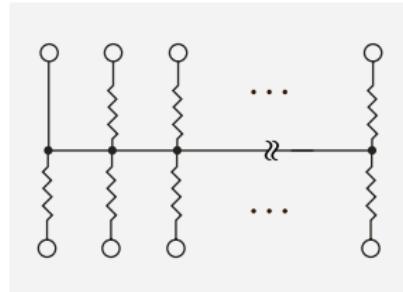
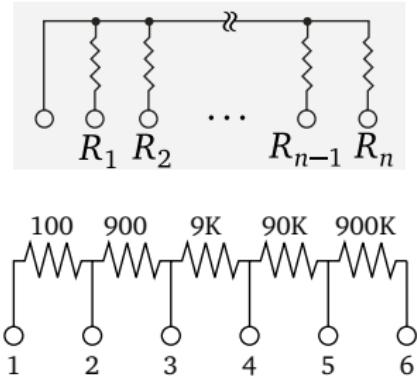
Dual In Line (DIL)



Otpornici su međusobno nezavisni.

Otporničke moduli (mreže)

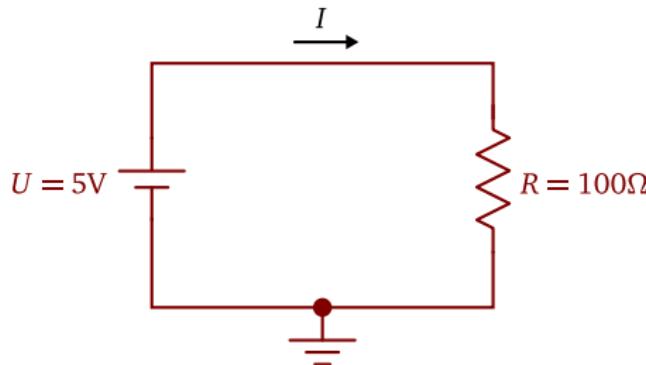
Više otpornika unutar jednog kućišta



Otpornici su međusobno povezani. Unutar jednog kućišta svi otpornici mogu imati iste ili različite vrednosti otpornosti.

Snaga na otporniku

Primer



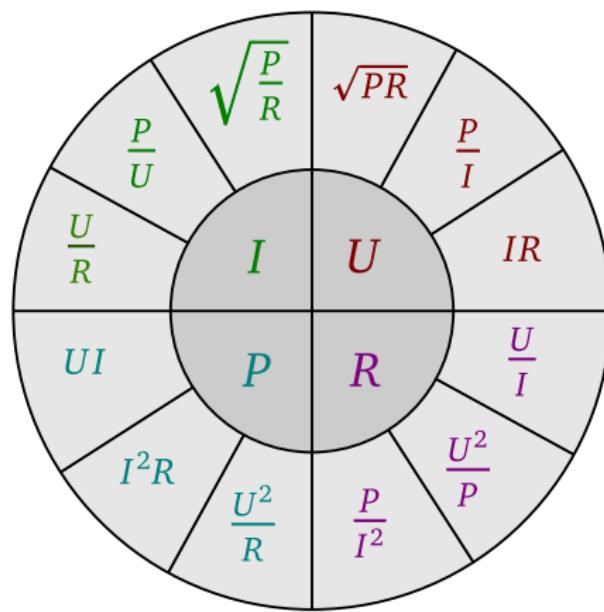
Kroz kolo na slici prolazi struja $I = \frac{U}{R} = 50\text{ mA}$. Na otporniku se razvija snaga:

$$P = UI \quad (3)$$

U ovom slučaju je $P = 5 \cdot 0,05 = 0,25\text{ W}$.

Snaga na otporniku

Omov točak



Nazivna snaga

Maksimalna struja kroz otpornik

Maksimalna struja I_{max} koja može da prođe kroz otpornik nazivne otpornosti R određena je njegovom nazivnom snagom P_n :

$$I_{max} = \sqrt{\frac{P_n}{R}} \quad (4)$$

Ako kroz otpornik prođe veća struja, dolazi do njegovog pregrevanja, što rezultira razaranjem otpornog materijala. Posledica je, u najboljem slučaju, prestanak rada elektronskog kola u koje je otpornik ugrađen.



Nazivna snaga

Standardne vrednosti

Standardne vrednosti za nazivnu snagu otpornika:

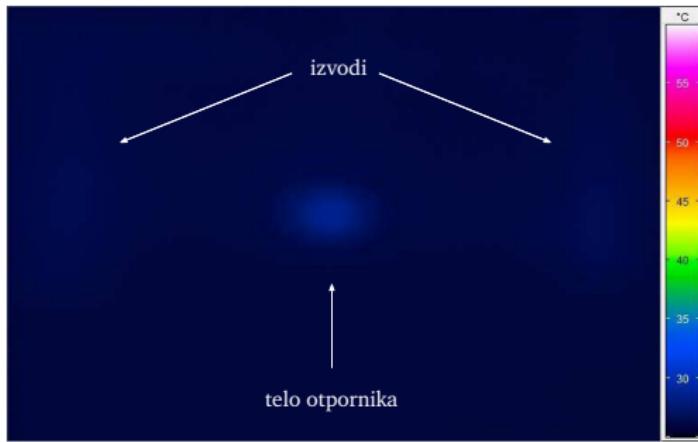
Snaga P (W)
0,125
0,25
0,5
1,0
2,0

Primer: Ako je napon u kolu 5 V, a treba staviti otpornik od 180Ω , onda je struja kroz otpornik $I = 5/180 \simeq 28 \text{ mA}$. Snaga na otporniku je $P = 5 \cdot 0,028 = 0,15 \text{ W}$. Treba izabrati otpornik nazivne snage 0,25 W. Maksimalna struja koja može da prođe kroz otpornik je u tom slučaju $I_{max} = \sqrt{0,25/180} \simeq 37 \text{ mA}$.

Snaga na otporniku

Primer

Termovizijski prikaz metaloslojnog otpornika $R = 1 \text{ k}\Omega$, $P_n = 0,25 \text{ W}$, priključenog na napon $U = 5 \text{ V}$.

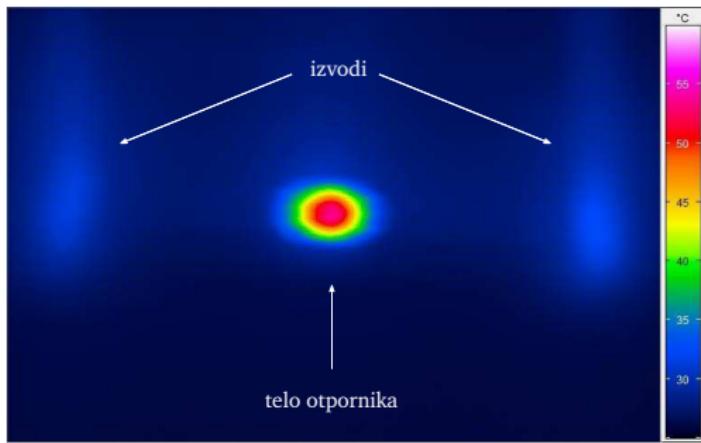


Struja kroz otpornik je 5 mA , a snaga na otporniku je $0,025 \text{ W}$. Maksimalna temperatura na telu otpornika je 29°C . Temperatura ambijenta je 26°C .

Snaga na otporniku

Primer

Termovizijski prikaz metaloslojnog otpornika $R = 1 \text{ k}\Omega$, $P_n = 0,25 \text{ W}$, priključenog na napon $U = 15 \text{ V}$.



Struja kroz otpornik je 15 mA , a snaga na otporniku je $0,225 \text{ W}$. Maksimalna temperatura na telu otpornika je 54°C . Temperatura ambijenta je 26°C .

Nazivna snaga

Maksimalni napon

Maksimalni napon na otporniku proizvođači daju u tehničkim specifikacijama. Međutim, to ne znači da se na svaki otpornik može dovesti maksimalni napon.

Primer: Otpornici otpornosti $10\ \Omega$ i $1\ M\Omega$ deklarisani su za istu nazivnu snagu $0,25\ W$ i maksimalni napon $250\ V$. Pošto je:

$$P = \frac{U_{max}^2}{R} = \frac{250^2}{10} = 6250\ W \gg 0,25\ W$$

$$P = \frac{U_{max}^2}{R} = \frac{250^2}{1 \cdot 10^6} = 0,0625\ W < 0,25\ W,$$

očigledno je da otpornik otpornosti $10\ \Omega$ ne može da se optereti maksimalnim naponom!

Nazivna snaga

Dozvoljeni napon

Iz nazivne snage se određuje **dozvoljeni napon** na otporniku:

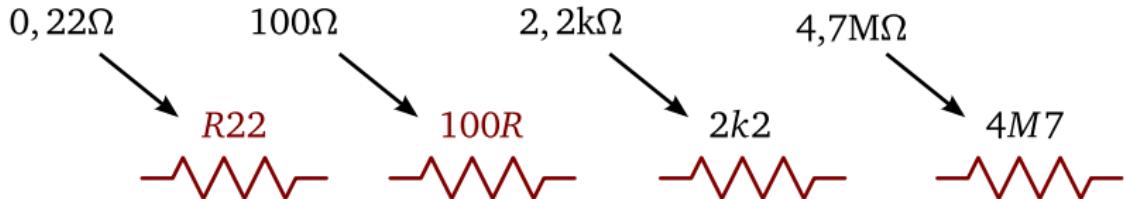
$$U \leq \sqrt{RP_n} \quad (5)$$

Za otpornik otpornosti 10Ω :

$$U \leq \sqrt{10 \cdot 0,25} \simeq 1,6\text{ V}.$$

U ovom slučaju je dozvoljeni napon približno 160 puta manji od maksimalnog!

Označavanje u električnim šemama



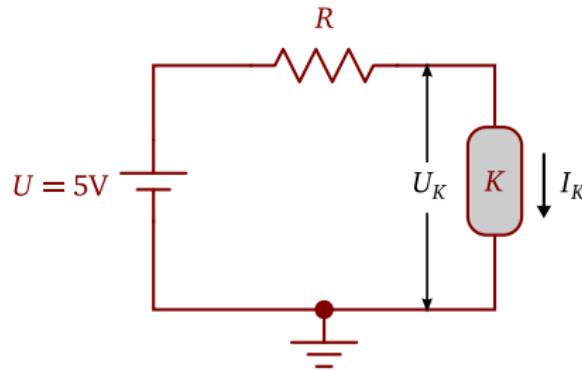
Podrazumeva se da su otpornici tolerancije 5% i nazivne snage 0,25 W.
U slučaju da nije tako, pored oznake se *obavezno* stavljaju toleran-
cija i/ili nazivna snaga!



Primeri primene

Ograničavanje struje u kolu

Potrebno je odrediti vrednost otpornosti otpornika R tako da struja kroz komponentu K ne bude veća od $I_K = 20 \text{ mA}$, pri naponu $U_K = 2,2 \text{ V}$.



Primeri primene

Ograničavanje struje u kolu

Vrednost otpornosti se izračunava kao:

$$R = \frac{U - U_K}{I_K} = \frac{5 - 2,2}{20 \cdot 10^{-3}} = 140 \Omega .$$

Uzima se najbliža standardna vrednost, koja je na „sigurnoj“ strani, u ovom slučaju 150Ω , sa 5% tolerancije. Snaga koja se razvija na otporniku je:

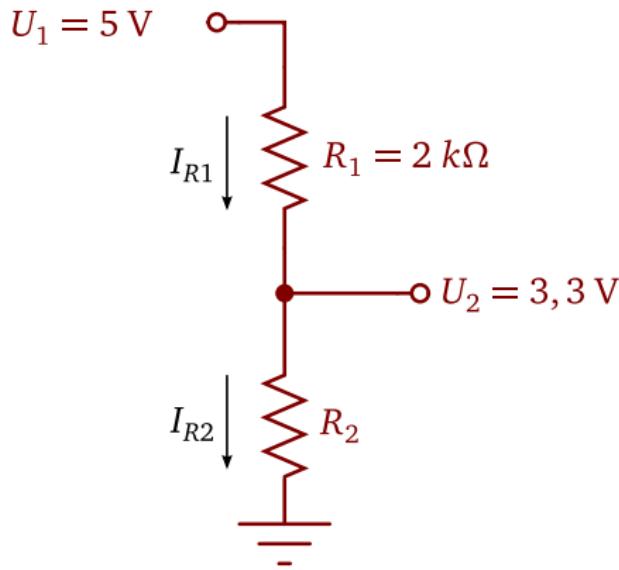
$$P = I_K^2 R = (20 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 150 = 0,06 \text{ W} , \quad (6)$$

pa se, s obzirom na dostupnost i cenu, može uzeti otpornik nazivne snage $0,25 \text{ W}$.

Primeri primene

Obezbeđivanje referentnog naponskog nivoa - naponski razdelnik

Potrebno je odrediti vrednost otpornosti otpornika R_2 tako da je referentni naponski nivo $U_2 = 3,3 \text{ V}$.



Primeri primene

Obezbeđivanje referentnog naponskog nivoa - naponski razdelnik

Naponski razdelnik:

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1 \quad (7)$$

Kod naponskog razdelnika se uobičajeno koriste otpornici sa 1% tolerancije (R_1 i R_2). Postoje i posebni otpornički moduli sa manjom tolerancijom.

Iz (7) je:

$$R_2 = \frac{U_2}{U_1 - U_2} R_1 = \frac{3,3}{5 - 3,3} \cdot 2 = 3,88 \text{ k}\Omega$$

Uzima se najbliža standardna vrednost od $3,92 \text{ k}\Omega$.

Primeri primene

Obezbeđivanje referentnog naponskog nivoa - naponski razdelnik

Struja kroz razdelnik je:

$$I_{R1} = I_{R2} = \frac{U_1}{R_1 + R_2} = \frac{5}{(2 + 3,92) \cdot 10^3} \simeq 0,85 \text{ mA}$$

Snaga na otpornicima:

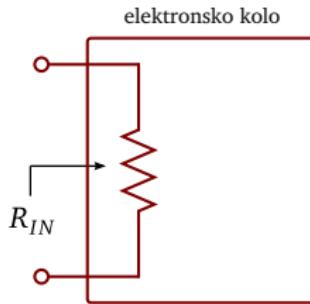
$$P_{R1} = I_{R1}^2 R_1 = (0,85 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (2 \cdot 10^3) \simeq 1,5 \text{ mW}$$

$$P_{R2} = I_{R2}^2 R_2 = (0,85 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (3,92 \cdot 10^3) \simeq 2,8 \text{ mW}$$

Primeri primene

Obezbeđivanje referentnog naponskog nivoa - naponski razdelnik

Svako elektronsko kolo može se okarakterisati *ekvivalentnom ulaznom otpornošću* R_{IN} koju pobudni signal na ulaznim priključcima „vidi“ kao opterećenje (*load*)³.



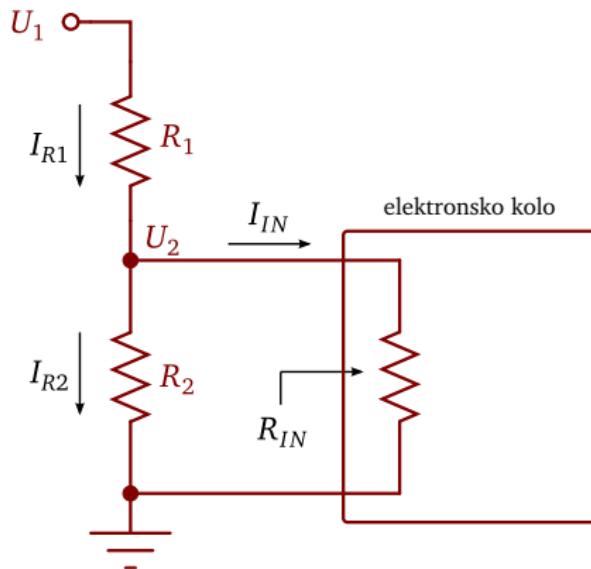
R_{IN} nije fizički otpornik!

³Otpornost R_{IN} se u literaturi označava i sa R_L i naziva *otpornost opterećenja*.

Primeri primene

Obezbeđivanje referentnog naponskog nivoa - naponski razdelnik

Idealni slučaj naponskog razdelnika podrazumeva da je otpornost R_{IN} beskonačno velika, a struja I_{IN} jednaka nuli.



Primeri primene

Obezbeđivanje referentnog naponskog nivoa - naponski razdelnik

U praksi kola imaju konačnu ulaznu otpornost i potrošači su struje. Zbog toga je pri projektovanju naponskog razdelnika potrebno imati u vidu vrednosti R_{IN} i I_{IN} . Poželjno je da je $R_{IN} \gg R_2$ jer je tada:

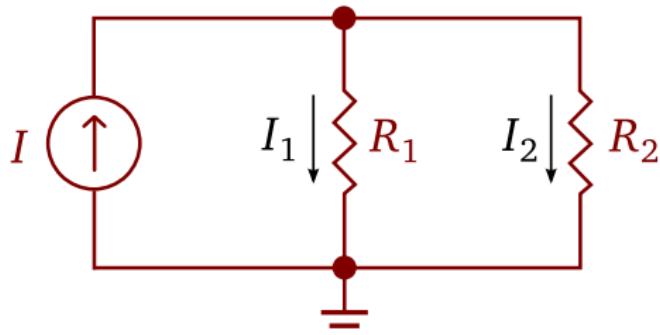
$$(R_2 \parallel R_{IN}) = \frac{R_2 R_{IN}}{R_2 + R_{IN}} \simeq \frac{R_2 R_{IN}}{R_{IN}} = R_2$$

Otpornost R_{IN} često nije konstantna vrednost, pa samim tim ni struja I_{IN} , za projektovanu vrednost napona U_2 , neće biti konstantna. U takvim slučajevima se umesto razdelnika koriste specijalizovana integrisana kola kao što su naponske reference i naponski regulatori.

Napomena: Naponski razdelnik se može predstaviti i preko Tevenenovog ekvivalentnog kola, pri čemu je $V_{Th} = U_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ i $R_{Th} = (R_1 \parallel R_2)$.

Primeri primene

Strujni razdelnik



$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

Primenjuje se kod mernih instrumenata⁴, u kolima senzora, za raspodelu snage, itd.

⁴Šant (shunt) otpornici.

Otpornici velike snage

Debeloslojni (*thick film*) i žičani motani (*wirewound*)

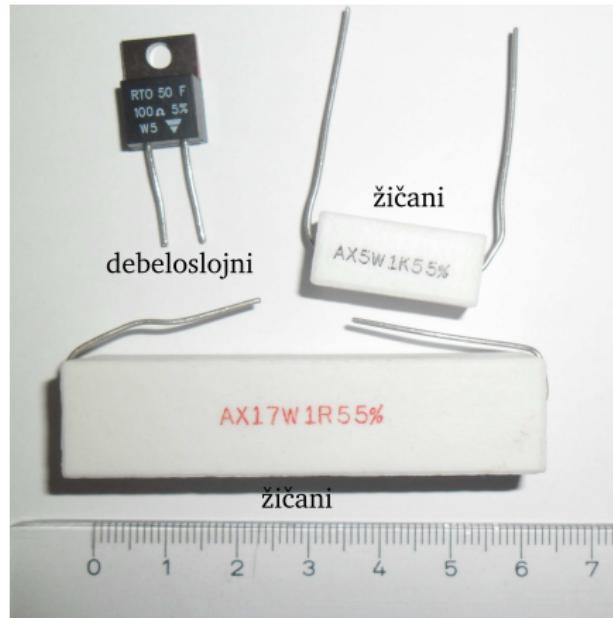
Debeloslojni otpornici su načinjeni od jednog ili više slojeva otpornog materijala. Proizvode se za nazivne snage tipično do 100 W. Za njihovu bezbednu primenu neophodno je na kućište otpornika montirati odgovarajući hladnjak!

Žičani otpornici su načinjeni od namotaja žice određene specifične otpornosti. Proizvode se za nazivne snage tipično do 50 W. Nedostatak u odnosu na debeloslojne otpornike je u postojanju izrazite parazitne induktivnosti. Kod nekih tipova je za bezbednu primenu neophodno na kućište otpornika montirati odgovarajući hladnjak!

Postoje i druge vrste otpornika velike snage, tipično za primene u elektroenergetici.

Otpornici velike snage

Debeloslojni (*thick film*) i žičani motani (*wirewound*)



Uticaj temperature

Temperaturni koeficijent

Otpornost otpornika se menja sa promenom temperature. Nazivna otpornost se podrazumevano specificira za sobnu temperaturu T_0 (tipično $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), a promena se opisuje korišćenjem temperaturnog koeficijenta α :

$$R(T) = R(T_0)(1 + \alpha|T - T_0|). \quad (8)$$

Temperaturni koeficijent se izražava u ppm/ $^{\circ}\text{C}$ (ppm – *Parts Per Million*)⁵ i može imati pozitivnu i negativnu vrednost. Po konvenciji, ako otpornost raste sa porastom temperature, temperaturni koeficijent je pozitivan. Ako otpornost opada sa porastom temperature, temperaturni koeficijent je negativan.

⁵ $1\text{ ppm} = 10^{-6}$.

Uticaj temperature

Temperaturni koeficijent - primer

Otpornik nazivne otpornosti $1\text{ k}\Omega$ deklarisan je od strane proizvođača za radne temperature u opsegu $-55\text{ }^\circ\text{C}$ do $155\text{ }^\circ\text{C}$, sa temperaturnim koeficijentom $\pm 200\text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

- ① Na temperaturi $T_{min} = -55\text{ }^\circ\text{C}$ otpornost može biti:

$$\begin{aligned}R(T_{min}) &= R(T_0)(1 + \alpha|T_{min} - T_0|) \\&= 1000(1 \pm 200 \cdot 10^{-6} \cdot |-55 - 25|) \\&= 1000(1 \pm 0,016) = 1000 \pm 16\Omega\end{aligned}$$

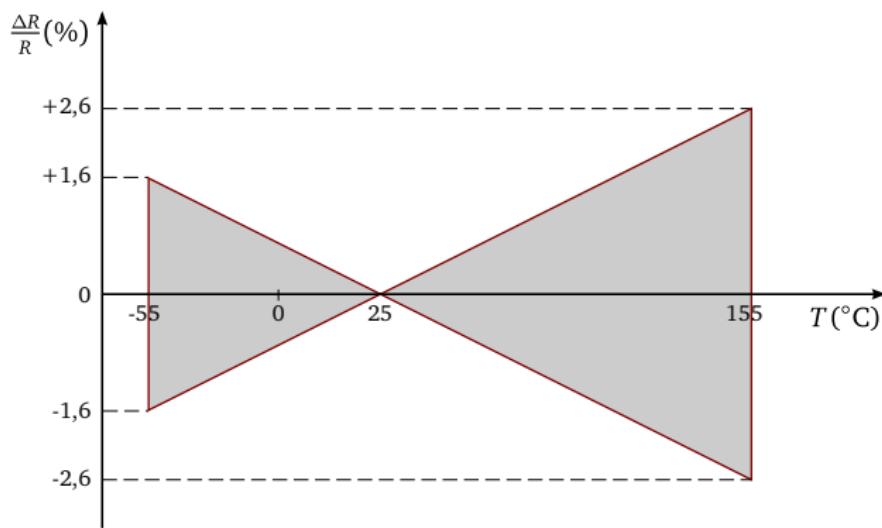
- ② Na temperaturi $T_{max} = 155\text{ }^\circ\text{C}$ otpornost može biti:

$$\begin{aligned}R(T_{max}) &= R(T_0)(1 + \alpha|T_{max} - T_0|) \\&= 1000(1 \pm 200 \cdot 10^{-6} \cdot |155 - 25|) \\&= 1000(1 \pm 0,026) = 1000 \pm 26\Omega\end{aligned}$$

Uticaj temperature

Temperaturni koeficijent - primer

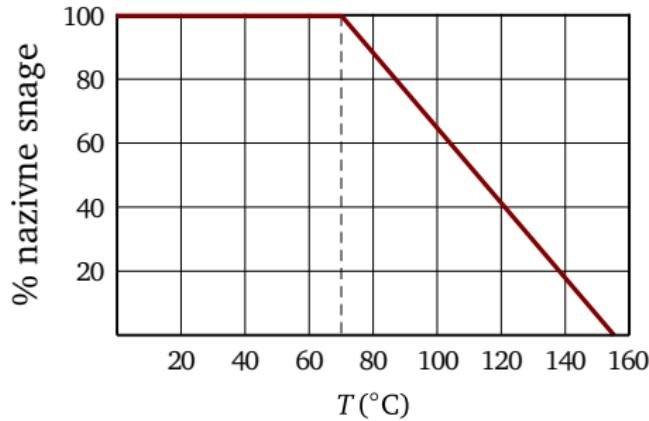
U praksi je pogodno promenu otpornosti sa promenom temperature izraziti u procentima u odnosu na nazivnu vrednost:



Uticaj temperature

Degradacija nazivne snage

Sa porastom temperature opada snaga sa kojom se može opteretiti otpornik:



U primeru na slici otpornik se može opteretiti nazivnom snagom do temperature 70 °C.

Uticaj temperature

Termički šum (Džonsonov šum – *Johnson noise*)

Termički šum je posledica termičke fluktuacije nosilaca nanelektrisanja. Ne zavisi od vrste materijala od koga je otpornik izrađen. Električno se manifestuje kao parazitni naizmenični napon efektivne vrednosti:

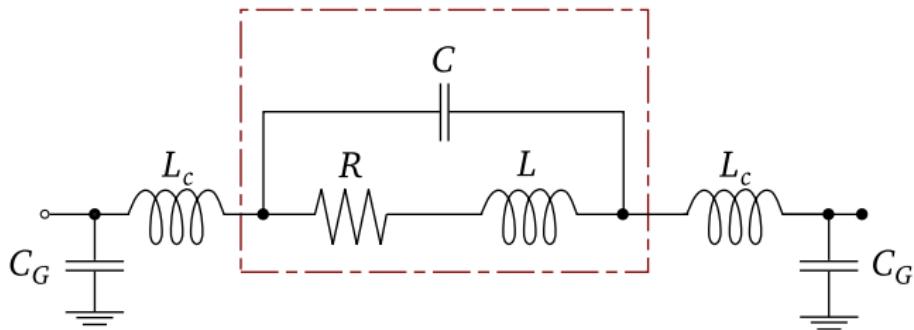
$$U_J = \sqrt{4kTR\Delta f}, \quad (9)$$

pri čemu je k Boltzmanova konstanta, T temperatura u K, a Δf opseg učestanosti u kome se meri šum. Termički šum je neizbežna pojava u elektronskim kolima, a njegova redukcija je od posebnog značaja u audio aplikacijama.

Napomena: Pored termičkog, kod otpornika postoji i strujni šum, koji ne zavisi značajno od temperature, ali zavisi od jačine struje kroz otpornik, konstrukcije otpornika i osobina otpornog materijala.

Parazitne komponente

Ekvivalentna električna šema otpornika



Telo otpornika se, pored sopstvene otpornosti R , karakteriše parazitnom induktivnošću L i kapacitivnošću C (usled postojanja metalnih obloga, odnosno kontakta). Izvodi otpornika se karakterišu parazitnom induktivnošću L_C , kao i parazitnom kapacitivnošću C_G (kada je otpornik u kolu).

Parazitne komponente

Otpornik na visokim učestanostima

Uključivanjem parazitnih induktivnosti i kapacitivnosti, otpornik se više ne karakteriše otpornošću, već *impedansom*⁶ Z . Parazitne komponente su od značaja za primenu otpornika na visokim učestanostima. Glavna posledica prisustva parazitnih komponenata je degradacija vrednosti otpornosti otpornika na visokim učestanostima. Izuzetak su žičani otpornici, kod kojih parazitna induktivnost L može imati uticaja na impedansu i pri nižim učestanostima.

Za primenu na visokim učestanostima postoje varijante otpornika stalne otpornosti koje proizvođači nazivaju HF (*High Frequency*), kod kojih je uticaj parazitnih komponenata minimizovan.

⁶Videti predavanja o kondenzatorima i kalemovima.

Deo 3

Otpornici promenljive otpornosti

Otpornici promenljive otpornosti

Potenciometri

Potenciometri predstavljaju otpornike kod kojih se otpornost može promeniti manuelno, podešavanjem odgovarajućeg mehanizma ugrađenog u komponentu. Primenjuju se za regulaciju napona i struja u elektronskim kolima.

Prema nameni se mogu podeliti na:

- potenciometre opšte namene
- regulacione otpornike (trimere).

Električni simboli:

potenciometar



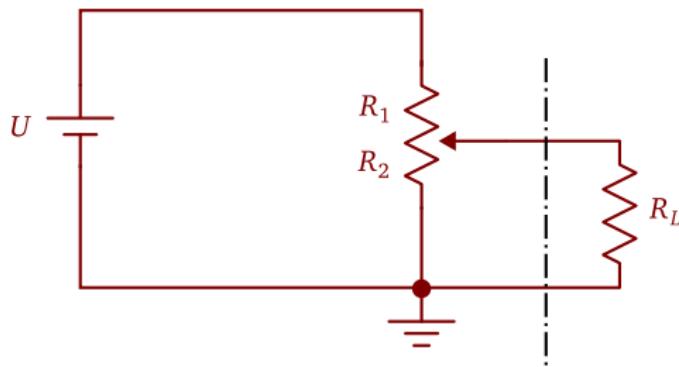
trimer



Potenciometri

Princip rada

Potenciometar poseduje klizač (*wiper*) pomoću koga se otpornost potenciometra R_p može podeliti ($R_p = R_1 + R_2$). U električnom smislu, potenciometar može biti primjenjen kao naponski razdelnik, za podešavanje referentnog naponskog nivoa.

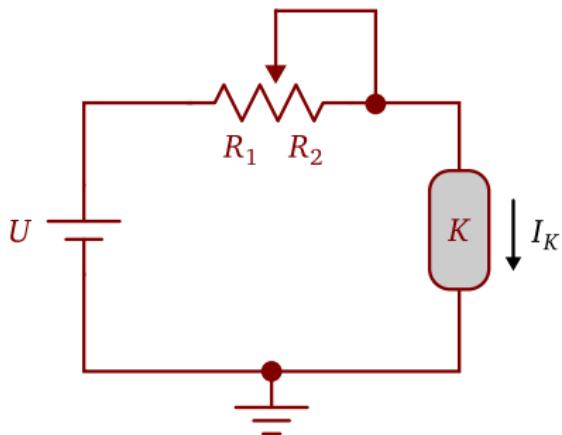


R_L je otpornost opterećenja.

Potenciometri

Princip rada

U primeru na slici, deo otpornosti potenciometra R_2 je kratko spojen. Promenom položaja klizača R_1 se povećava ili smanjuje, čime se reguliše jačina struje u kolu (*reostat*).



Model idealnog potenciometra:

$$R_p = R_1 + R_2$$

$$R_1 = xR_p$$

$$R_2 = (1 - x)R_p$$

$$0 \leq x \leq 1$$

Sadržaj

1 Uvodne napomene

- Jednosmerni signali
- Naizmenični signali

2 Otpornici stalne otpornosti

3 Otpornici promenljive otpornosti

- Potenciometri
- Trimeri

4 Nelinearni otpornici

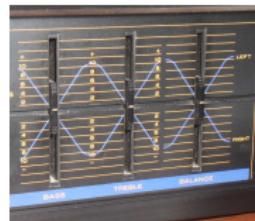
- NTC otpornici
- PTC otpornici
- Varistori
- Fotootpornici

Potenciometri opšte namene

Podjela prema obliku

Potenciometri opšte namene se prema obliku mogu podeliti na:

- pravolinijske (šiber ili *slider*)

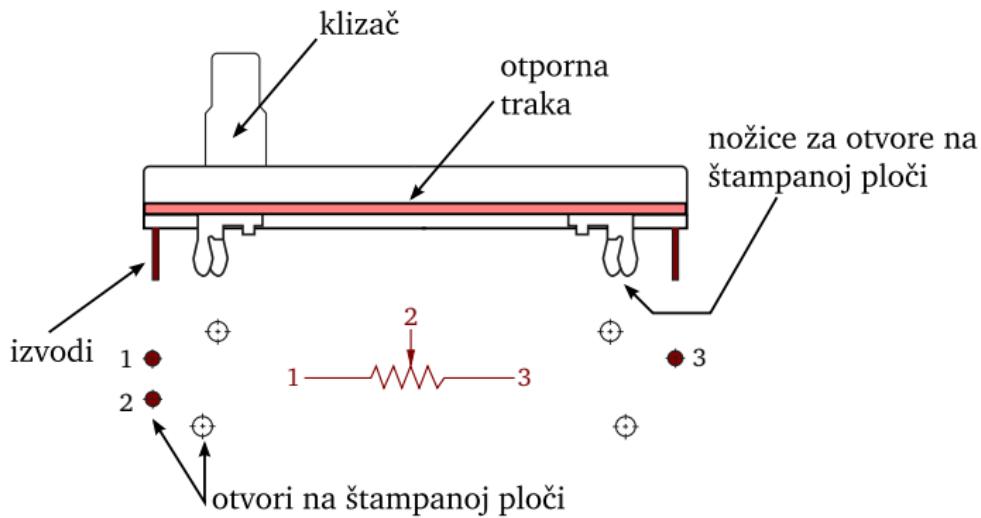


- kružne (*rotary*)



Šiber potenciometri

Ilustracija konstrukcije

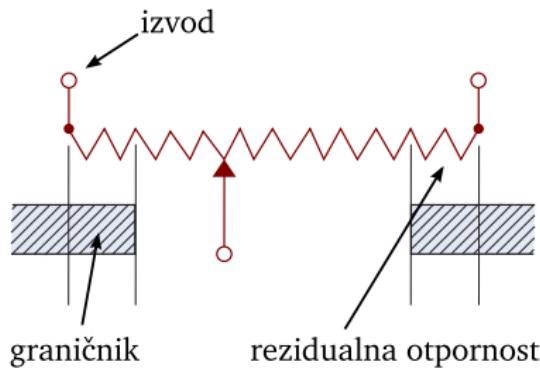


Primenjuju se kao korisničke kontrole na uređajima potrošačke i profesionalne elektronike.

Šiber potenciometri

Rezidualna otpornost

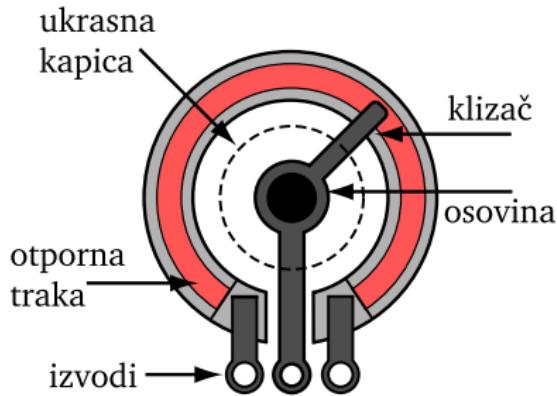
Postojanje rezidualne otpornosti onemogućava da se potenciometar u kolu ponaša kao kratak spoj.



Proizvođači ovu otpornost definišu i kao otpornost krajeva (*end resistance*).

Kružni potenciometri

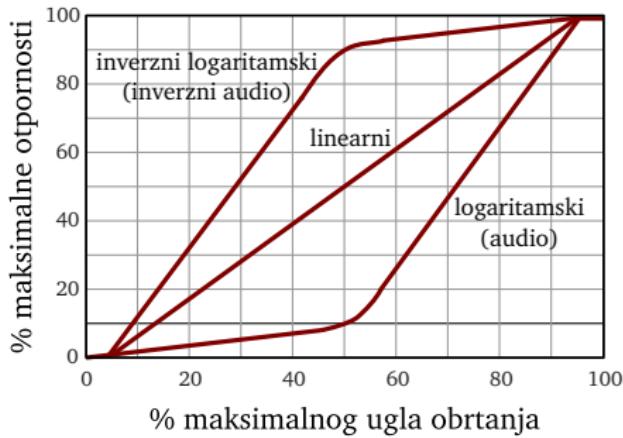
Ilustracija konstrukcije



Otporna traka je obično od grafita. Može biti i helikoidna, tako da ima više od jednog obrtaja. Takođe poseduju rezidualnu otpornost. Primjenjuju se kao korisničke kontrole, prvenstveno na uređajima potrošačke elektronike. Postoje i varijante sa prekidačem.

Kružni potenciometri

Prema zavisnosti otpornosti od ugla obrtanja, mogu se podeliti na:
linearne, logaritamske i inverzne logaritamske.



Logaritamski potenciometri se najčešće koriste u audio aplikacijama, za kontrolu jačine zvuka. U jednom kućištu može biti dva (*dual gang*) ili više potenciometara.

Potenciometri opšte namene

Tolerancija

Tipične vrednosti tolerancija otpornosti kod potenciometara opšte namene su $\pm 10\%$ i $\pm 20\%$.

Sva ograničenja vezana za nazivnu snagu, temperaturu i nazivni napon opisana kod otpornika stalne otpornosti važe i za potenciometre opšte namene. Pored toga, zbog mehaničkog kontakta klizača i otporne trake, ovi potenciometri su podložni habanju, što im skraćuje radni vek.

Sadržaj

1 Uvodne napomene

- Jednosmerni signali
- Naizmenični signali

2 Otpornici stalne otpornosti

3 Otpornici promenljive otpornosti

- Potenciometri
- Trimeri

4 Nelinearni otpornici

- NTC otpornici
- PTC otpornici
- Varistori
- Fotootpornici

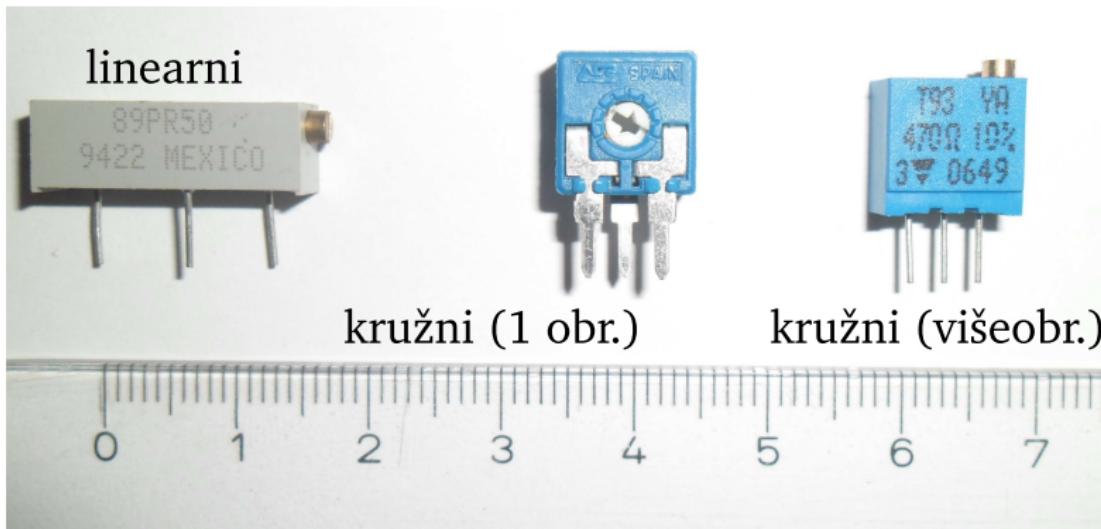
Regulacioni otpornici

Trimeri (*trimpot*)

Trimeri su pravolinijski ili kružni potencimetri koji se koriste za precizno podešavanje otpornosti u elektronskim kolima. U mnogim kolima se nalaze redno vezani sa otpornikom stalne otpornosti. Znajući su manjih dimenzija od potenciometara opšte namene. Ugrađuju se unutar kućišta elektronskih uređaja i služe za fabričku ili servisnu kalibraciju parametara. Mogu biti jednoobrtni i višeobrtni. Klizač trimera je preko odgovarajućeg mehanizma povezan sa spojilašnjim zavrtnjem, tako da se podešavanje otpornosti vrši šrafcigom. Proizvode se sa izvodima za montažu kroz rupe na štampanoj ploči (*through hole*) i površinsku montažu (SMD).

Regulacioni otpornici

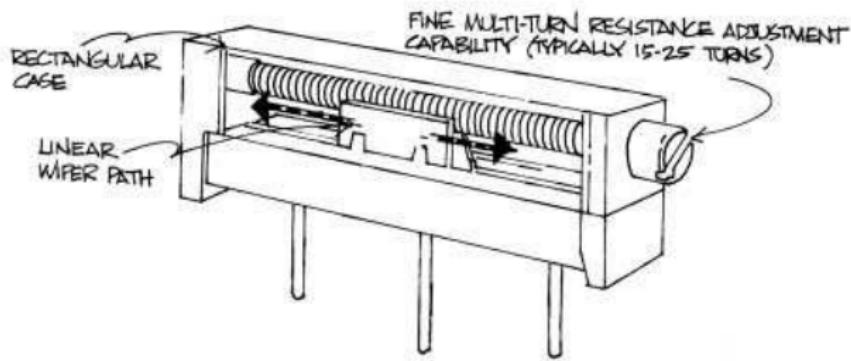
Trimeri



Regulacioni otpornici

Pravolinijski trimer

Ilustracija konstrukcije⁷:

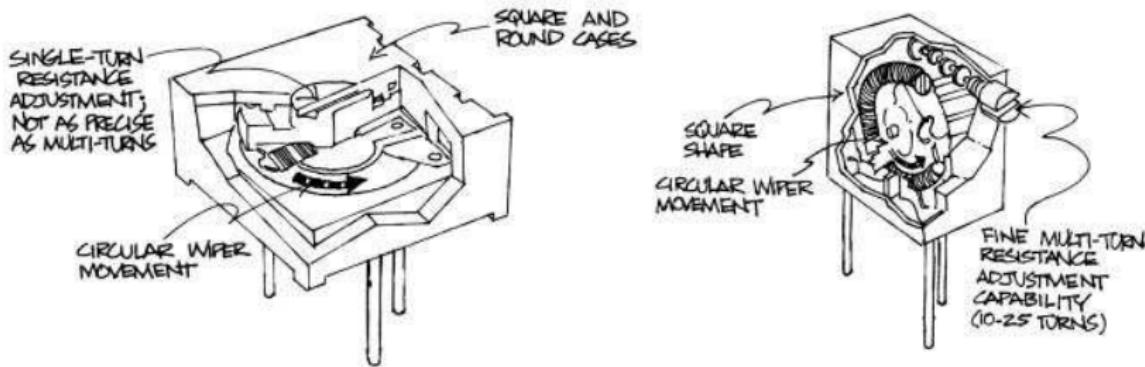


⁷Skica preuzeta iz materijala proizvođača potenciometara BOURNS.

Regulacioni otpornici

Kružni trimeri

Ilustracija konstrukcije⁸:



⁸Skice preuzete iz materijala proizvođača potenciometara BOURNS.

Regulacioni otpornici

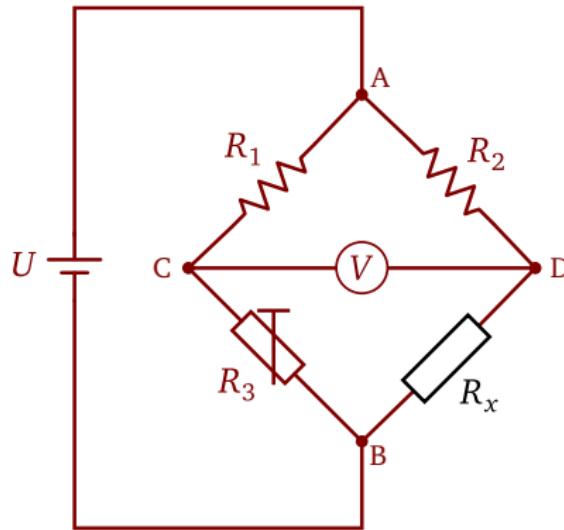
Tolerancije, minimalna otpornost, nazivna snaga, temperaturni koeficijent

Tipične vrednosti tolerancija otpornosti kod trimera su $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ i $\pm 25\%$.

Trimeri se karakterišu *absolutnom minimalnom otpornošću*, koja se izražava u procentima u odnosu na nazivnu otpornost ili direktno u Ω . Primer: (0,5% ili 1Ω max.) – u zavisnosti od vrednosti nazivne otpornosti, uzima se veća vrednost. Apsolutna minimalna otpornost onemogućava da se trimer ponaša kao kratak spoj (ali može biti vrlo blizu!). Trimeri se proizvode za nazivne snage do 0,5 W, iako se mogu naći i za veće. Tipične vrednosti temperaturnog koeficijenta su $\pm 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ i $\pm 250 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

Regulacioni otpornici

Primer primene: Dovođenje u ravnotežu Vitstonovog mosta



R_1 i R_2 su otpornici poznatih otpornosti. R_x je nepoznata otpornost, koju treba odrediti.

Regulacioni otpornici

Primer primene: Dovođenje u ravnotežu Vitstonovog mosta

R_1 i R_3 čine jedan, a R_2 i R_x drugi naponski razdelnik:

$$U_C = \frac{R_3}{R_1 + R_3} U$$

$$U_D = \frac{R_x}{R_2 + R_x} U$$

Da bi most bio u ravnoteži, potrebno je da bude $U_C = U_D$, odakle se dobija:

$$R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1} .$$

Trimer R_3 se podešava sve dok instrument između tačaka C i D ne očita nultu vrednost.

Deo 4

Nelinearni otpornici

Nelinearni otpornici

Definicija

Nelinearni otpornici su otpornici kod kojih se otpornost ne menja linearno pod dejstvom uzroka promene otpornosti. Prema uzroku promene otpornosti, mogu se razvrstati prema sledećoj tabeli:

Naziv	Uzrok promene otpornosti
termistori	temperatura
varistori	električno polje
fotoootpornici	svetlost
magnetootpornici	magnetsko polje
tenzootpornici	mehaničko naprezanje

Nelinearni otpornici

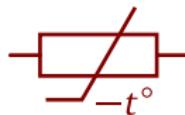
Termistori

Otpornost termistora se značajno menja sa promenom temperature. U zavisnosti od smera promene u odnosu na porast temperature, razlikuju se:

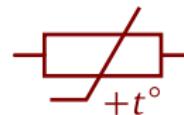
- **otpornici sa negativnim temperaturnim koeficijentom (NTC)**
- **otpornici sa pozitivnim temperaturnim koeficijentom (PTC)**

Električni simboli:

NTC



PTC



Sadržaj

1 Uvodne napomene

- Jednosmerni signali
- Naizmenični signali

2 Otpornici stalne otpornosti

3 Otpornici promenljive otpornosti

- Potenciometri
- Trimeri

4 Nelinearni otpornici

- **NTC otpornici**
- PTC otpornici
- Varistori
- Fotoootpornici

Termistori

NTC otpornici

Proizvode se od polikristalnih oksidnih poluprovodničkih materijala (Al_2O_3 , ZnO , itd.). Promena otpornosti sa promenom temperature se može opisati pomoću relacije:

$$R_T = R_\infty \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad (10)$$

gde su R_∞ i B konstante. Konstanta B naziva se *temperaturna osetljivost* i njena vrednost zavisi od svojstava otpornog materijala. Temperatura i temperaturna osetljivost se izražavaju u kelvinima ($K = {}^\circ C + 273$).

Napomena: e^x se često piše kao $\exp(x)$, tj. $e^x \equiv \exp(x) \Rightarrow e^{\frac{B}{T}} \equiv \exp\left(\frac{B}{T}\right)$.

Termistori

NTC otpornici

Proizvođači daju zavisnost oblika:

$$R_T = R_{T_0} \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (11)$$

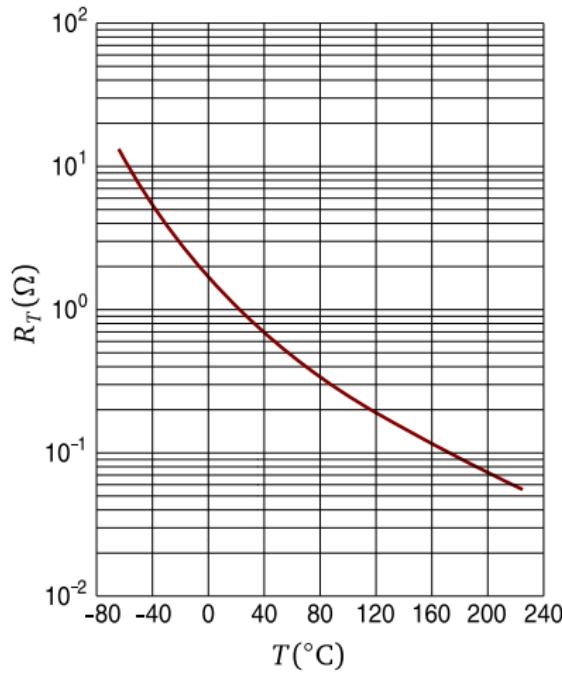
gde je T_0 referentna temperatura, tipično $25^\circ\text{C} \simeq 298\text{ K}$, a R_{T_0} otpornost termistora na toj temperaturi.

Primer: NTC otpornik otpornosti $R_{25} = 1\Omega$ i temperaturne osetljenosti $B = 2000\text{ K}$, na temperaturi $T = 60^\circ\text{C} = 333\text{ K}$ ima otpornost:

$$R_{60} = 1 \cdot \exp \left[2000 \left(\frac{1}{333} - \frac{1}{298} \right) \right] \simeq 0,5\Omega .$$

Termistori

NTC otpornici - zavisnost otpornosti od temperature



Termistori

NTC otpornici

Vrednosti tolerancija otpornosti kod NTC optornika su generalno različite pri različitim temperaturama. Maksimalne vrednosti tolerancija su tipično $\pm 1\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ i $\pm 20\%$.

Temperaturni koeficijent:

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} \cdot 100 \quad (\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}) \quad (12)$$

Relacija (12) važi samo za male promene temperature ΔT (tipično $0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ do $5 \text{ } ^\circ\text{C}$). Proizvođači obično daju vrednosti α i $\Delta R/R$ za određene temperature.

Termistori

NTC otpornici

Kada je na NTC otpornik doveden napon U iz spoljašnjeg izvora, protok struje izaziva njegovo zagrevanje. Ova pojava naziva se samozagrevanje (*self-heating*). NTC otpornik je u termičkoj ravnoteži kada je snaga koju mu predaje izvor jednaka snazi koju on predaje okolini u vidu toplote. Snaga na NTC otporniku je:

$$P = \frac{U^2}{R_T} = \delta(T - T_0),$$

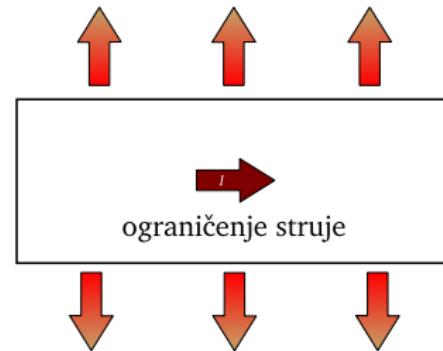
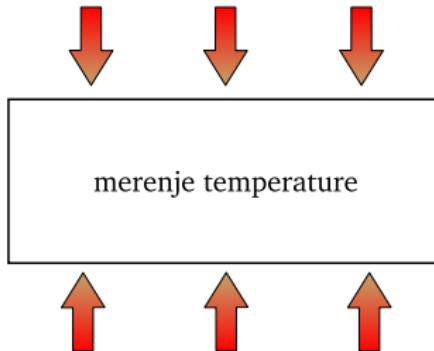
pri čemu je T temperatura samog otpornika, a T_0 temperatura okoline (ambijenta). Veličina δ naziva se *koeficijent disipacije* ($\text{mW}^\circ\text{C}^{-1}$).

Termistori

NTC otpornici

Osnovne primene NTC otpornika:

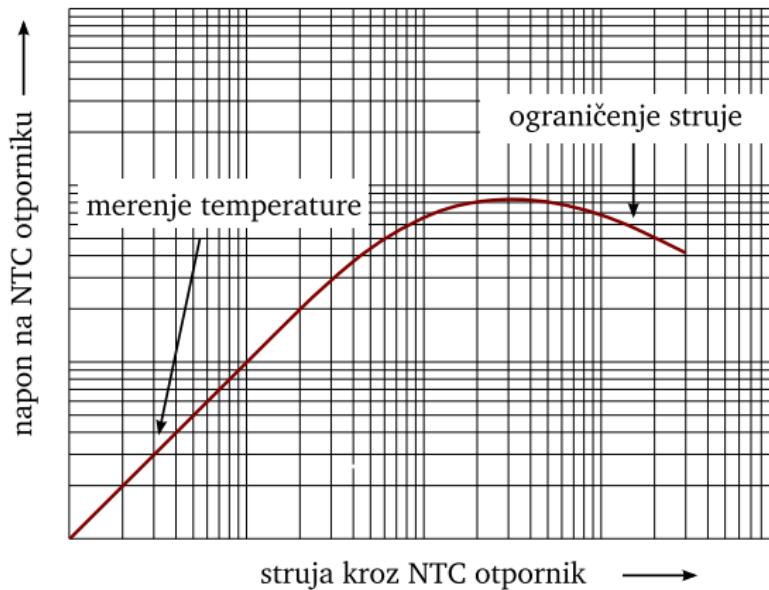
- merenje temperature (temperaturni senzori) – otpornik se zاغreva pod dejstvom spoljašnje temperature.
- ograničenje struje – otpornik se samozagreva pri protoku struje kroz njega



Termistori

NTC otpornici

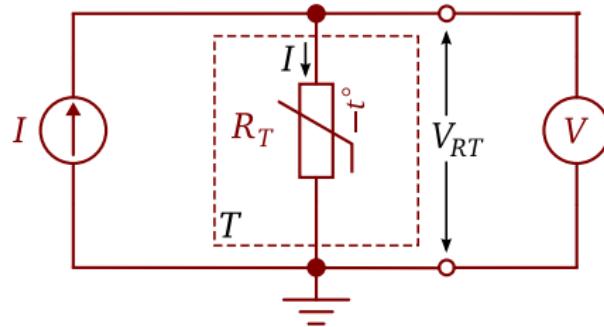
Strujno–naponska karakteristika:



Termistori

NTC otpornici - merenje temperature

Za primenu NTC otpornika kao temperaturnog senzora potrebno je da struja kroz njega bude mala, kako se ne bi samozagrevao. U tom slučaju celokupna promena otpornosti NTC otpornika se može pripisati dejstvu promene temperature ambijenta.

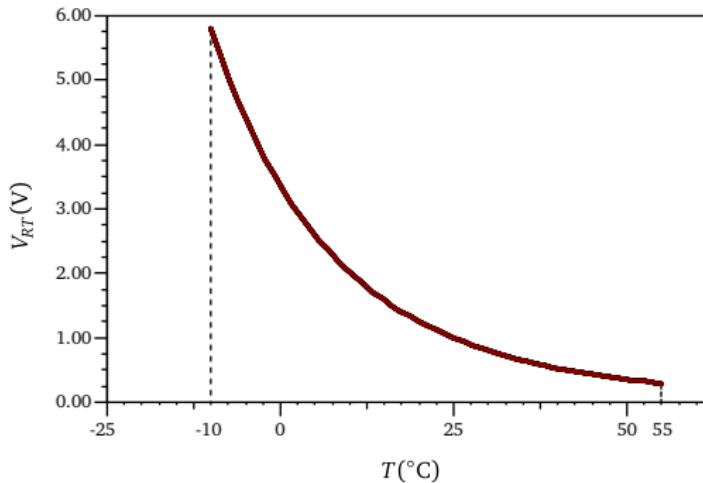


Napomena: Ulazna otpornost voltmetra mora biti mnogo veća od otpornosti NTC otpornika u celom opsegu merenja temperature.

Termistori

NTC otpornici - merenje temperature

Primer: $I = 100 \mu\text{A} = \text{Const.}$, $R_{25} = 10 \text{k}\Omega$, $B = 3977 \text{K}$, $P_n = 0,5 \text{W}$,
opseg merenja: -10°C do 55°C .

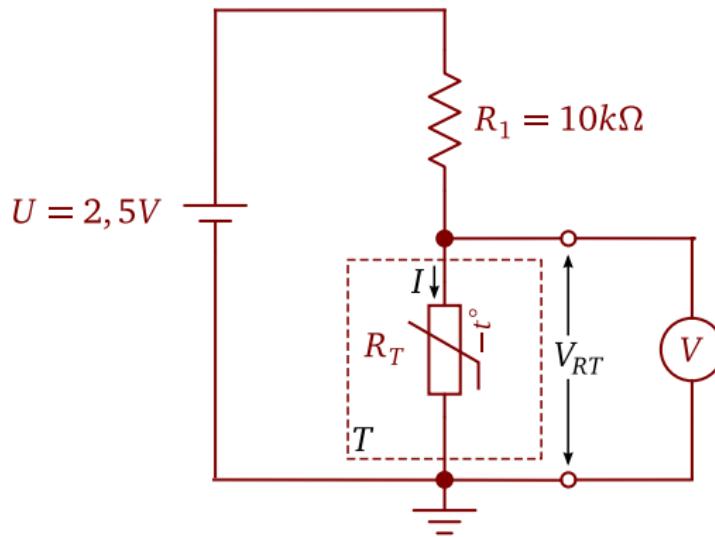


Nedostatak: nelinearni odziv, pa je kalibracija otežana.

Termistori

NTC otpornici - merenje temperature

Linearizacija odziva NTC otpornika.

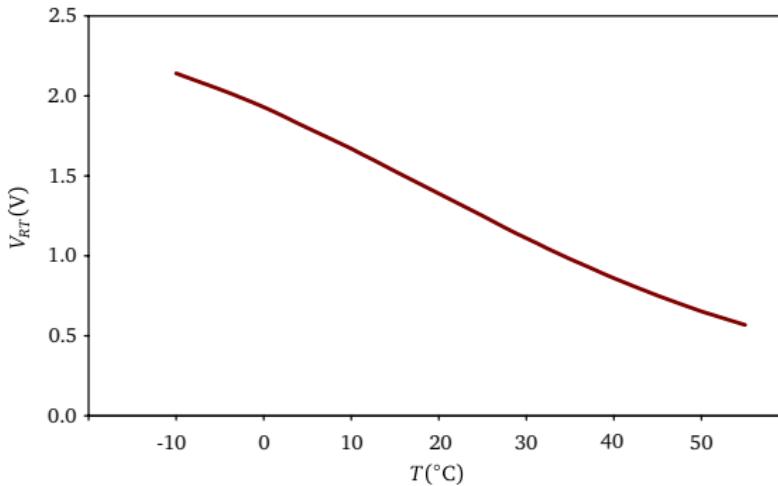


Napomena: Linearizacija se može izvršiti i stavljanjem otpornika R_1 paralelno sa otpornikom R_T , uz zadržavanje izvora konstantne struje.

Termistori

NTC otpornici - merenje temperature

Primer: $I = 100 \mu\text{A} = \text{Const.}$, $R_{25} = 10 \text{k}\Omega$, $B = 3977 \text{K}$, $P_n = 0,5 \text{W}$,
opseg merenja: -10°C do 55°C .



Odstupanje od idealne prave linije je $\pm 4\%$ u opsegu merenja, što je prihvatljivo za mnoge primene.

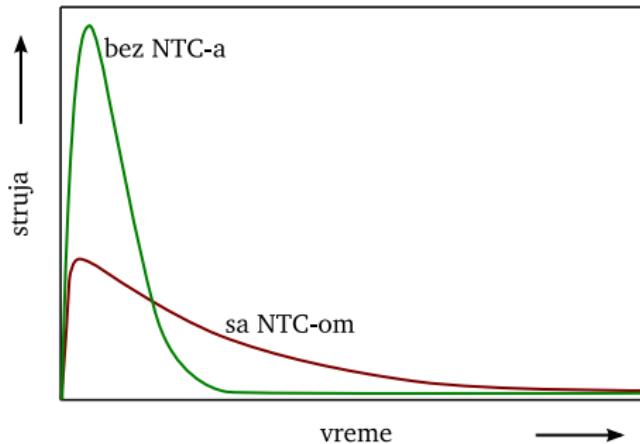
Termistori

NTC otpornici - ograničenje struje

Kod nekih elektronskih uređaja se neposredno po uključenju napajanja pojavljuje mnogo veća struja od nominalne. Ova struja se naziva *početna udarna struja (inrush current)* i neželjena je pojava jer može oštetiti uređaj. NTC otpornici se uobičajeno koriste za zaštitu uređaja od početne udarne struje. Neposredno po uključenju napajanja, NTC otpornik je hladan i otpornost mu je relativno velika, tako da ograničava vrednost struje. Dalji protok struje izaziva samozagrevanje NTC otpornika i njegova otpornost se smanjuje, tako da posle nekog vremena pad napona na njemu postaje zanemariv.

Termistori

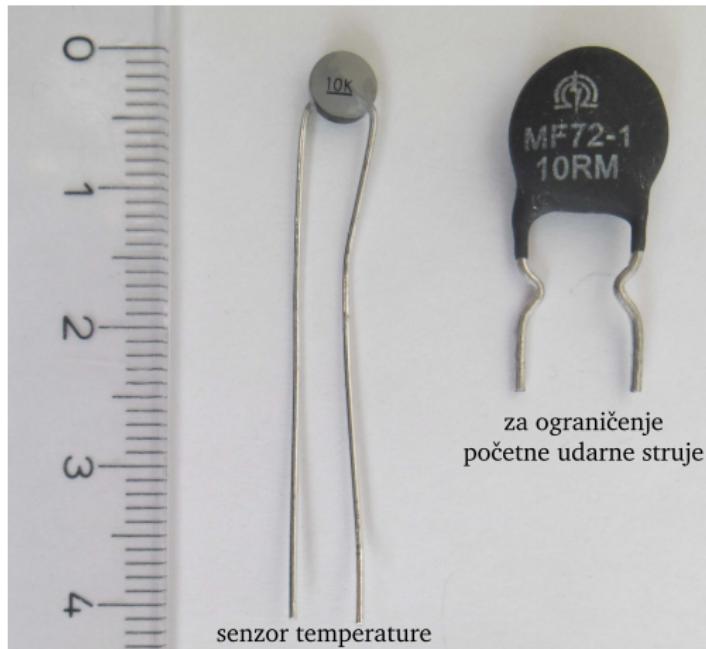
NTC otpornici - ograničenje struje



- Prednost: niska cena, jednostavna ugradnja.
- Nedostatak: NTC-u je potrebno vreme da se ohladi nakon isključenja napajanja, da bi ponovo bio spreman za obavljanje funkcije.

Termistori

NTC otpornici



Sadržaj

1 Uvodne napomene

- Jednosmerni signali
- Naizmenični signali

2 Otpornici stalne otpornosti

3 Otpornici promenljive otpornosti

- Potenciometri
- Trimeri

4 Nelinearni otpornici

- NTC otpornici
- PTC otpornici**
- Varistori
- Fotootpornici

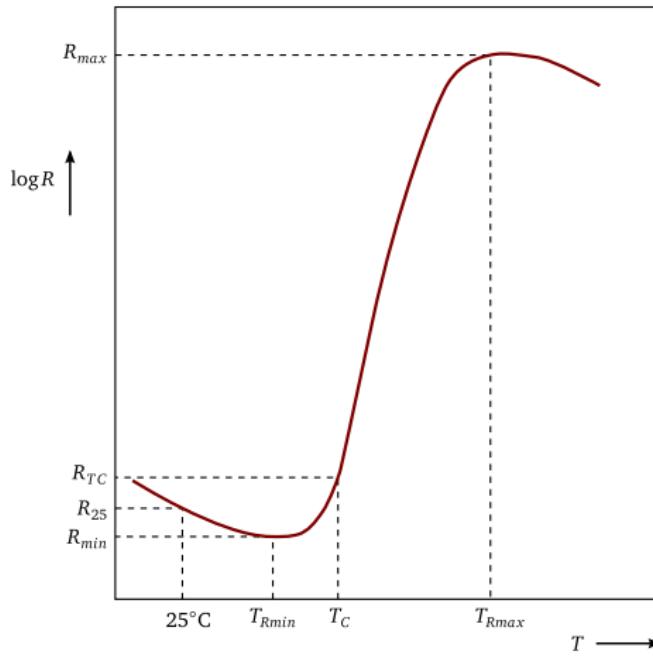
Termistori

PTC otpornici (pozistori)

Proizvode se od polikristalnih keramičkih materijala, uglavnom na bazi barijum–titanata (BaTiO_3). Za PTC otpornike je karakteristično da im iznad određene temperature otpornost naglo raste, što znači da ima pozitivan temperaturni koeficijent. Ta temperatura se naziva Kirijeva (*Curie*) temperatura T_C , a proizvođači je nazivaju i okidačka temperatura (*switching temperature*). Otpornost PTC otpornika raste sve do maksimalne temperature T_{Rmax} , a nakon toga počinje da opada, što znači da PTC otpornik tada ima negativan temperaturni koeficijent. Ispod Kirijeve temperature otpornost PTC otpornika u jednom delu takođe ima negativni temperaturni koeficijent!

Termistori

PTC otpornici



Termistori

PTC otpornici

Konkretan oblik krive zavisnosti otpornosti od temperature uslovljen je pre svega hemijskim sastavom materijala i načinom proizvodnje PTC otpornika. Zbog toga ne postoji jedinstvena jednačina koja opisuje ovu krivu. Standardno se uzima da je:

$$R_{TC} = 2R_{min} . \quad (13)$$

U intervalu temperatura $[T_C, T_{Rmax}]^9$ koristi se aproksimacija:

$$R_T \approx A + C \exp(BT) , \quad (14)$$

pri čemu su A , B , i C konstante za dati PTC otpornik.

⁹ $T_C \leq T \leq T_{Rmax}$

Termistori

PTC otpornici

Karakteristični parametri:

- Struja okidanja (*trip current*) je minimalna struja pri kojoj će PTC otpornik dostići temperaturu okidanja T_C .
- Vreme do okidanja (*trip time*) je vreme za koje će PTC otpornik dostići temperaturu okidanja T_C pri konstantnom naponu.
- Maksimalna struja I_{max} je najveća struja koja može da protekne kroz PTC otpornik pri njegovom prelasku iz stanja niske u stanje visoke otpornosti.

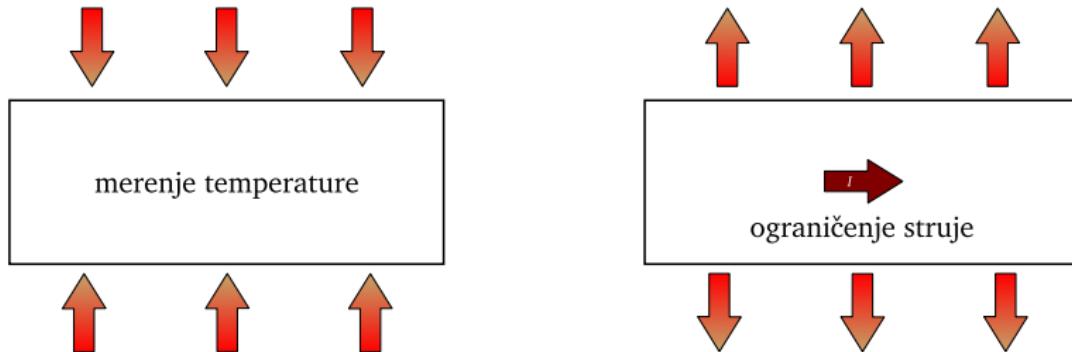
Napomena: Otpornost PTC otpornika se značajno smanjuje sa porastom učestanosti signala na njemu, pa se ovi otpornici obično ne primenjuju na visokim učestanostima.

Termistori

PTC otpornici

Osnovne primene PTC otpornika:

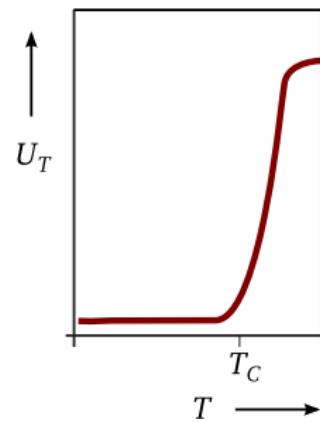
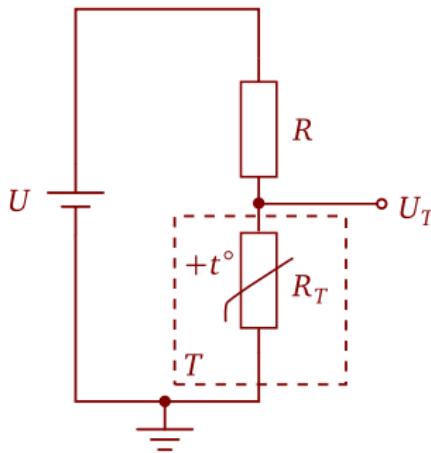
- reverzibilni termički prekidači – otpornik se zagreva pod dejstvom spoljašnje temperature.
- reverzibilni termički osigurači – otpornik se samozagreva pri protoku struje kroz njega



Termistori

PTC otpornici – reverzibilni termički prekidači

PTC otpornici se proizvode sa različitim Kirijevim temperaturama (tipično 60°C , 70°C , 80°C , 90°C). Kad spoljašnja temperatura do- stigne Kirijevu temperaturu, otpornost PTC otpornika naglo raste.



Termistori

PTC otpornici – reverzibilni termički prekidači

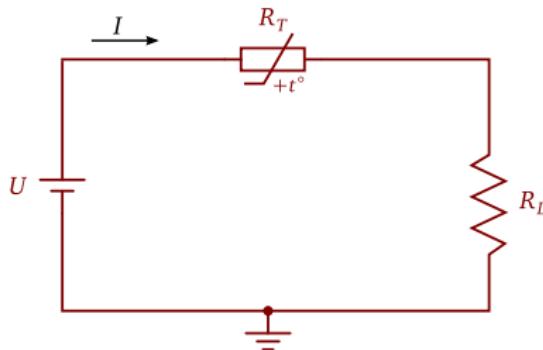
Porast otpornosti PTC otpornika izaziva veći pad napona na njemu. Promena napona U_T se detektuje odgovarajućim elektronskim kolom i preduzima se povratna akcija (npr. uključenje ventilatora, snižavanje učestanosti procesora)



Termistori

PTC otpornici – reverzibilni termički osigurači

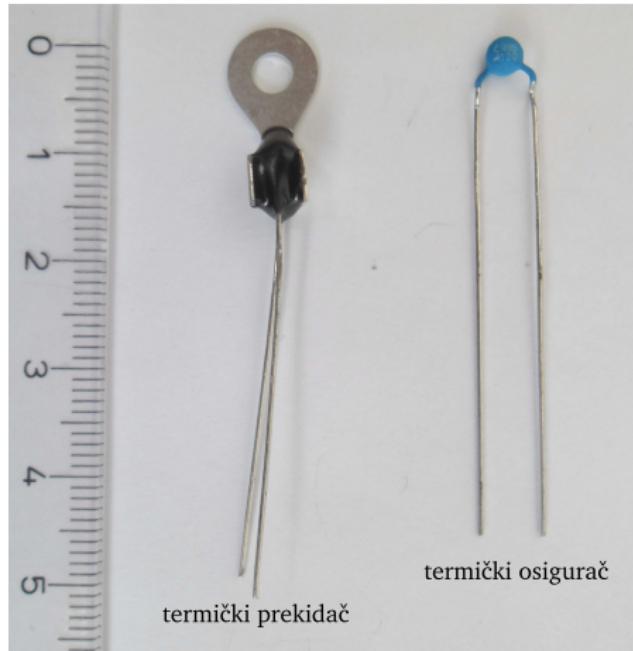
Ako struja u kolu naglo poraste, PTC otpornik se zagreva i prelazi u stanje visoke otpornosti, ograničavajući tako struju na minimalnu vrednost. Koriste se za zaštitu motora, transformatora, rasvetnih tala, itd.



PTC otpornici za ovu namenu proizvode se i od različitih polimera, pa se nazivaju *polyswitch*.

Termistori

PTC otpornici



termički osigurač

termički prekidač

Sadržaj

1 Uvodne napomene

- Jednosmerni signali
- Naizmenični signali

2 Otpornici stalne otpornosti

3 Otpornici promenljive otpornosti

- Potenciometri
- Trimeri

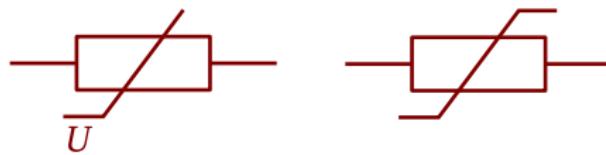
4 Nelinearni otpornici

- NTC otpornici
- PTC otpornici
- **Varistori**
- Fotoootpornici

Varistori

Varistori su otpornici čija se otpornost nelinearno menja sa promenom napona na njima.

Električni simboli:

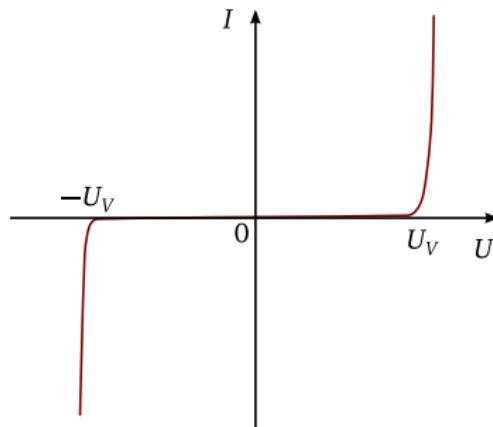


Najviše se upotrebljavaju metal–oksidni varistori (MOV). Proizvode se od keramičkih materijala, na bazi cink–oksida (ZnO).

Varistori

Strujno-naponska karakteristika

Strujno-naponska karakteristika varistora je bidirekciona i simetrična.



Varistori

Strujno-naponska karakteristika

U intervalu napona $[-U_V, U_V]$ kroz varistor teče zanemarljiva struja, pa se može smatrati da je u kolu prekid. Napon U_V naziva se *napon praga varistora* (*threshold voltage*) ili *napon provođenja* (*clamping voltage*). Izvan tog intervala kroz varistor teče značajna struja, pa se može smatrati da je kratak spoj (u prvoj aproksimaciji). Struja kroz varistor:

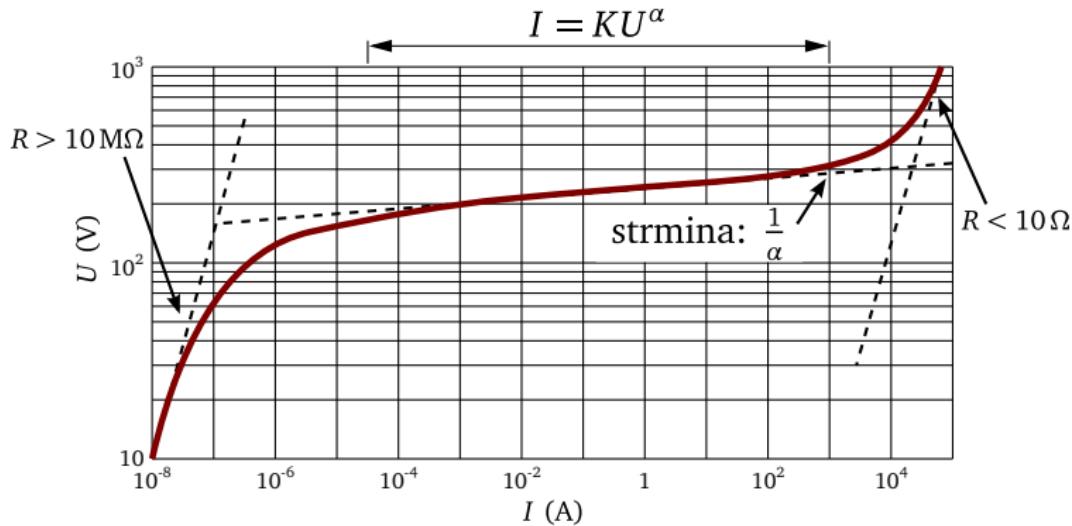
$$I = KU^\alpha , \quad (15)$$

gde su K i α konstante za svaki konkretan tip varistora. Izrazom (15) određena je *radna oblast* varistora.

Varistori

Naponsko-strujna karakteristika

Proizvođači obično daju naponsko-strujnu karakteristiku:

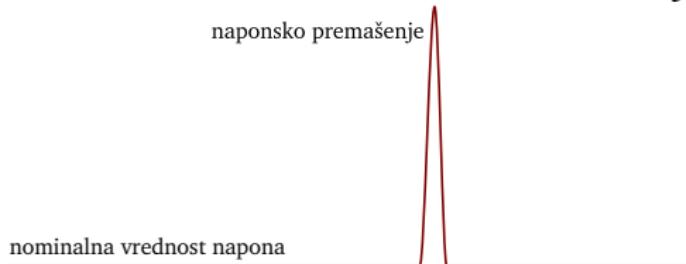


Napomena: Neki proizvođači daju deo karakteristike koji obuhvata samo radnu oblast.

Varistori

Primena

Varistori se koriste za zaštitu elektronskih kola od naponskih premašenja (*overvoltage*). Naponska premašenja predstavljaju tranzijentne pojave, tj. pojave koje se dešavaju u veoma kratkom vremenskom intervalu. Manifestuju se kao značajna odstupanja vrednosti napona u odnosu na nominalnu vrednost za koju je kolo projektovano.

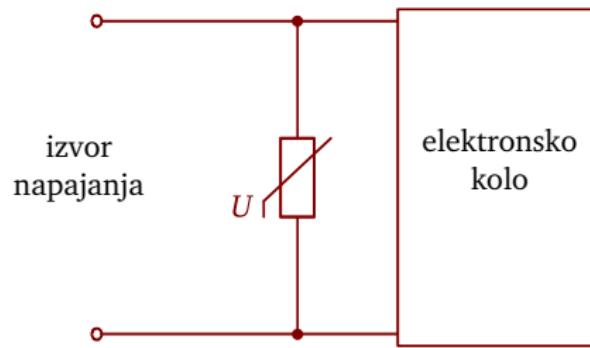


Amplituda naponskog premašenja može biti i više redova veličine veća od nominalne vrednosti napona.

Varistori

Primena

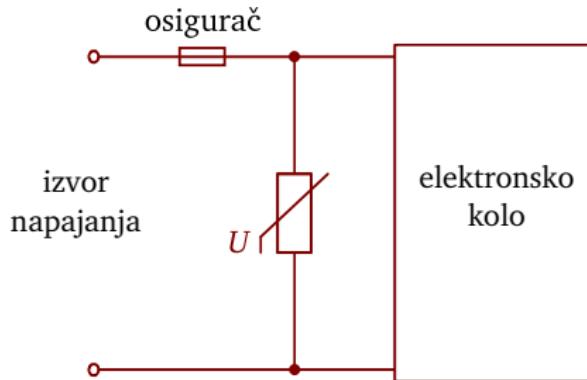
Varistori se vezuju paralelno kolu koje se štiti od naponskih premašenja.



Sve dok je napon na nominalnoj vrednosti, kroz varistor teče zanemarljiva struja i on se ponaša kao prekid, tako da nema uticaja na rad kola. Sa nailaskom tranzijenta, varistor ulazi u radnu oblast, struja kroz njega se naglo povećava i na taj način uticaj tranzijenta se svodi na minimum.

Varistori

Primena



Ako struja kroz varistor буде толика да он изађе из радне области и поћне да се понаша као кратак спој, осигурач ће прегорети, одважајући на тај начин коло од извора.

Varistori временом „старе“ (aging), што значи да се напон проводења смањује са бројем напонских премашења које varistor прigušuje.

Sadržaj

1 Uvodne napomene

- Jednosmerni signali
- Naizmenični signali

2 Otpornici stalne otpornosti

3 Otpornici promenljive otpornosti

- Potenciometri
- Trimeri

4 Nelinearni otpornici

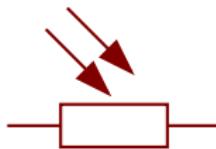
- NTC otpornici
- PTC otpornici
- Varistori
- **Fotootpornici**

Fotoootpornici

Definicija

Fotoootpornici pripadaju grupi *optoelektronskih* komponenata. Otpornost im se menja zbog interakcije svetlosti sa materijalom od koga su napravljeni. Nazivaju se još i svetlosno zavisni otpornici (*Light Dependent Resistors – LDR*).

Električni simbol:

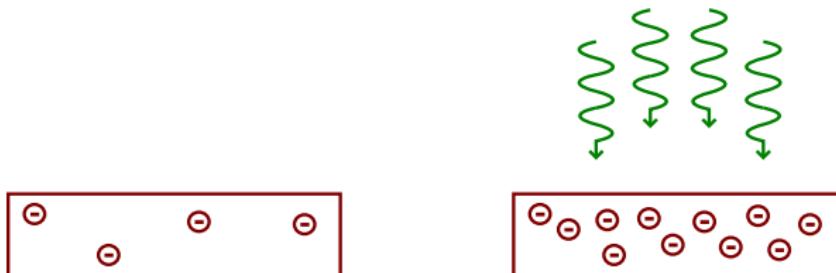


Proizvode se od poluprovodničkih jedinjenja (InSb, ZnS, PbS, CdS, CdSe, itd.).

Fotootpornici

Princip rada

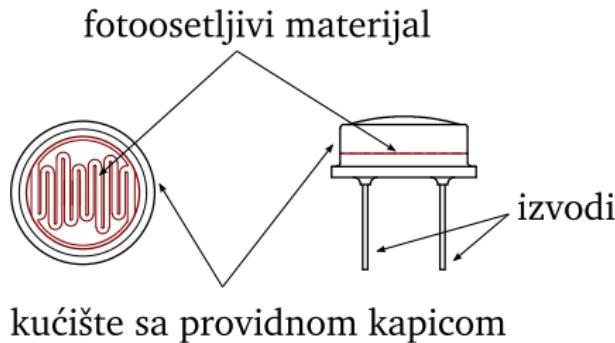
Kada fotoni upadne svetlosti prodru u materijal, svoju energiju preduj elektronima tog materijala. Elektroni raskidaju kovalentne veze sa matičnim atomima i postaju slobodni. Višak slobodnih elektrona rezultuje smanjenjem specifične električne otpornosti materijala.



Efekat se naziva *fotoprovodnost* (*photoconductivity*).

Fotoootpornici

Ilustracija konstrukcije

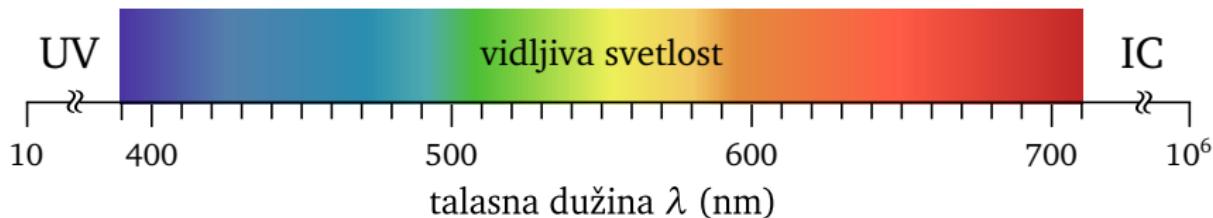


Fotoosetljivi materijal se pravi u obliku izuvijane trake kako bi otpornik bio što duži. Otpornik može biti i bez kućišta, na keramičkom supstratu i zaliven providnom epoksidnom smolom.

Fotootpornici

Svetlosni spektar

Fotootpornici se proizvode za različita područja svetlosnog spektra.



- UV – ultraljubičasto područje
- IC – infracrveno područje

Fotootpornici

Fotostruja

Karakteristični parametri:

- otpornost u mraku (*dark resistance*) R_d
- struja mraka (*dark current*) I_d
- talasna dužina maksimalne osetljivosti (*spectral peak*) λ_{max}

Kada se na fotootpornik koji se nalazi u mraku priključi konstantan napon, kroz njega teče struja mraka I_d . Kada se fotootpornik osvetli, kroz njega teče struja I_l . Razlika ovih struja naziva se *fotostruja* (*photocurrent*):

$$I_{ph} = I_l - I_d .$$

Fotootpornici

Zavisnost otpornosti od osvetljenosti

Za praktičnu primenu je od interesa zavisnost otpornosti od osvetljenosti:

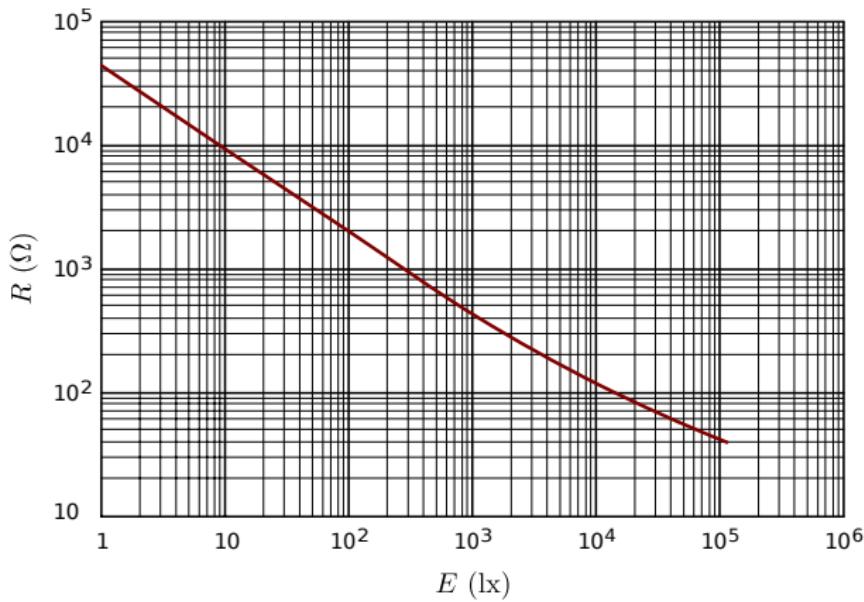
$$R = R_d E^{-\chi} ,$$

gde je $E > 1$ osvetljenost u luksima (lx), dok je χ konstanta koja zavisi od fotootpornog materijala i talasne dužine upadne svetlosti.

Napomena: Luks (lx) je *subjektivna* jedinica za meru osvetljenosti površine.

Fotootpornici

Tipična zavisnost otpornosti od osvetljenosti



Zavisnost otpornosti od osvetljenosti u log–log razmeri se može približno opisati pravom linijom:

$$\log R = -\chi \log E + \log R_d .$$

Proizvođači obično daju vrednost osetljivosti (*sensitivity*) u obliku:

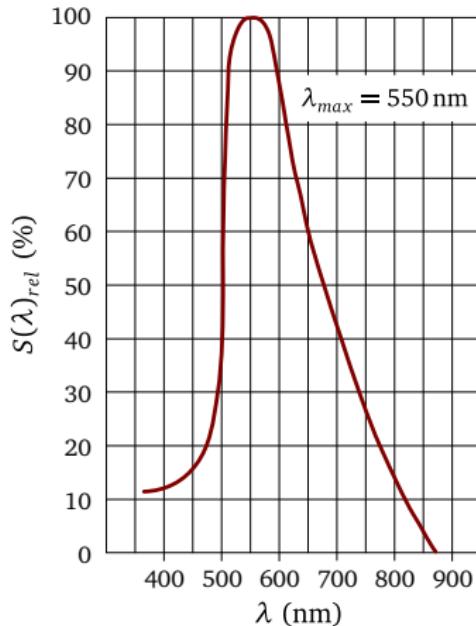
$$\frac{\log R_{100} - \log R_{10}}{\log E_{100} - \log E_{10}},$$

gde su R_{100} i R_{10} vrednosti otpornosti pri osvetljenosti od 100 lx i 10 lx, respektivno, a $E_{100} = 100$ lx i $E_{10} = 10$ lx. Osetljivost u stvari predstavlja nagib prave, odnosno vrednost $-\chi$ (jer je $R_{100} < R_{10}$). Proizvođači takođe daju i vrednosti R_d , kao i R_{10} i/ili R_{100} .

Napomena: $\log E_{100} - \log E_{10} = \log 100 - \log 10 = \log(100/10) = 1$, jer je u pitanju jedna dekada.

Fotoootpornici

Zavisnost relativne spektralne osetljivosti od talasne dužine upadne svetlosti



Spektralna osetljivost:

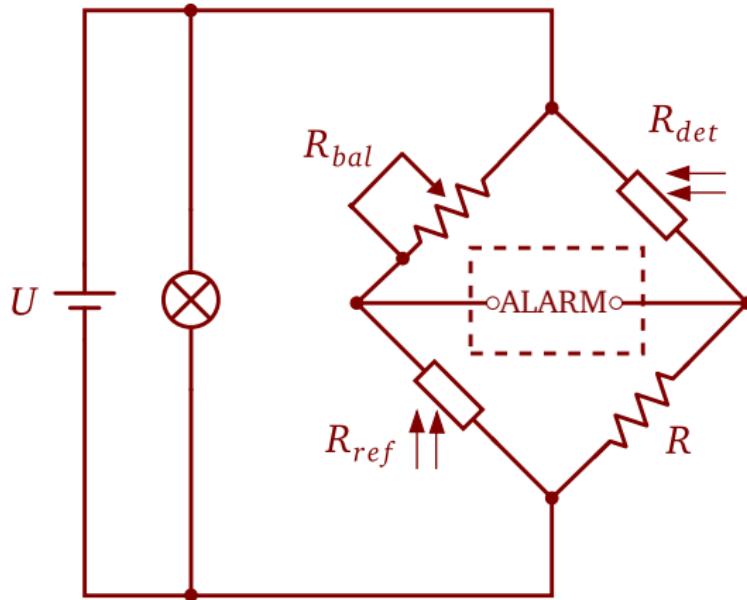
$$S(\lambda) = \frac{\text{energija upadne svetlosti}}{\text{fotostruja}}$$

Relativna spektralna osetljivost:

$$S(\lambda)_{rel} = \frac{S(\lambda)}{S(\lambda_{max})} \cdot 100 \text{ (%)}$$

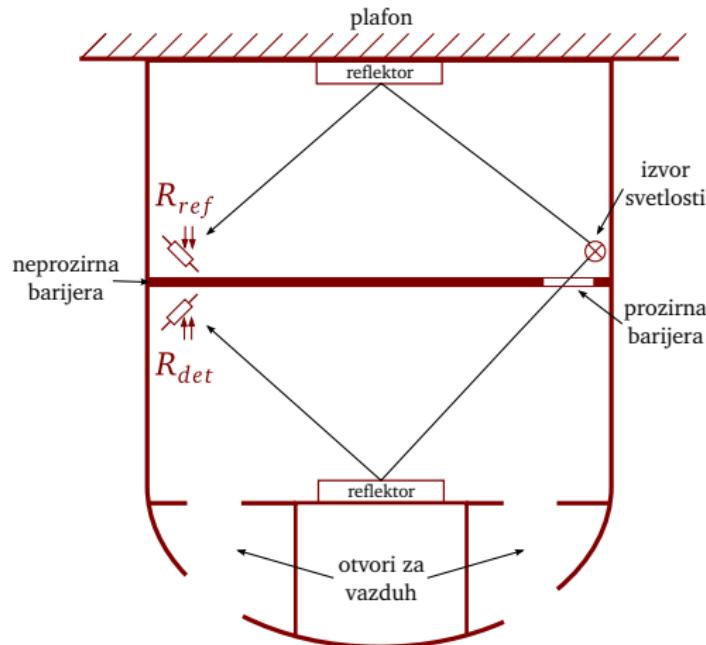
Fotootpornici

Primena - detektor dima



Fotootpornici

Primena - detektor dima, ilustracija konstrukcije



Fotootpornici

Primena - detektor dima, princip rada; druge primene

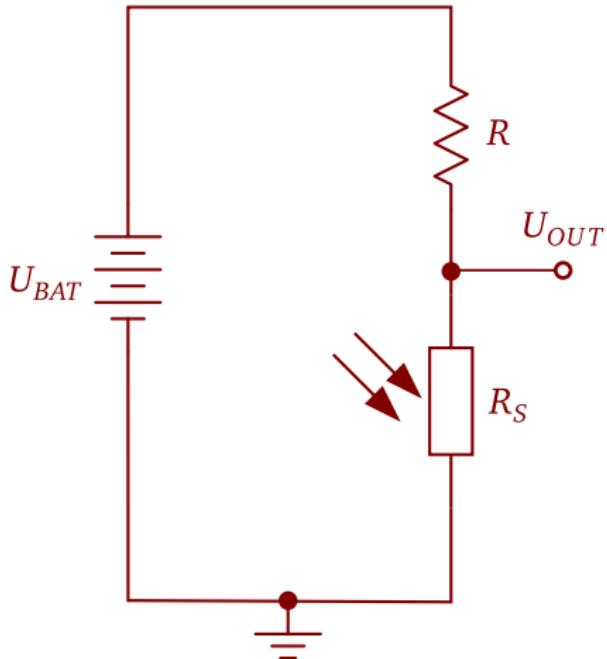
Potenciometrom R_{bal} se Vitstonov most dovodi u ravnotežu. U odsustvu dima, fotootpornici R_{det} i R_{ref} su podjednako osvetljeni iz izvora svetlosti unutar detektora. Dim ulazi kroz otvore na donjem delu detektora i smanjuje refleksiju svetlosti prema fototporniku R_{det} . Zbog toga se otpornost fotootpornika R_{det} povećava i most izlazi iz ravnoteže, što aktivira kolo za alarm.

Druge primene fotootpornika:

- automatska kontrola ulične rasvete;
- senzor ambijentalnog osvetljenja kod kamera i fotoaparata.

Fotoootpornici

Senzor ambijentalnog osvetljenja - primer



U kolu na slici napon baterije je $U_{BAT} = 3,6\text{V}$. Kada osvetljenost ambijenta padne ispod određene vrednosti, otpornost fotoootpornika poraste na $R_S = 100\text{k}\Omega$, a napon na izlazu treba da bude $V_{OUT} = 1,2\text{V}$. Potrebno je odrediti vrednost otpornosti otpornika R .

Fotootpornici

Senzor ambijentalnog osvetljenja - primer

Pošto je:

$$V_{OUT} = \frac{V_{BAT}}{3} = \frac{3,6}{3} = 1,2V,$$

to znači da je na otporniku R ukupno $2/3$ napona U_{BAT} . Zbog toga je:

$$R = 2R_S = 2 \cdot 100 = 200 \text{ k}\Omega . \quad (16)$$

Napomena: Kada napon V_{OUT} dostigne određenu vrednost, aktivira se kolo za prilagođenje osvetljenja ekrana uslovima ambijentalnog osvetljenja.

Nelinearni otpornici

Završne napomene

- Prikazane električne šeme ne uključuju sve detalje i mogu se koristiti *isključivo* u obrazovne svrhe.
- Sva ograničenja vezana za disipaciju snage, maksimalni napon i uticaj temperature koja su opisana u delu koji se odnosi na otpornike stalne i promenljive otpornosti primenjuju se i kod nelinearnih otpornika! Nelinearni otpornici takođe sadrže i parazitne kapacitivnosti i induktivnosti.

Preporučena literatura

- ① S. Ristić, *RLC komponente*, Prosveta, Niš, 2005. (ISBN: 86-7455-653-1)
- ② S. Ristić, *Elektronske komponente*, Skripta, Elektronski fakultet, Niš, 2011. (<http://mikroelektronika.elfak.ni.ac.rs>→literatura).
- ③ C. Platt, *Encyclopedia of Electronic Components*, Vol. 1, O'Reilly, 2012. (ISBN: 978-1-449-33389-8)
- ④ T. Floyd, *Principles of Electric Circuits, Conventional Current Version*, 9th Ed., Pearson, 2013. (ISBN: 978-1292025667)

Kondenzator

Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Kondenzator na visokim učestanostima

Model realnog kondenzatora

Deo I

Kondenzatori

Sadržaj

1 Kondenzator

- Definicije
- Vrste kondenzatora

2 Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

3 Odziv kondenzatora na naizmenični signal

4 Kondenzator na visokim učestanostima

Kondenzator

Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu
Odziv kondenzatora na naizmenični signal
Kondenzator na visokim učestanostima
Model realnog kondenzatora

Definicije
Vrste kondenzatora

Deo 1

Kondenzator

Kondenzator

1 Kondenzator

- Definicije
- Vrste kondenzatora

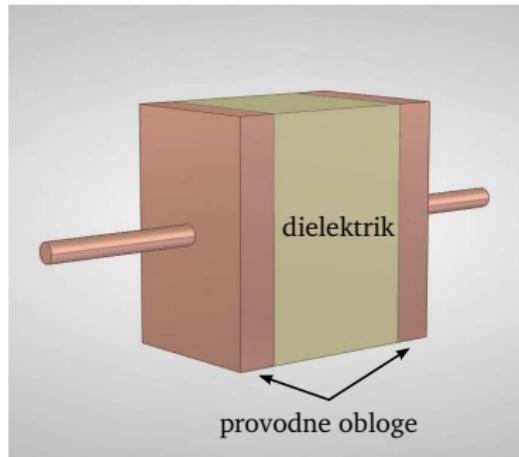
2 Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

3 Odziv kondenzatora na naizmenični signal

4 Kondenzator na visokim učestanostima

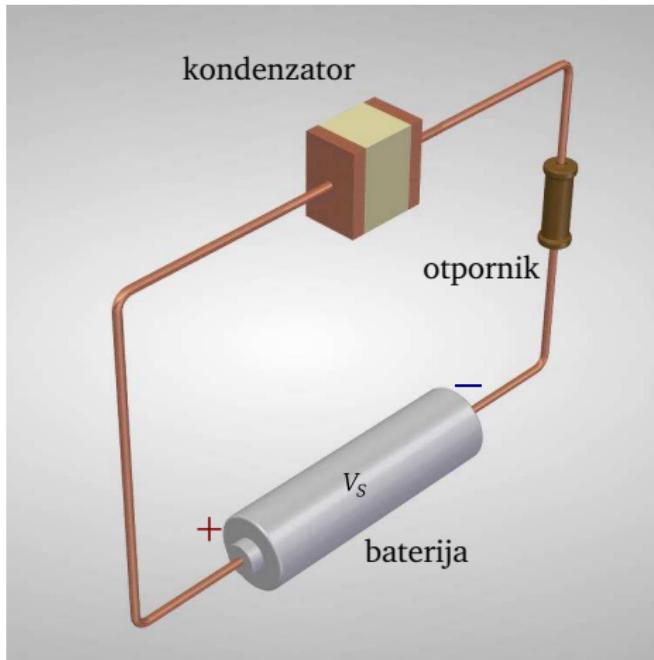
Kondenzator

Kondenzator je elektronska komponenta koja se sastoji od dve provodne obloge, koje su međusobno razdvojene električnim izolatom (dielektrikom).



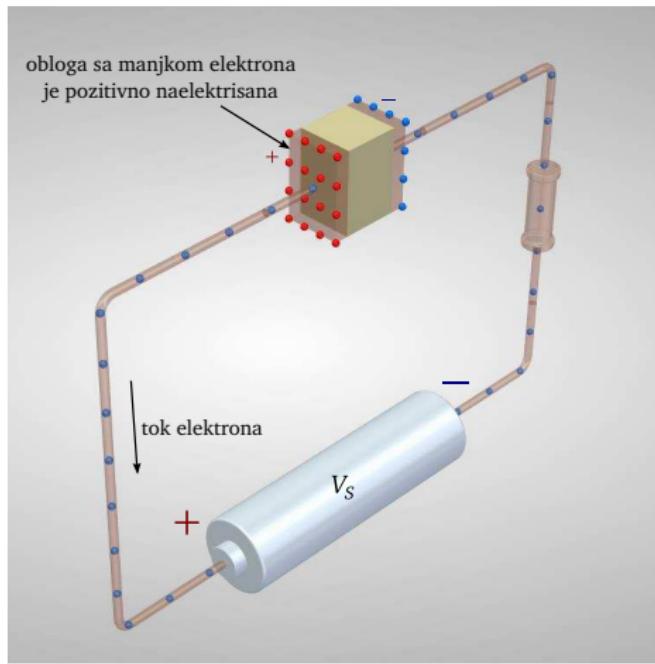
Kondenzator

Na kondenzator se, preko otpornika, priključi baterija napona V_S



Kondenzator

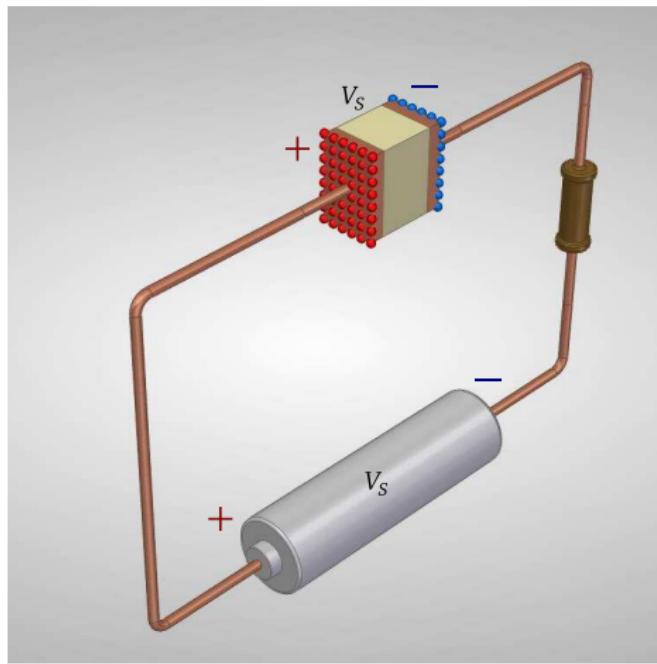
Razdvajanje naelektrisanja



Baterija ulaze rad, usled koga elektroni sa jedne obloge kondenzatora prelaze na drugu. Zbog toga jedna obloga kondenzatora postaje pozitivno nanelektrisana, a druga negativno. Kao posledica, između obloga se javlja razlika potencijala.

Kondenzator

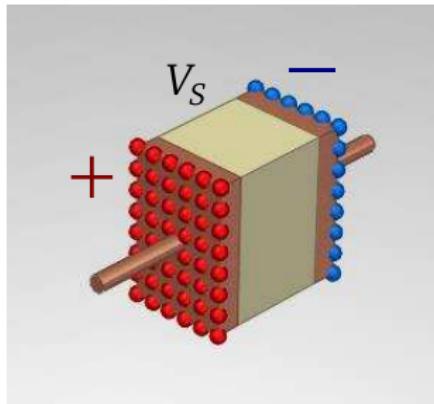
Prestanak procesa



Proces se zaustavlja kada razlika potencijala između obloga postane jednak naponu V_S . Kaže se da se kondenzator napunio na vrednost napona V_S .

Kondenzator

Akumulacija energije



Kada se baterija otkači, između obloga ostaje razlika potencijala. Teorijski, kondenzator bi mogao da ostane napunjen beskonačno dugo. Realno, kondenzator u kolu će se postupno isprazniti kroz dielektrik, jer *nema idealnog dielektrika*.

Kondenzator akumulira energiju u električnom polju između obloga (tj. u dielektriku).

Kondenzator

Kapacitivnost

Količina nanelektrisanja na oblogama kondenzatora linearno je srazmerna primjenjom spoljašnjem naponu V :

$$Q = CV , \quad (1)$$

pri čemu je konstanta proporcionalnosti C *kapacitivnost* kondenzatora. Jedinica za kapacitivnost je *farad* (F).

Kapacitivnost kondenzatora čije su obloge površine S i debljina dielektrika d se može izraziti kao:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} , \quad (2)$$

pri čemu je $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ dielektrična konstanta vakuma, a ε_r je relativna dielektrična konstanta dielektrika.

Kondenzator

1 Kondenzator

- Definicije
- Vrste kondenzatora

2 Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

3 Odziv kondenzatora na naizmenični signal

4 Kondenzator na visokim učestanostima

Kondenzator

Podela

Kondenzatori se mogu podeliti prema:

① kapacitivnosti:

- kondenzatori stalne kapacitivnosti;
- kondenzatori promenljive kapacitivnosti;

② vrsti deielektrika:

- keramika;
- liskun;
- staklo;
- papir;
- teflon, polisulfon;
- polistiren (stirofleks), poliester, polikarbonat, polipropilen;
- elektrolit (čvrsti i tečni);

Kondenzator

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

Osnovni parametri:

- **Nazivna (nominalna) kapacitivnost.**
- **Tolerancija (klasa tačnosti).**
- **Nazivni (nominalni) radni napon.**

Nazivna kapacitivnost se izražava u F (npr. 33 nF, 47 pF, 1 µF). Tolerancija predstavlja odstupanje u odnosu na vrednost nazivne kapacitivnosti i izražava se u procentima (npr. $\pm 10\%$). Nazivni napon predstavlja maksimalni napon pri kome kondenzator može pouzданo da radi i izražava se u V (npr. 63 V).

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

Standardne vrednosti kapacitivnosti

Standardne vrednosti kapacitivnosti su u opsegu 1 pF–1 mF. Vrednosti kapacitivnosti se, slično kao i vrednosti otpornosti, pojavljuju u nizovima. Na primer: 10, 12, 15, 18, 20, 22, 27, 33, 39, 47, 51, 56, 68, 82 μ F. Tipične vrednosti tolerancija kapacitivnosti su 5%, 10% i 20%.

Posebna vrsta kondenzatora su *superkondenzatori (supercap)*, čije kapacitivnosti mogu biti i do više desetina F.

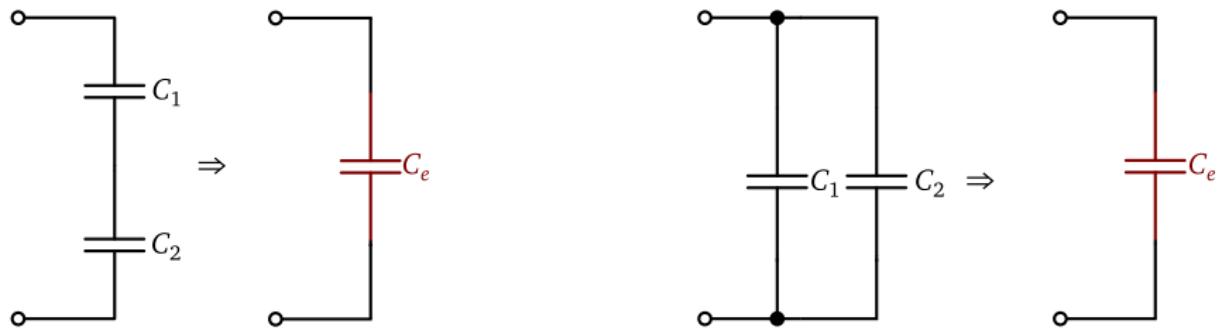
Ne pojavljuju se sve vrste kondenzatora u svakom opsegu standardnih vrednosti kapacitivnosti! Na primer, liskunski kondenzatori imaju kapacitivnost u opsegu 1 pF–47 nF.

Postoji više načina označavanja kondenzatora, u zavisnosti od vrste, namene i dimenzija kućišta¹.

¹Detalji se mogu naći u preporučenoj literaturi

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

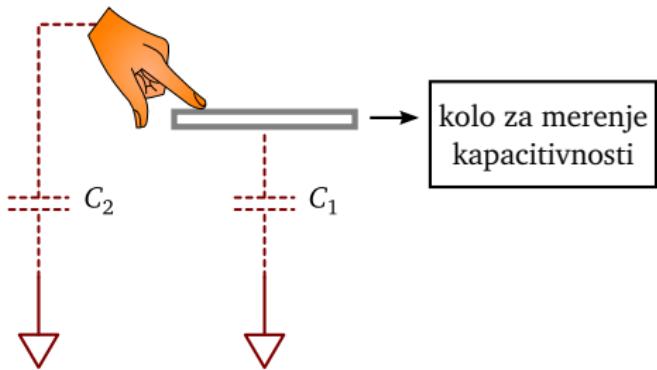
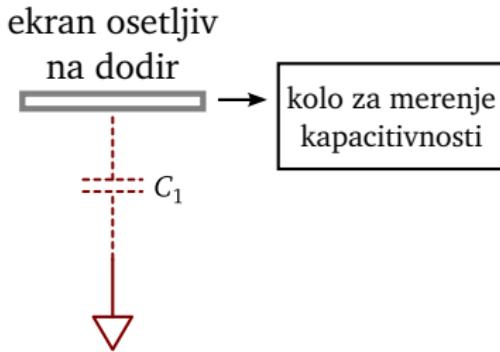
Redna i paralelna veza kondenzatora



- Za rednu vezu: $C_e = \frac{1}{\left(\frac{1}{C_1}\right) + \left(\frac{1}{C_2}\right)} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2};$
- Za paralelnu vezu: $C_e = C_1 + C_2.$

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

Ilustracija principa rada kapacitivnog ekrana osjetljivog na dodir



Postoji više različitih implementacija i tehnika za detekciju promene kapacitivnosti, kojima se omogućava prepoznavanje ne samo tačaka dodira, već i gestova.

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

Nazivni napon (*Rated Voltage*)

Vrednost nazivnog napona pre svega zavisi od vrste dielektrika koji se nalazi između obloga kondenzatora, kao i od rastojanja između obloga. Ako se na kondenzator dovede napon veći od nazivnog, električno polje između obloga će izazvati *proboj* dielektrika, što ne-povratno razara njegovu strukturu. Posledice po električno kolo mogu biti kratak spoj ili prekid, u zavisnosti od vrste kondenzatora i konfiguracije kola.

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

Dielektrična čvrstoća (*Dielectric Strength*)

Probojni napon je određen osobinom dielektrika koja se naziva *dielektrična čvrstoća*:

Materijal	Dielektrična čvrstoća (kV/cm)
Vazduh	30
Ulje	150
Keramika	390
Impregnirani papir	470
Teflon	590
Liskun	590
Staklo	790

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

Dielektrična čvrstoća i probajni napon - primer

Kondenzator sa keramikom kao dielektrikom.

- Ako je rastojanje između obloga kondenzatora 1 mm, probajni napon je 39 kV.
- Ako je rastojanje između obloga kondenzatora $6,5 \mu\text{m}$, probajni napon je 250 V.

U praksi uvek treba upotrebiti kondenzator sa većim nominalnim naponom od maksimalnog napona koji je predviđen za njegovo punjenje u kolu. Sigurnosti radi, proizvođači nominalni napon najčešće definišu na manju vrednost od probajnog napona (tipično 2-2,5 puta manju).

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

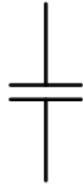
Podela prema polarizaciji

Podela prema polarizaciji:

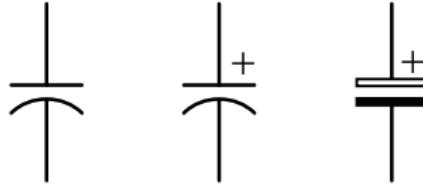
- nepolarizovani
- polarizovani

Električni simboli:

nepolarizovani



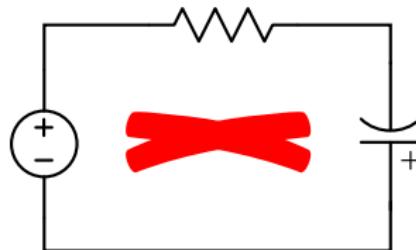
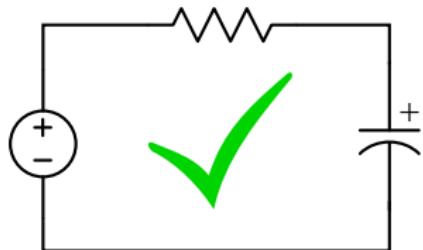
polarizovani



Kondenzatori stalne kapacitivnosti

Polarizovani kondenzatori

Polarizovani kondenzatori imaju pozitivnu i negativnu elektrodu. Pozitivna elektroda se priključuje na pozitivan kraj jednosmernog naponskog izvora, a negativna na negativni. Obrnuta polarizacija nije dozvoljena i uništava kondenzator (uz eksploziju)!



Kondenzatori stalne kapacitivnosti

Polarizovani kondenzatori

Polarizovani kondenzatori sadrže dielektrik i elektrolit (u tečnom ili čvrstom stanju). Najčešće su u upotrebi:

- aluminijumski elektrolitski kondenzatori (dielektrik je Al_2O_3);
- tantalni kondenzatori (Ta_2O_5).

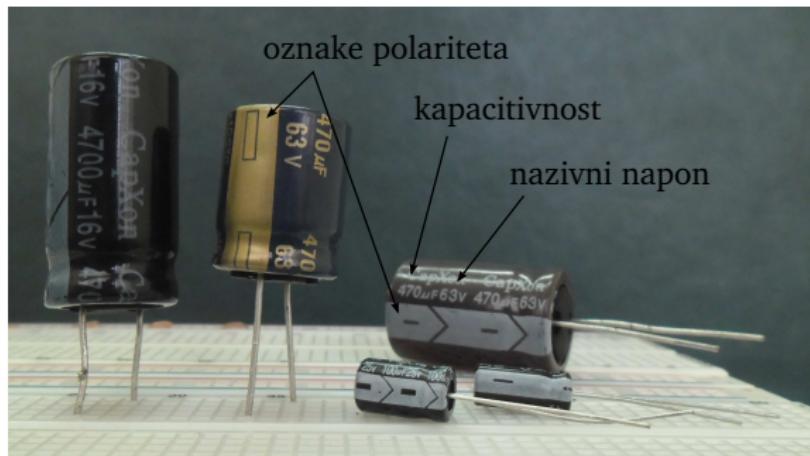
Obe vrste kondenzatora kao dielektrik mogu sadržati i polimer, u kom slučaju se nazivaju aluminijumski polimerni i tantalni polimerni, respektivno.

Za ove kondenzatore su karakteristične relativno velike vrednosti kapacitivnosti (veće od $0,1 \mu\text{F}$), kao i relativno mali nazivni naponi (tipično od nekoliko desetina do nekoliko stotina V).

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

Polarizovani kondenzatori

Aluminijumski elektrolitski kondenzatori u kućištima sa izvodima:

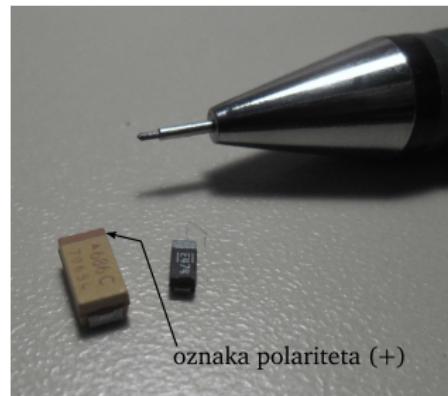
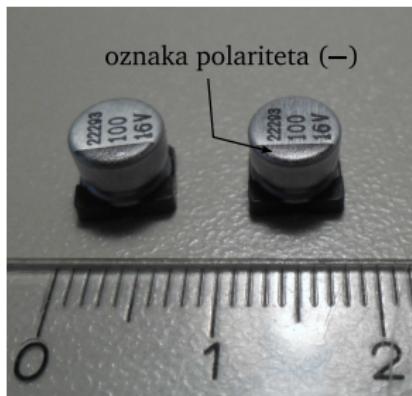


Negativni izvod je kraći od pozitivnog.

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

Polarizovani kondenzatori

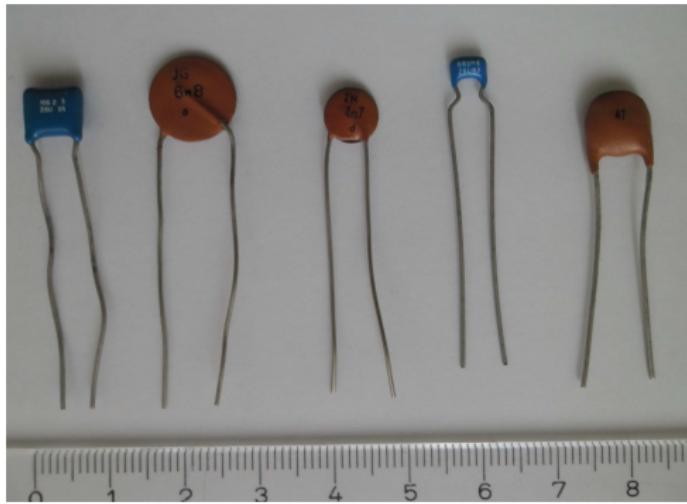
Aluminijumski kondenzatori sa čvrstim elektrolitom (levo) i tantalni kondenzatori (desno) u SMD kućištima.



U slučaju otkaza aluminijumskog elektrolitskog kondenzatora, najčešća posledica je prekid u kolu. U slučaju otkaza tantalnog elektrolitskog kondenzatora, najčešća posledica je *kratak spoj* u kolu!

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

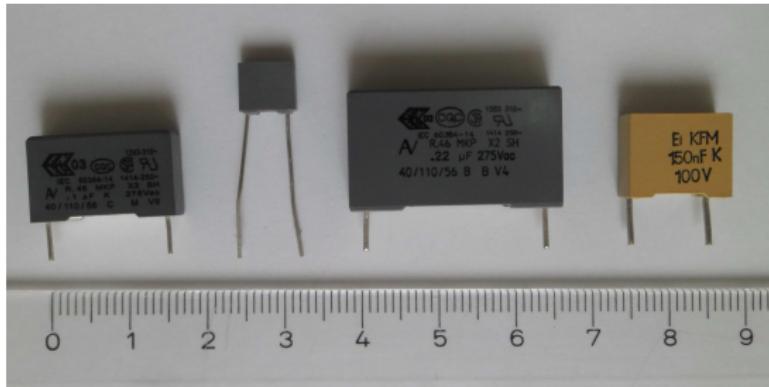
Keramički kondenzatori



Tipične vrednosti kapacitivnosti su u opsegu od pF do 100 μ F, a nazivni naponi se kreću od nekoliko V do nekoliko kV.

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

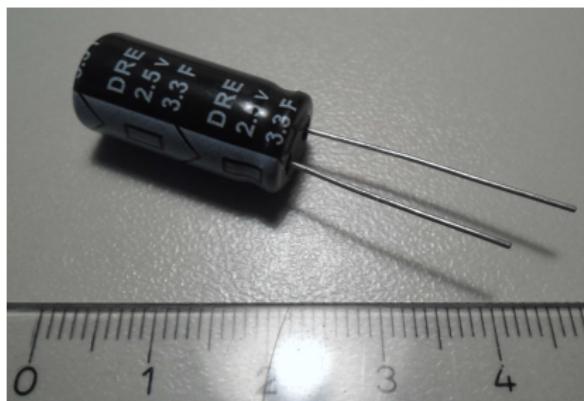
Poliesterski, polipropilenski kondenzatori



Ovi kondenzatori se nazivaju još i *film kondenzatori*. Tipične vrednosti kapacitivnosti su u opsegu od nekoliko stotina pF do nekoliko desetina μ F, a nazivni naponi se kreću od nekoliko desetina V do 1 kV.

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

Superkondenzatori



Ovo su elektrolitski kondenzatori, sa elektrodama od aktivnog ugljenika. Ne postoji fizički dielektrik, već se elektrohemijskim procesom formira pseudodielektrik.

Tipične vrednosti kapacitivnosti su u opsegu od nekoliko stotina mF do nekoliko desetina, pa i stotina F, a nazivni naponi su do nekoliko V. Primenjuju se kao zamena za baterije.

Kondenzatori stalne kapacitivnosti

Temperaturni koeficijent

Temperaturni koeficijent kondenzatora α_C se specificira u ppm/°C (ppm – *Parts Per Million*)². Može biti pozitivan i negativan.

Primer: Kondenzator na sobnoj temperaturi ima kapacitivnost $1 \mu\text{F}$, a temperaturni koeficijent mu je deklarisan na vrednost $-100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. To znači da će za svaki stepen porasta temperature kapacitivnost opadati za 100 pF .

U opštem slučaju je promena kapacitivnosti C u temperaturnom opsegu ΔT :

$$\Delta C = \frac{C}{10^6} \cdot \Delta T \cdot \alpha_C . \quad (3)$$

² $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$.

Kondenzatori promenljive kapacitivnosti

Podela

Kondenzatori promenljive kapacitivnosti mogu se podeliti na:

- obrtne kondenzatore
- trimer kondenzatore
- varikap diode³

Električni simboli:

obrtni



trimer



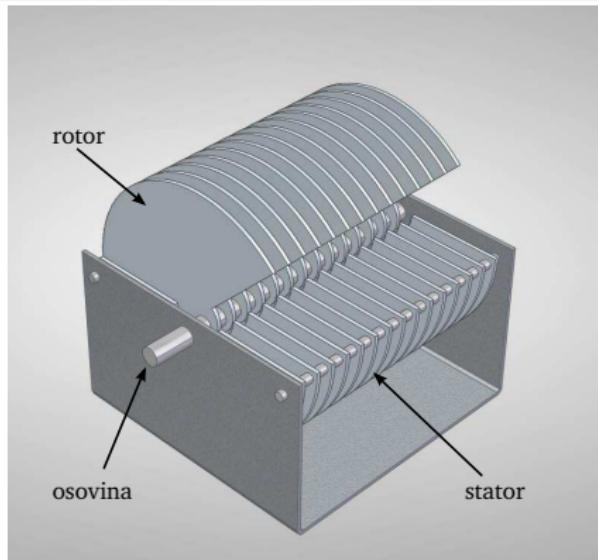
varikap
dioda



³Videti predavanja o diodama.

Kondenzatori promenljive kapacitivnosti

Obrtni kondenzatori

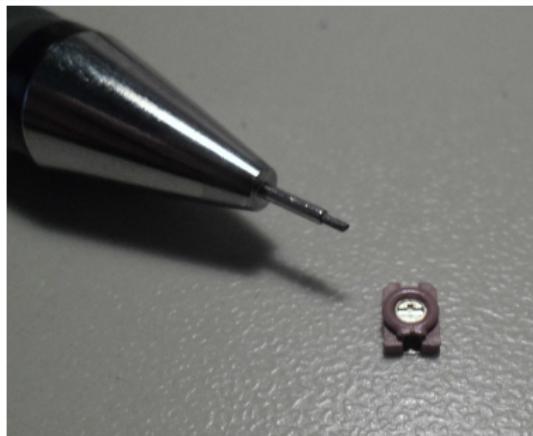


Rotor i stator se sastoje od niza paralelnih ploča. Dielektrik je vazduh. Obrtanjem rotorskih ploča menja se aktivna površina između njih i statorskih ploča, pa se menja i kapacitivnost. Postoje različite konstrukcije, sa promenljivim poluprečnikom rotorskih ili statorskih ploča.

Primenjuju se za podešavanje parametara elektronskih kola tokom eksploatacije (slično kao i potenciometri).

Kondenzatori promenljive kapacitivnosti

Trimeri



Stator je pričvršćen za kućište. Dielektrik može biti liskun ili keramika. Ugao kojim rotor preklapa stator (tj. aktivna površina kondenzatora) određuje se okretanjem rotora oko osovine pomoću šrafcigera.

Tipičan opseg promene kapacitivnosti je od nekoliko pF do nekoliko desetina pF.

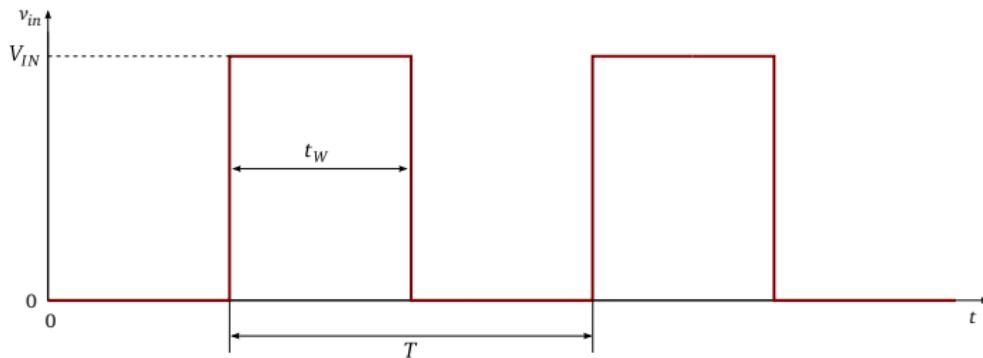
Primenjuju se za fino podešavanje (kalibraciju) parametara elektronskih kola u proizvodnji i nakon servisiranja.

Deo 2

Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Impulsna pobuda

Povorka naponskih impulsa



Amplituda impulsa je V_{IN} . Učestanost impulsa je $f = 1/T$, pri čemu je T perioda impulsa. Faktor iskorišćenja periode (*Duty Cycle*) je:

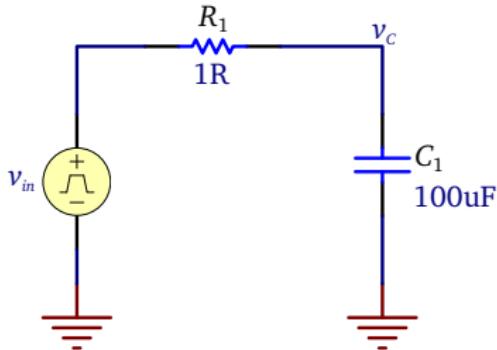
$$D = \frac{t_W}{T} \times 100 \ (\%)$$

Impulsi se kontinualno ponavljaju sa periodom T .

Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Osnovno kolo

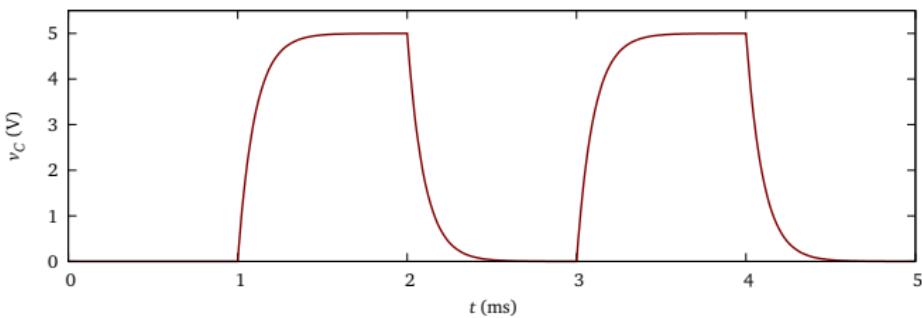
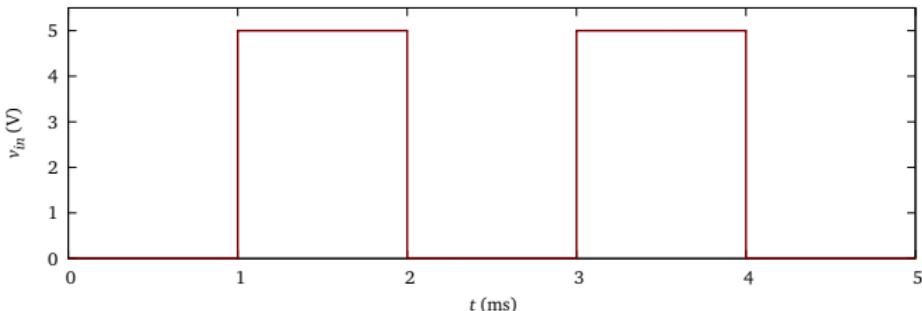
Na kondenzator $C_1 = 100 \mu\text{F}$ se, preko otpornika $R_1 = 1 \Omega$, dovodi povorka impulsa v_{in} .



Neka je amplituda impulsa $V_{IN} = 5 \text{ V}$, perioda $T = 2 \text{ ms}$, a faktor iskorišćenja periode $D = 50\%$.

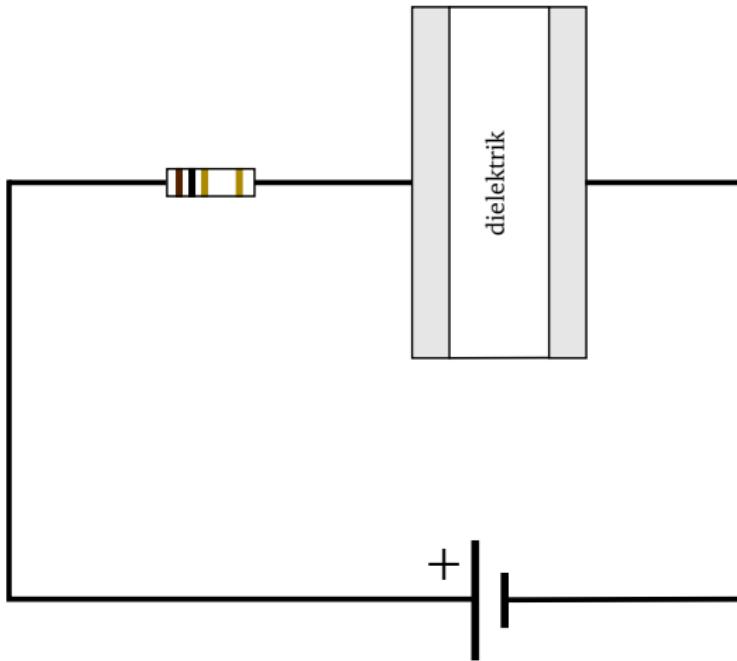
Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Pobudni napon v_{in} i napon na kondenzatoru v_C



Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Punjjenje kondenzatora



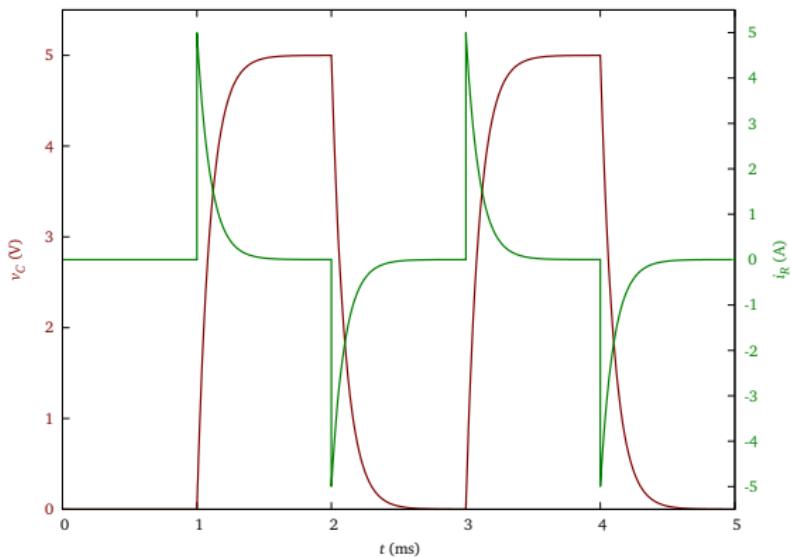
Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Mehanizam

- Kondenzator je na početku procesa prazan ($v_C = 0$), tj. obloge su mu elektroneutralne.
- Kada je $v_{in} = V_{IN}$, kondenzator se puni preko otpornika R_1 . Proces punjenja kondenzatora predstavlja nagomilavanje nanelektrisanja na njegovim oblogama. U početku je taj proces brz, a zatim postaje sporiji - nagomilana nanelektrisanja formiraju električno polje koje se suprotstavlja spoljašnjem polju izvora.
- Kada je $v_{in} = 0$, kondenzator se prazni preko otpornika R_1 . Nagomilana nanelektrisanja se vraćaju, tako da obloge ponovo postaju elektroneutralne.

Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Napon na kondenzatoru i struja kroz otpornik



Da bi se na kondenzatoru uspostavio napon, kroz kolo najpre mora da protekne struja!

Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Vremenska zavisnost promene napona na kondenzatoru

Kada se kondenzator puni:

$$v_C = V_{IN} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (4)$$

Kada se kondenzator prazni:

$$v_C = V_{IN} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$

Vremenska konstanta:

$\tau = R_1 C_1$

(s)
(6)

Smatra se da se kondenzator potpuno napunio/ispraznio za vreme $t \simeq 5\tau$.

Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Primer

Za razmatrano kolo:

$$\tau = R_1 C_1 = 1 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 0,1 \text{ ms}$$

Kondenzator će se potpuno napuniti/isprazniti za vreme:

$$t \simeq 5\tau = 0,5 \text{ ms}$$

Ako je vreme trajanja impulsa t_W kraće od 5τ , kondenzator se neće napuniti do vrednosti V_{IN} , već do vrednosti određene izrazom (4). Slično važi i za pražnjenje.

Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Primer

Neka je, za razmatrano kolo $t_W = 0,25 \text{ ms}$ i $T = 0,5 \text{ ms}$. Tada je, prema (4):

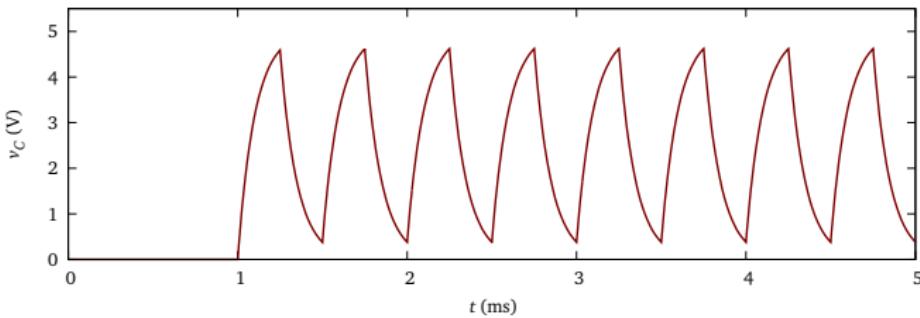
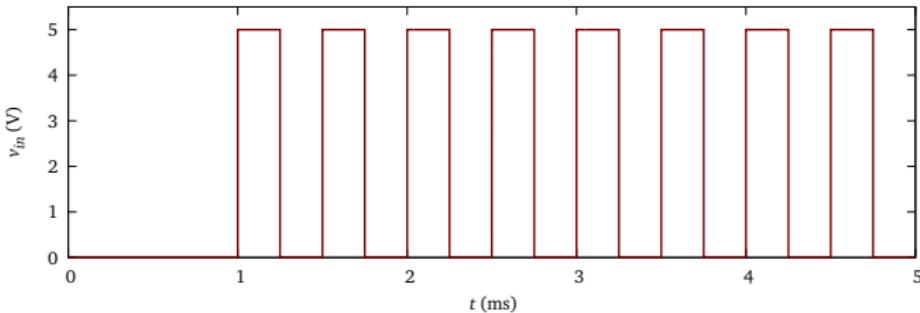
$$v_C(t_W) = V_{IN} \left(1 - e^{-\frac{t_W}{\tau}} \right) = 5 \cdot \left(1 - e^{-\frac{0,25}{0,1}} \right) \simeq 4,6 \text{ V}$$

Kondenzator se od ove vrednosti prazni za vreme $t = T - t_W$. Na osnovu (5) je:

$$v_C(T) = v_C(t_W) \cdot e^{-\frac{T-t_W}{\tau}} = 4,6 \cdot e^{-\frac{0,25}{0,1}} \simeq 0,38 \text{ V}$$

Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Primer



Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Opšta formula

U opštem slučaju se trenutna vrednost napona na kondenzatoru može opisati pomoću izraza:

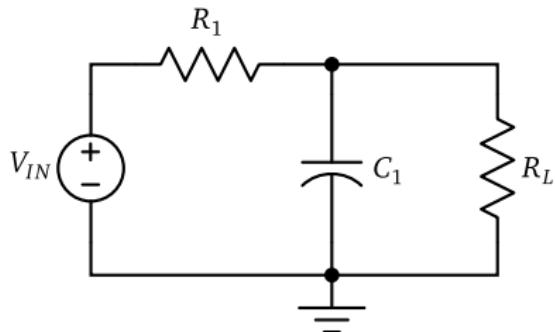
$$v_C = V_2 + (V_1 - V_2) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

gde su V_1 i V_2 početna i krajnja vrednost napona na kondenzatoru, respektivno.

Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Primer primene

Kondenzator kao „rezervoar“ (*reservoir capacitor*).



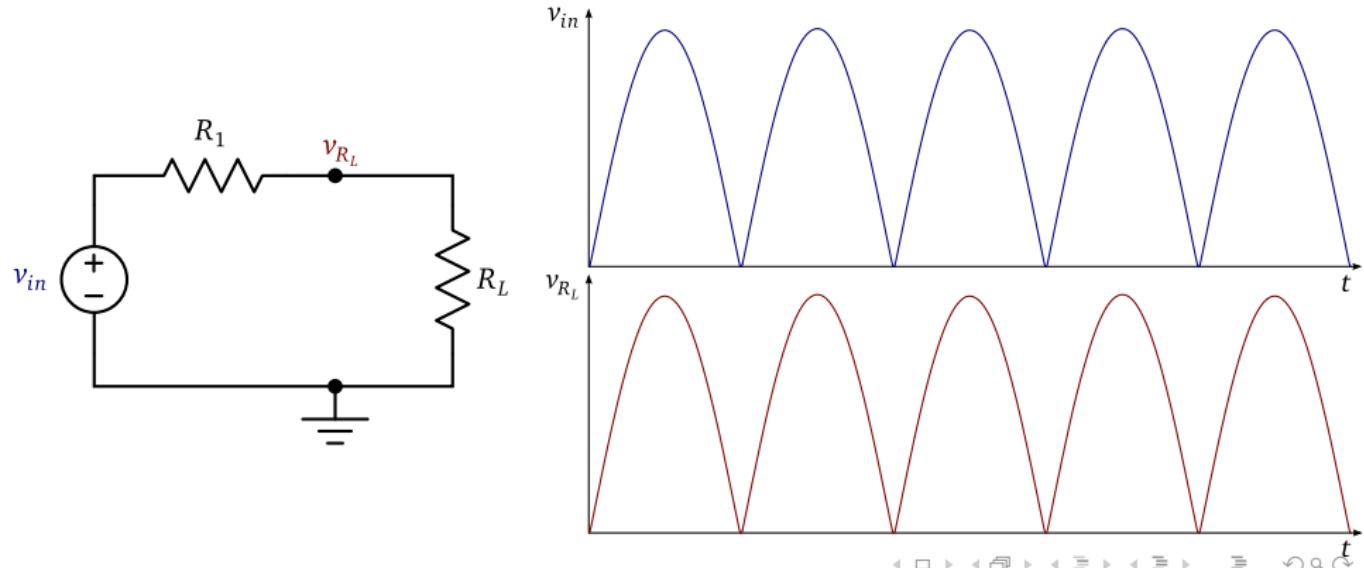
U normalnom radu, izvor konstantnog jednosmernog napona V_{IN} obezbeđuje potreban napon opterećenju R_L . Kondenzator C_1 je napunjen na vrednost napona V_{IN} .

Ako dođe do kratkotrajanog prekida ili propada vrednosti napona iz izvora (tipično do nekoliko ms), kondenzator zadržava potreban napon na opterećenju, tako da ono „ne primećuje“ poremećaj u radu izvora. U ovu svrhu se tipično koriste aluminijumski elektrolitski ili tantalni kondenzatori, zbog velikih kapacitivnosti.

Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Primer primene

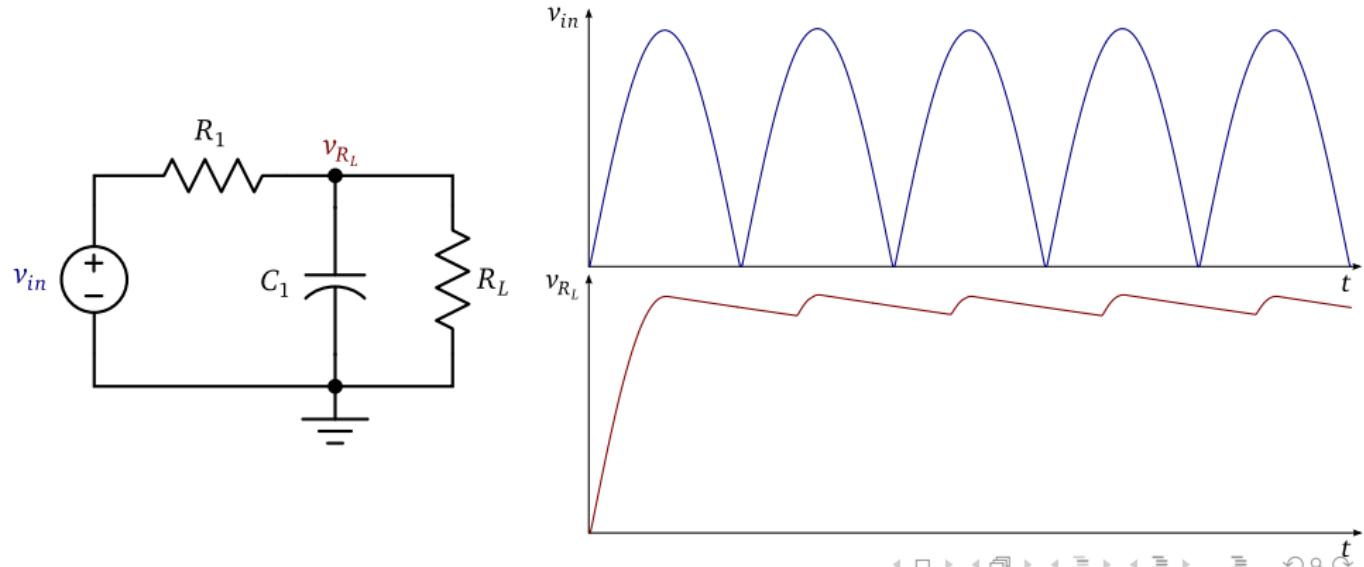
Ulagani napon v_{in} se menja periodično u vremenu, kao na slici. Napon na opterećenju v_{R_L} prati promene ulaznog napona.



Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

Primer primene

Ulagani napon v_{in} se menja periodično u vremenu, kao na slici. Kondenzator ublažava (*smoothing*) promene napona v_{R_L} .

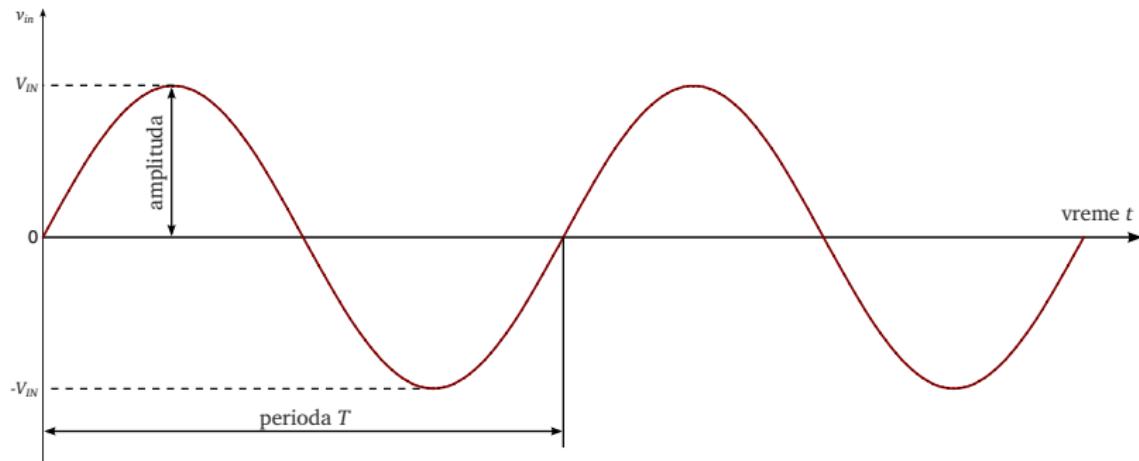


Deo 3

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Prostoperiodični naizmenični signal (sin) - AC



Signal se ponavlja sa periodom T . Učestanost signala je:

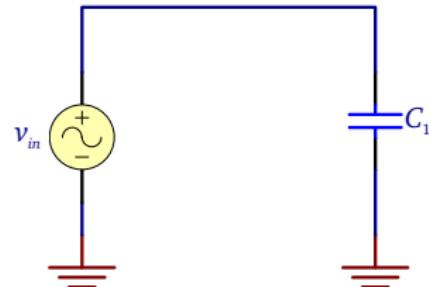
$$f = \frac{1}{T}$$

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Idealni kondenzator sa naizmeničnom pobudom

Neka je, u idealnom slučaju, $R_1 = 0$. Na kondenzator se dovodi prostoperiodični naizmenični signal v_{in} .

$$v_{in} = V_{IN} \sin(\omega t)$$



Kružna učestanost ω je:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Trenutna vrednost struje

Prema definiciji je trenutna vrednost struje u kolu⁴:

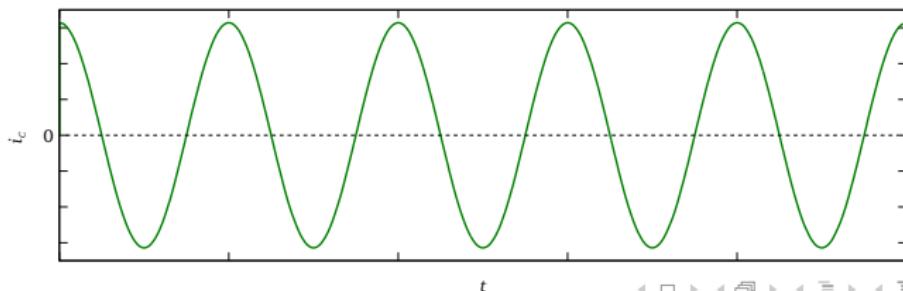
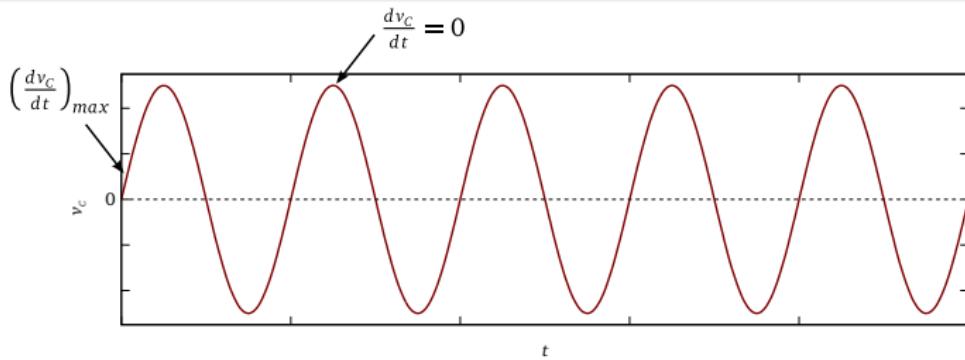
$$i_C = \frac{dq_C}{dt} = \frac{d(Cv_C)}{dt} = C \frac{dv_C}{dt} \quad (8)$$

- struja u kolu će biti maksimalna kada je promena napona u vremenu maksimalna
- struja u kolu će biti jednaka nuli kada je promena napona u vremenu jednaka nuli

⁴Napomena: u ovom kolu je $v_C = v_{in}$ jer nema otpornika

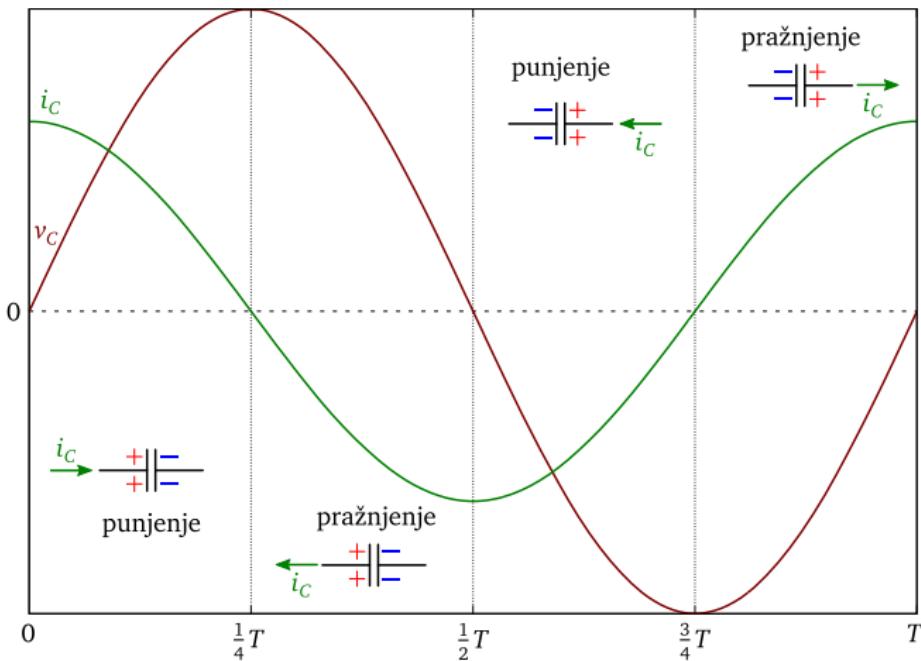
Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Da bi se na kondenzatoru uspostavio napon, kroz kolo najpre mora da protekne struja!



Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Tokom jedne periode, polaritet napona na oblogama se menja!



Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Reaktansa kondenzatora (*Capacitive Reactance*)

- Ako se poveća učestanost, napon na kondenzatoru će se brže menjati u vremenu. Zbog toga će struja da poraste: $f \uparrow \Rightarrow \omega \uparrow \Rightarrow dv_C/dt \uparrow \Rightarrow i_C \uparrow$
- Ako se poveća kapacitivnost, porašće i struja: $C \uparrow \Rightarrow i_C \uparrow$

Može se definisati mera otpora koji kondenzator pruža promeni napona na njemu. Ona je, na osnovu prethodnih zaključaka, obrnuto proporcionalna učestanosti i kapacitivnosti. Naziva se *reaktansa kondenzatora*:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (\Omega) \quad (9)$$

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Reaktansa kondenzatora - granični slučajevi

Kada je kapacitivnost fiksna:

- Za niske učestanosti reaktansa ima veliku vrednost. Za jedno-smerni signal $\omega = 0 \Rightarrow X_C \rightarrow \infty$, pa se kondenzator u kolu pojavljuje kao prekid.
- Za visoke učestanosti reaktansa ima malu vrednost. Za naizmenični signal visoke učestanosti $\omega \rightarrow \infty \Rightarrow X_C \rightarrow 0$, pa se kondenzator u kolu pojavljuje kao *kratak spoj*!

Napomena: To što se kaže da kondenzator za naizmenični signal visoke učestanosti predstavlja kratak spoj, ne znači da nanelektrisanja sa obloga prolaze kroz dielektrik!

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Reaktansa kondenzatora - primer

Neka je $C = 100 \text{ nF}$.

- Za $f = 1 \text{ Hz}$ je:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \simeq 1,6 \text{ M}\Omega$$

- Za $f = 10 \text{ MHz}$ je:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \simeq 0,16 \Omega$$

Primena: Kondenzator se može upotrebiti da ukloni visokofrekventni neželjeni signal (šum) koji je superponiran na izvor konstantnog jednosmernog napona. Za ovu namenu se koriste keramički kondenzatori.

Kondenzator

Odziv kondenzatora na impulsnu pobudu

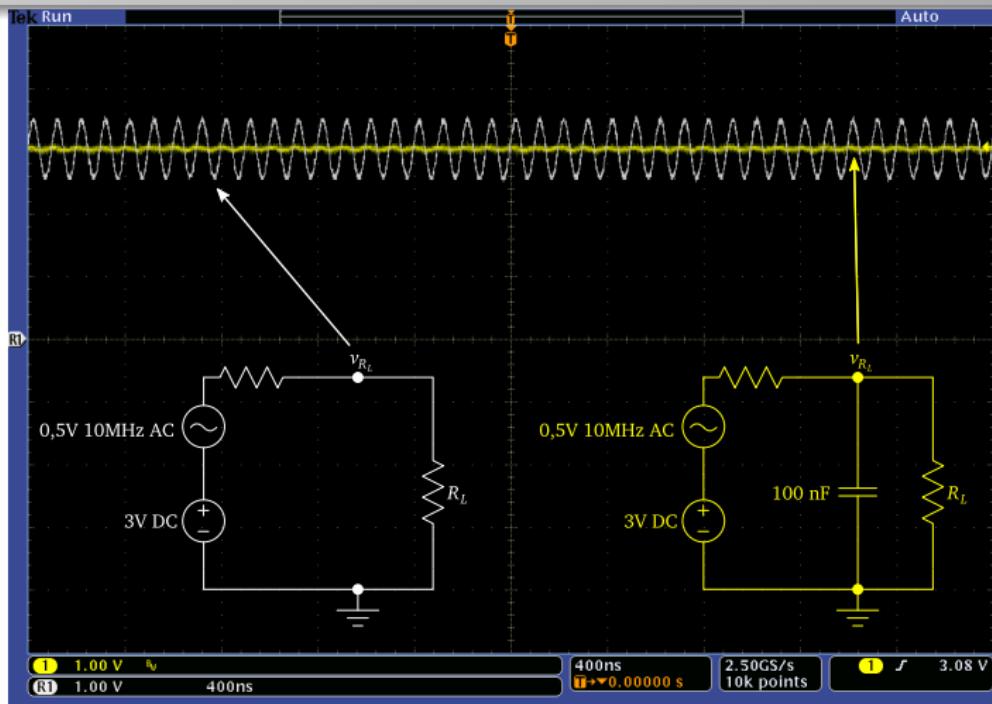
Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Kondenzator na visokim učestanostima

Model realnog kondenzatora

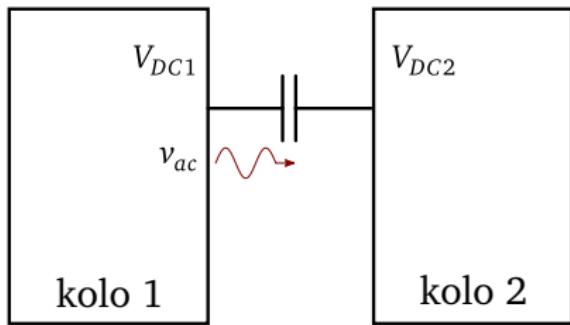
Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Reaktansa kondenzatora - primena



Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Reaktansa kondenzatora - primena



Kondenzator razdvaja jedno-smerne signale između dva kola. S druge strane, propušta naizmenični signal iz prvog kola u drugo, stvarajući na taj način između njih vezu (*coupling*).

Mogu se koristiti poliesterski ili elektrolitski kondenzatori. Ako se koriste aluminijumski elektrolitski kondenzatori, potrebno je obraćati pažnju na polarizaciju.

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Snaga

Idealni kondenzator ne disipira energiju. Tokom jedne poluperiodne naizmeničnog signala energija se akumulira na kondenzatoru u obliku električnog polja na dielektriku. Tokom druge poluperiode se akumulirana energija vraća izvoru. Teorijski gledano, nema gubitka energije na kondenzatoru. Trenutna snaga je:

$$p_C = v_C i_C$$

Kada je trenutna snaga pozitivna, kondenzator akumulira energiju.
Kada je trenutna snaga negativna, kondenzator vraća energiju.

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Efektivna vrednost naizmeničnog signala (*Root Mean Square – rms*)

Efektivna vrednost naizmeničnog napona jednaka je vrednosti jednosmernog napona koji na istom opterećenju disipira istu snagu kao i taj naizmenični napon. Slično važi i za struju. Efektivna vrednost *sinusnog* signala predstavlja njegovu amplitudu podeljenu sa $\sqrt{2}$:

$$V_{eff} = \frac{V_{IN}}{\sqrt{2}}$$

$$I_{eff} = \frac{I_{IN}}{\sqrt{2}}$$

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Reaktivna snaga (*Reactive Power*)

Kod kondenzatora se definiše *reaktivna snaga*:

$$P_{Cr} = V_{Ceff} I_{Ceff} \quad (\text{VAR}) \quad (10)$$

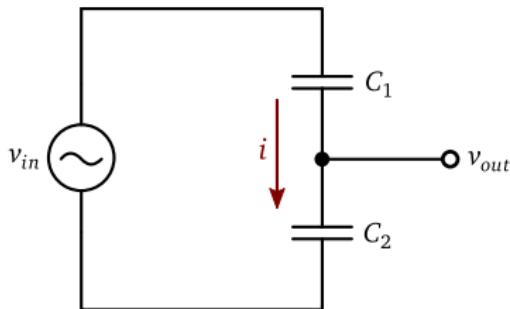
Jedinica je VAR - Volt-Amper-Reaktivni. Za reaktivnu snagu važe relacije:

$$P_{Cr} = \frac{V_{Ceff}^2}{X_C}$$

$$P_{Cr} = I_{Ceff}^2 X_C$$

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Kapacitivni razdelenik



Neka su V_{in} i I efektivne vrednosti napona v_{in} i struje i , respektivno.

$$I = \frac{V_{in}}{X_{C1} + X_{C2}} .$$

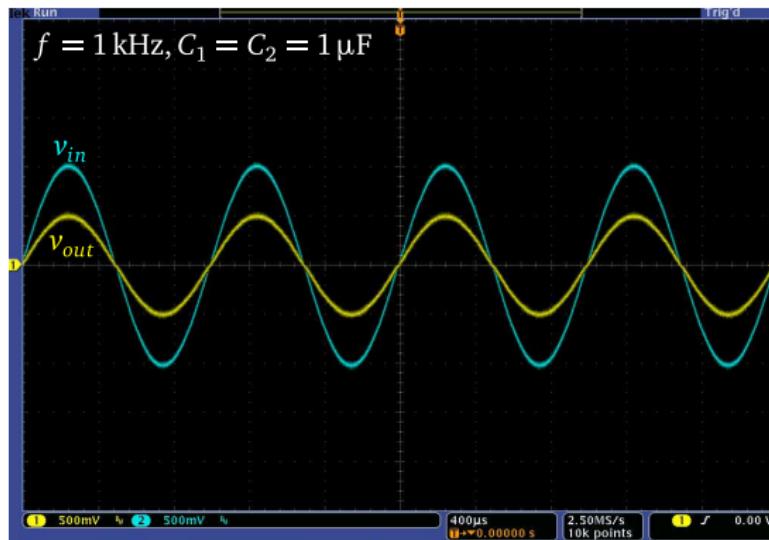
Efektivna vrednost napona na kondenzatoru C_2 je:

$$V_{out} = I \cdot X_{C2} = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) V_{in} .$$

Napomena: Kada je u pitanju opterećenje na izlazu razdelnika, važe analogna razmatranja kao i kod naponskog razdelnika.

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

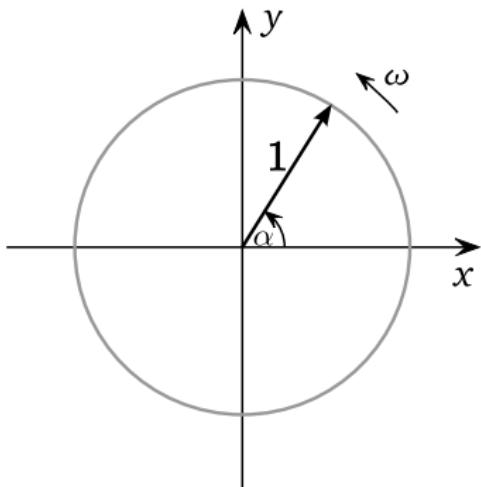
Kapacitivni razdelenik - primer (polipropilenski kondenzatori)



Kapacitivni razdelenik se *ne primenjuje* za promenu amplitude mrežnog napona!!!

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Jedinični krug

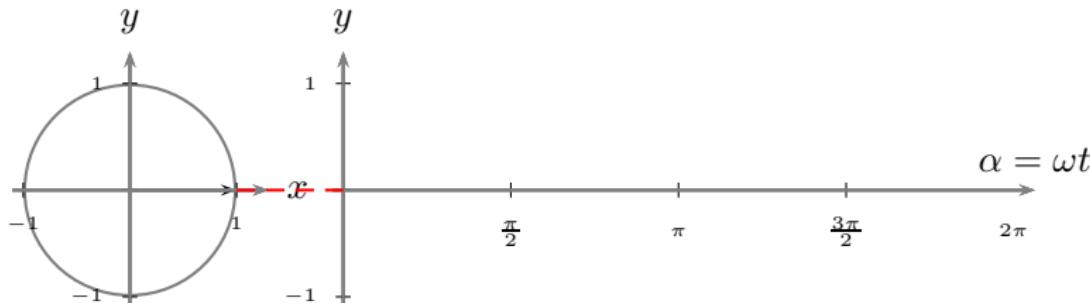


Vektor intenziteta 1 rotira oko napadne tačke kružnom učestanostu ω . U svakom trenutku zaklapa ugao $\alpha = \omega t$ sa x osom.

Podrazumevana jedinica za kružnu učestanost ω je rad s^{-1} (radijan u sekundi). Primer konverzije u stepene: za $f = 50 \text{ Hz}$ i $t = 1 \text{ ms}$ je $\omega t = 2\pi f t \simeq 0,31416 \text{ rad} = 360^\circ ft = 18^\circ$.

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

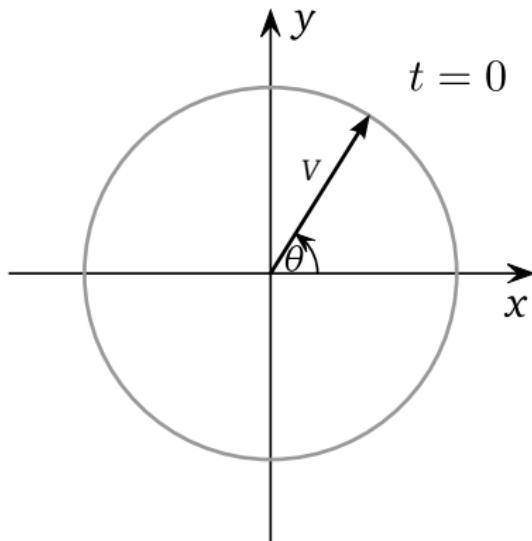
Projekcijom na y osu dobija se sin



U početnom trenutku $t = 0$, pravac i smer vektora poklapaju se sa pravcem i pozitivnim smerom x ose. Rotacija vektora proizvoljnog intenziteta V može se opisati kao: $v(t) = V \sin \omega t$.

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Opšti slučaj



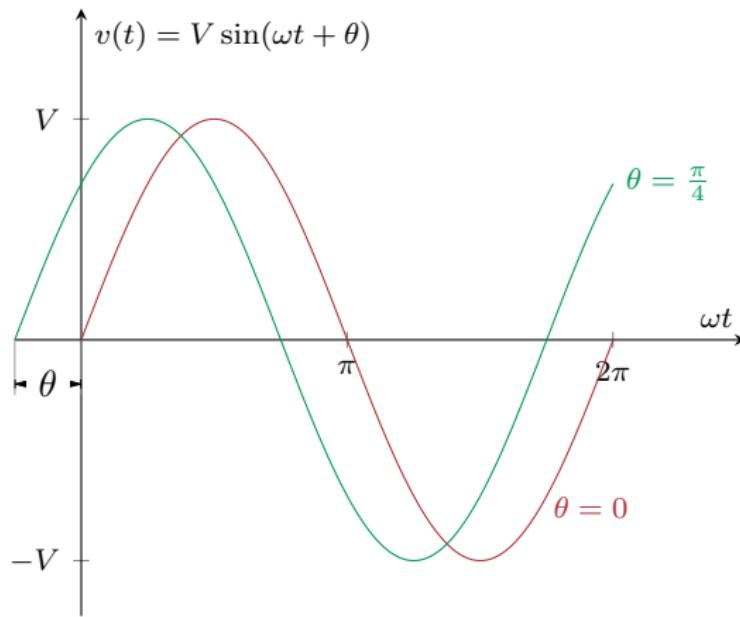
Ako je početni trenutak rotacije takav da pravac i smer vektora zaklapaju sa pozitivnim smerom x ose ugao θ , onda je:

$$v(t) = V \sin(\omega t + \theta).$$

Ugao θ se naziva fazni pomeraj ili *fazni ugao*.

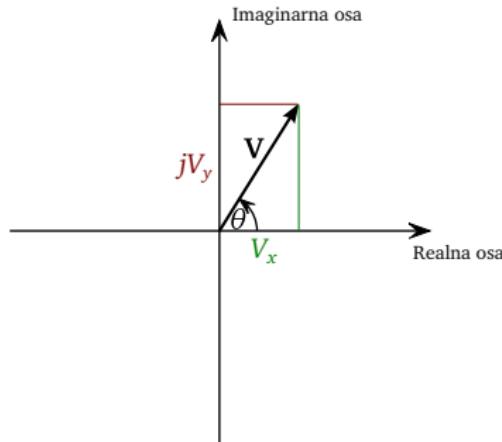
Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Fazni ugao θ - primer



Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Predstavljanje u kompleksnoj ravni



Naizmenični signali se iz praktičnih razloga predstavljaju kao fazori (*phasors*) u *kompleksnoj ravni*, pri čemu je $j = \sqrt{-1}$. Mogu biti u algebarskom i polarnom obliku:

- algebarski oblik: $\mathbf{V} = V_x + jV_y$
- polarni oblik: $\mathbf{V} = V\angle\theta$

Veza između oblika: $V_x = V \cos \theta$ i $V_y = V \sin \theta$.

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Predstavljanje u kompleksnoj ravni

Za signale istih učestanosti moguće je eliminisati vremensku komponentu (ωt), tako da se fazor karakteriše intenzitetom i faznim uglom:

- intenzitet: $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$

- fazni ugao: $\theta = \arctan \frac{V_y}{V_x}$

Napomena: Prilikom izračunavanja funkcije arctan potrebno je voditi računa o znacima V_x i V_y , tj. o kvadrantu koordinatnog sistema. U II i III kvadrantu se dodaje 180° (π rad).

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Primeri

- $\mathbf{V} = 8 + j6$:

$$V = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10; \theta = \arctan \frac{6}{8} = 36,86^\circ; \mathbf{V} = 10\angle 36,86^\circ \text{ (I kvadrant)}$$

- $\mathbf{V} = 10 - j5$:

$$V = \sqrt{10^2 + (-5)^2} = 11,18; \theta = \arctan \frac{-5}{10} = -26,56^\circ; \mathbf{V} = 11,18\angle -26,56^\circ \text{ (IV kvadrant)}$$

- $\mathbf{V} = 10\angle 30^\circ$:

$$V_x = 10 \cos 30^\circ; V_y = 10 \sin 30^\circ; \mathbf{V} = 8,66 + j5 \text{ (I kvadrant)}$$

- $\mathbf{V} = 25\angle -45^\circ$ (ili $\mathbf{V} = 25\angle 315^\circ$):

$$V_x = 25 \cos(-45^\circ); V_y = 25 \sin(-45^\circ); \mathbf{V} = 17,68 - j17,68 \text{ (IV kvadrant)}$$

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Primeri

- $\mathbf{V} = -3 + j2$:

$$V = \sqrt{(-3)^2 + 2^2} = 3,6; \theta = \arctan \frac{2}{-3} + 180^\circ = 146,31^\circ;$$

$$\mathbf{V} = 3,6\angle 146,31^\circ \text{ (II kvadrant)}$$

- $\mathbf{V} = -10 - j8$:

$$V = \sqrt{(-10)^2 + (-8)^2} = 12,81; \theta = \arctan \frac{-8}{-10} + 180^\circ =$$

$$218,66^\circ; \mathbf{V} = 12,81\angle 218,66^\circ \text{ (III kvadrant)}$$

- $\mathbf{V} = 4\angle 120^\circ$:

$$V_x = 4 \cos 120^\circ; V_y = 4 \sin 120^\circ; \mathbf{V} = -2 + j3,46 \text{ (II kvadrant)}$$

- $\mathbf{V} = 2\angle -135^\circ$ (ili $\mathbf{V} = 2\angle 225^\circ$) :

$$V_x = 2 \cos(-135^\circ); V_y = 2 \sin(-135^\circ); \mathbf{V} = -8,41 - j1,41 \text{ (III kvadrant)}$$

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Operacije nad fazorima

- Za sabiranje i oduzimanje pogodniji je algebarski oblik:

$$\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 = (V_{1x} + V_{2x}) + j(V_{1y} + V_{2y})$$

$$\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2 = (V_{1x} - V_{2x}) + j(V_{1y} - V_{2y})$$

- Za množenje i deljenje pogodniji je polarni oblik:

$$\mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{V}_2 = (V_1 V_2) \angle (\theta_1 + \theta_2)$$

$$\frac{\mathbf{V}_1}{\mathbf{V}_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \angle (\theta_1 - \theta_2)$$

Operacije su primenljive samo za signale istih učestanosti!

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Operacije nad fazorima

- Za stepenovanje je pogodan Ojlerov oblik:

$$\mathbf{V} = V e^{j\theta} = V(\cos \theta + j \sin \theta) = V_x + j V_y$$

- Primer:

$$\mathbf{V}^3 = V^3 e^{j3\theta}$$

$$\begin{aligned}(3+j4)^3 &= (\sqrt{3^2+4^2})^3 e^{j3(\arctan(4/3))} \\&= 125e^{j3 \cdot 53,13^\circ} \\&= 125e^{j \cdot 159,39^\circ} \\&= 125(\cos 159,39^\circ + j \sin 159,39^\circ) \\&= -117 + j44\end{aligned}$$

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Impedansa (*Impedance*)

Oblik Omovog zakona za naizmenične signale:

$$Z = \frac{V}{I} \quad (11)$$

Veličina **Z** se naziva *impedansa* i predstavlja kompleksni broj.

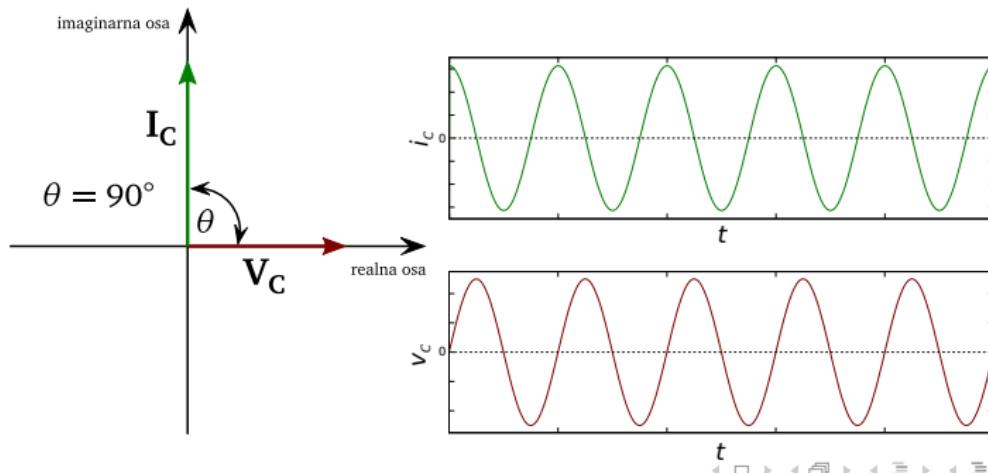
- Kod otpornika su struja i napon u fazi, pa je:

$$Z_R = \frac{V_R}{I_R} = \frac{V_R \angle 0^\circ}{I_R \angle 0^\circ} = \frac{V_R}{I_R} = R \quad (12)$$

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Fazni pomeraj kod kondenzatora

Kod kondenzatora struja ne prati napon u vremenu, već u odnosu na njega ide ispred (prednjači). Drugim rečima, struja i napon su međusobno *fazno pomereni* i to tako da struja prednjači u odnosu na napon za 90° .



Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Impedansa kondenzatora

Pošto struja prednjači u odnosu na napon za 90° , impedansa kondenzatora je:

$$Z_C = \frac{V_C}{I_C} = \frac{V_C \angle 0^\circ}{I_C \angle 90^\circ} = \frac{V_C}{I_C} \angle (0^\circ - 90^\circ) = X_C \angle -90^\circ \quad (13)$$

U kompleksnom obliku je:

$$\boxed{Z_C = -jX_C} \quad (14)$$

pri čemu je $X_C = 1/\omega C = 1/2\pi fC$ reaktansa kondenzatora definisana izrazom (9). Treba primetiti da reaktansa ne nosi informaciju o fazi, pa se zbog toga i uvodi impedansa.

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Ekvivalentna serijska otpornost (*Equivalent Series Resistance*)

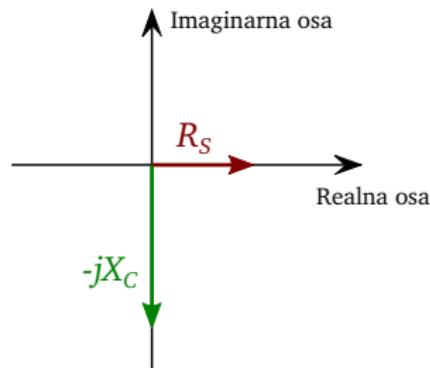
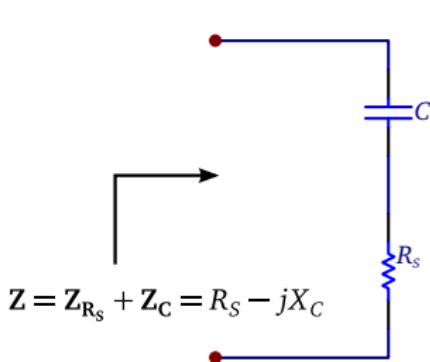
Dielektrik u realnom kondenzatoru reaguje na promenu električnog polja, tako što disipira energiju u vidu topote. To znači da, za razliku od idealnog, kod realnog kondenzatora postoji gubitak energije. Ovaj gubitak se, zajedno sa ostalim gubicima (na oblogama i izvodima), može električno opisati pomoću redne veze otpornika ekvivalentne otpornosti R_S i kondenzatora ekvivalentne kapacitivnosti. Otpornost R_S se naziva *ekvivalentna serijska otpornost* (ESR). Na višim učestanostima ekvivalentna kapacitivnost je približno jednaka kapacitivnosti idealnog kondenzatora⁵.

⁵Za detalje videti ▶ Model realnog kondenzatora

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Ekvivalentna serijska otpornost

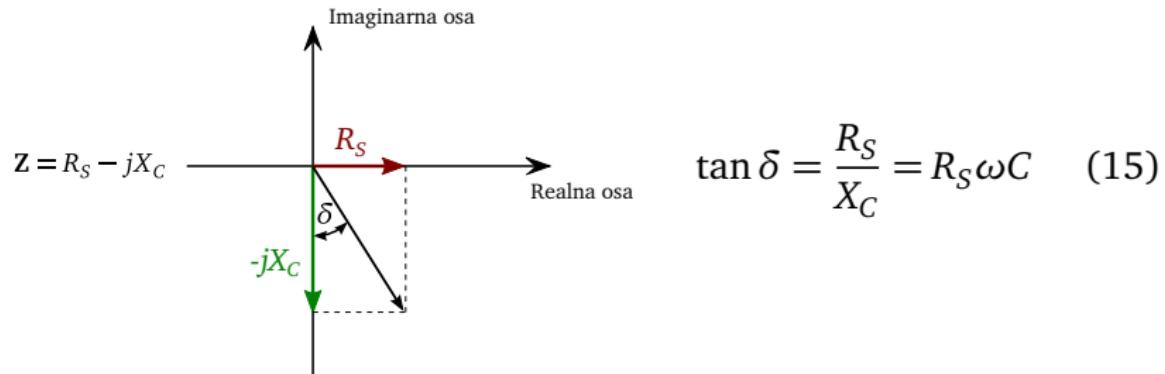
U prvoj aproksimaciji se može posmatrati model:



Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Gubici u dielektriku (*Dielectric Loss*)

Gubici se mogu opisati preko *tangensa ugla gubitaka*, koji se definije kao:



Tangens ugla gubitaka naziva se još i faktor disipacije (*Dissipation factor*) i označava sa DF .

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Faktor dobrote (*Quality Factor*)

Recipročna vrednost tangensa ugla gubitaka naziva se *faktor dobrote kondenzatora Q*:

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{1}{R_S \omega C} \quad (16)$$

Faktor dobrote je u stvari odnos reaktivne snage idealnog kondenzatora i snage koja se disipira usled gubitaka:

$$Q = \frac{P_{Cr}}{P_{R_S}} = \frac{I_{Ceff}^2 X_C}{I_{Ceff}^2 R_S} = \frac{X_C}{R_S} = \frac{1}{R_S \omega C} \quad (17)$$

Odziv kondenzatora na naizmenični signal

Faktor dobrote

Šta pokazuje faktor dobrote?

- Da bi kondenzator mogao da radi na višim učestanostima, potrebno je da ima što manju ekvivalentnu serijsku otpornost.

Proizvođači u tehničkim specifikacijama obično daju faktor dobrote za određenu vrstu dielektrika, pri određenim učestanostima (npr. za 1 kHz i 1 MHz) i efektivnim vrednostima naizmeničnog napona (tipično $V_{eff} = 1 \text{ V}$).

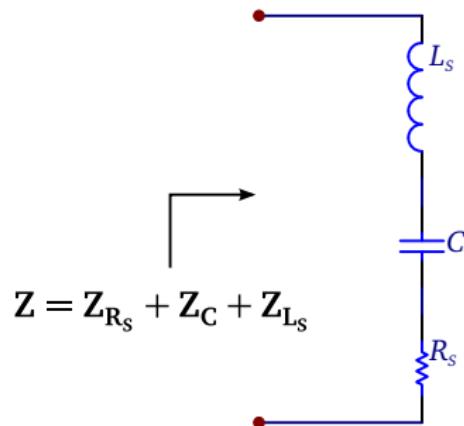
Deo 4

Kondenzator na visokim učestanostima

Kondenzator na visokim učestanostima

Parazitna induktivnost

Zbog postojanja metalnih obloga i izvoda, realni kondenzator poseduje i parazitnu induktivnost. Ova induktivnost se može električno opisati uvođenjem kalema na red sa idealnim kondenzatorom.



Kondenzator na visokim učestanostima

Impedansa kola

Reaktansa i impedansa⁶ kalema su:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (\Omega) \quad (18)$$

$$Z_L = jX_L \quad (19)$$

pri čemu je L induktivnost kalema.

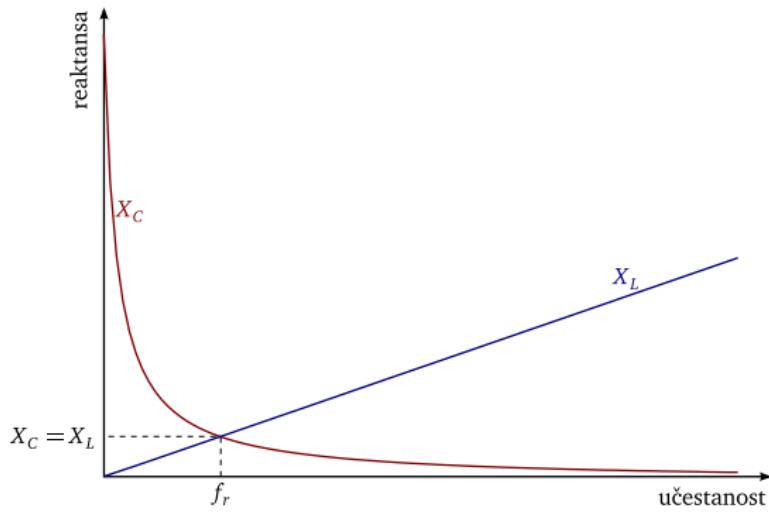
Impedansa kola je:

$$Z = Z_{R_s} + Z_C + Z_{L_s} = R_s - jX_C + jX_{L_s} \quad (20)$$

⁶Detaljnije u delu o kalemovima.

Kondenzator na visokim učestanostima

Rezonantna učestanost



- Reaktansa kondenzatora opada sa porastom učestanosti:

$$X_C \sim \frac{1}{f}$$

- Reaktansa kalema raste sa porastom učestanosti:

$$X_L \sim f$$

Na rezonantnoj učestanosti f_r će reaktanse kondenzatora i kalema biti jednake.

Kondenzator na visokim učestanostima

Rezonantna učestanost

Rezonantna učestanost se određuje iz uslova:

$$X_C = X_{L_s} \implies \frac{1}{2\pi f_r C} = 2\pi f_r L_s ,$$

odakle je:

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C}} \quad (21)$$

Ova učestanost se naziva *sopstvena rezonantna učestanost (self resonant frequency)*.

Kondenzator na visokim učestanostima

Impedansa

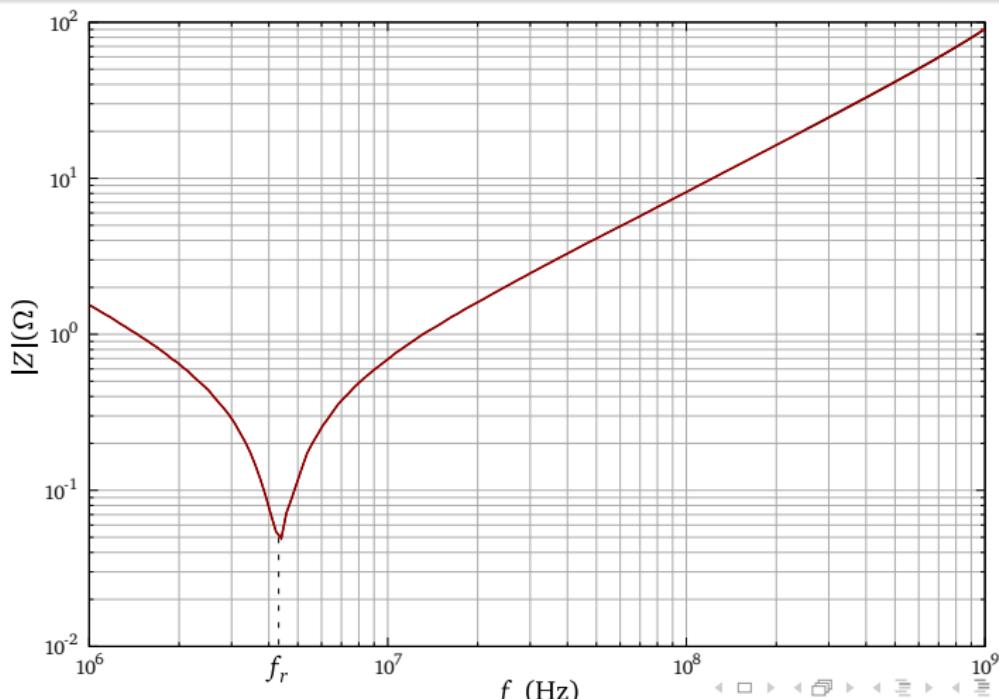
- Do sopstvene rezonantne učestanosti dominira kapacitivna priroda impedanse.
- Na sopstvenoj rezonantnoj učestanosti je $X_C = X_{L_s}$. Na osnovu izraza (20) je:

$$Z(f_r) = R_S - jX_C + jX_{L_s} = R_S$$

- Iznad sopstvene rezonantne učestanosti dominira induktivna priroda impedanse.

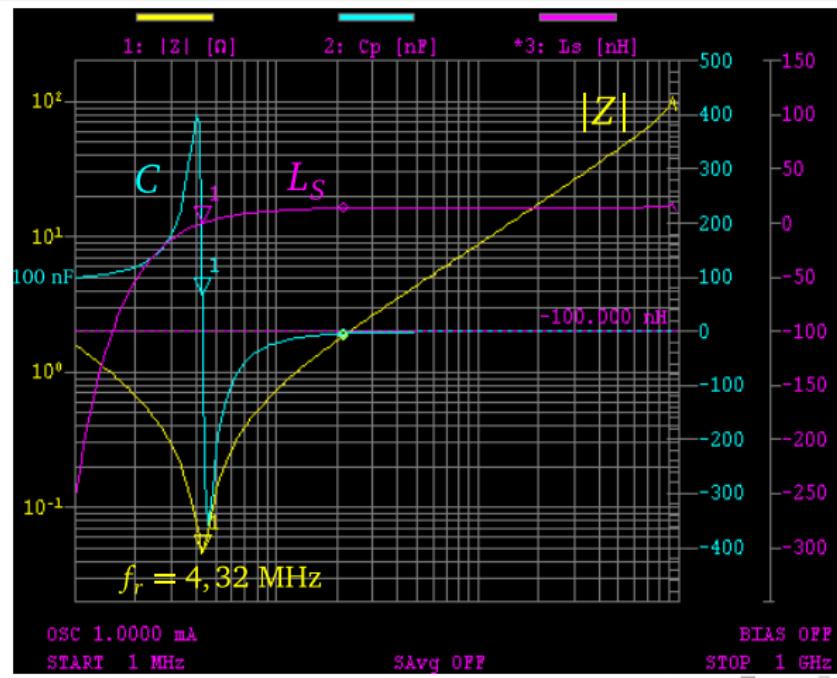
Kondenzator na visokim učestanostima

Zavisnost impedanse realnog kondenzatora od učestanosti



Kondenzator na visokim učestanostima

Eksperimentalne karakteristike realnog kondenzatora 100 nF

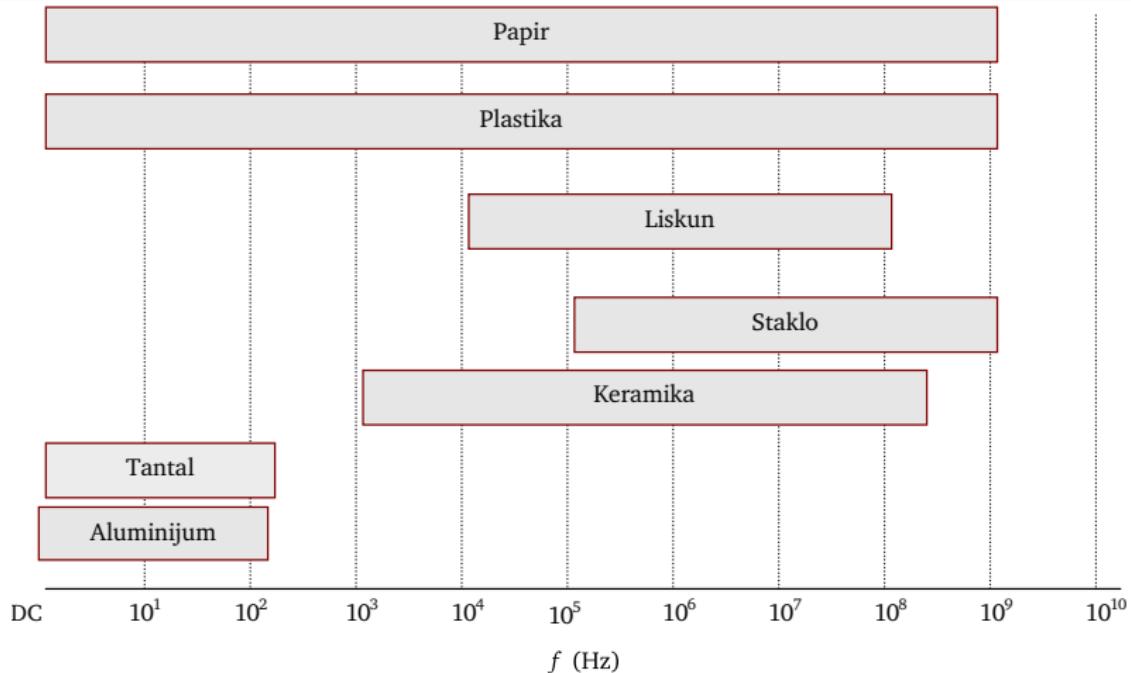


Kondenzator na visokim učestanostima

- Iznad sopstvene rezonantne učestanosti impedansa kondenzatora počinje da raste!
- Sopstvena rezonantna učestanost implicitno zavisi od konstrukcije kondenzatora i vrste dielektrika.
- Područje primene određenog tipa kondenzatora ograničeno je sopstvenom rezonantnom učestanošću.

Kondenzator na visokim učestanostima

Područje primene kondenzatora sa nekim od standardnih dielektrika

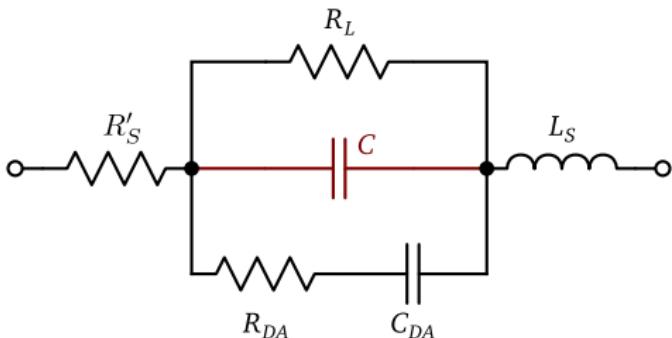


Deo 5

Model realnog kondenzatora

(Informativno)

Model realnog kondenzatora obuhvata, pored idealne kapacitivnosti C , parazitne komponente i efekte u dielektriku.



- R'_S i L_S su redna otpornost i induktivnost obloga i izvoda
- R_L predstavlja otpornost curenja dielektrika
- R_{DA} i C_{DA} predstavljaju efekat dielektrične apsorpcije

Dielektrična apsorpcija

Dielektrična apsorpcija je efekat koji se električno manifestuje kao pojava rezidualnog napona na kondenzatoru nakon ciklusa koji obuhvata punjenje i pražnjenje:

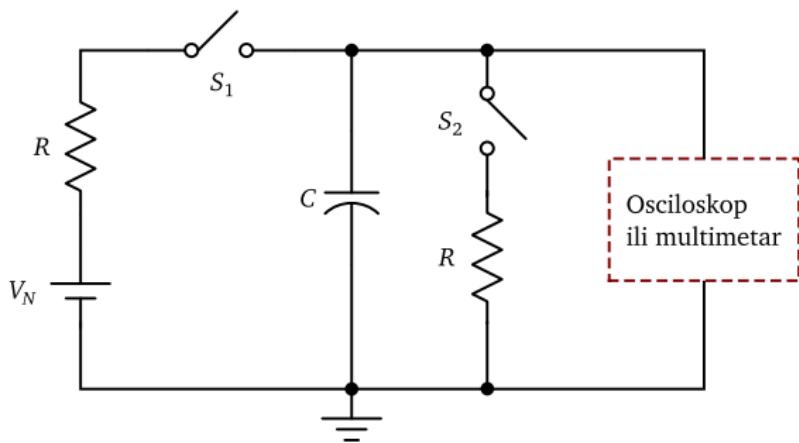
- ① Kondenzator se napuni na nominalni radni napon V_N ;
- ② Kondenzator se „u potpunosti“ isprazni;
- ③ Nakon prestanka pražnjenja, na neopterećenom kondenzatoru se pojavljuje napon V_{DA} , usled dielektrične apsorpcije.

$$DA = \frac{V_{DA}}{V_N} \cdot 100(\%)$$

Dielektrična apsorpcija nastaje usled nepotpune reorientacije polarnizovanih dipola u dielektriku nakon prestanka dejstva električnog polja između obloga kondenzatora.

Dielektrična apsorpcija

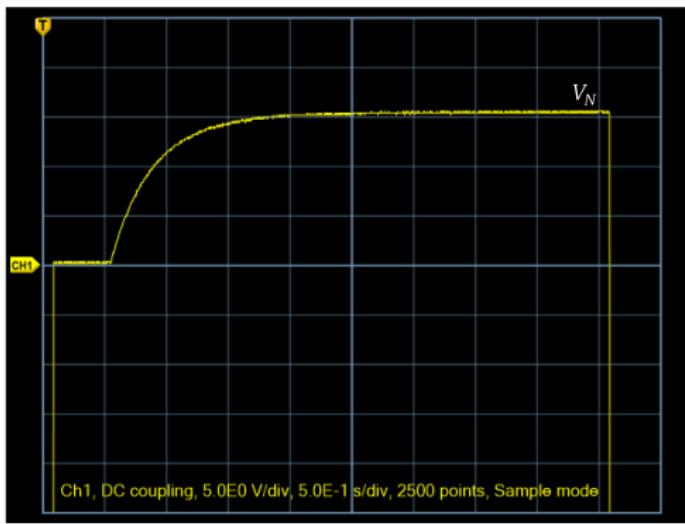
Kolo za ilustraciju efekta:



Primer: Aluminijumski elektrolitski kondenzator kapacitivnosti $2200 \mu\text{F}$,
 $R = 150 \Omega$, $V_N = 15 \text{ V}$.

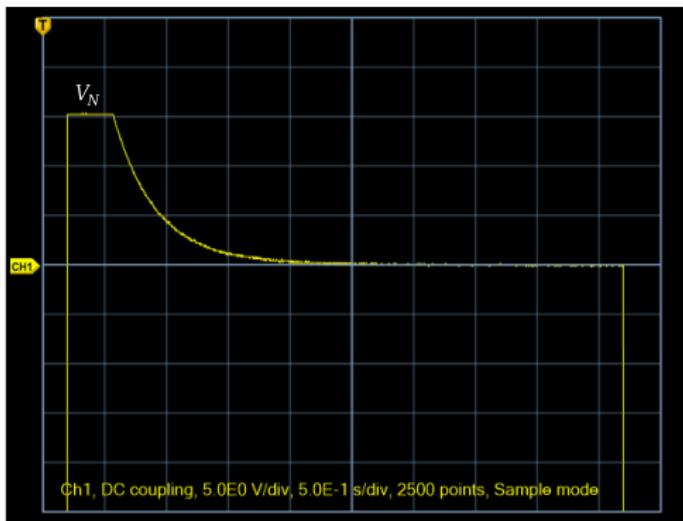
Dielektrična apsorpcija

Prekidač S_1 se zatvara, kondenzator se puni ($5\tau \simeq 1,65$ s) i ostavlja, npr. 15 min.



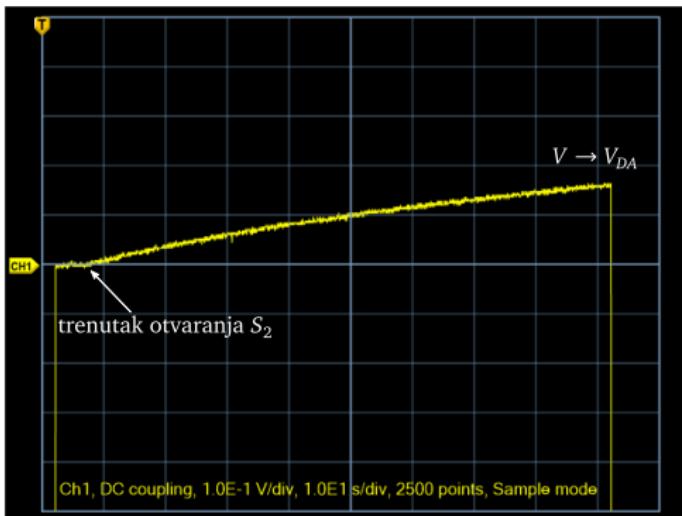
Dielektrična apsorpcija

Prekidač S_1 se otvara, a S_2 se zatvara, kondenzator se prazni. Prekidač S_2 ostaje zatvoren, npr. 10 s.



Dielektrična apsorpcija

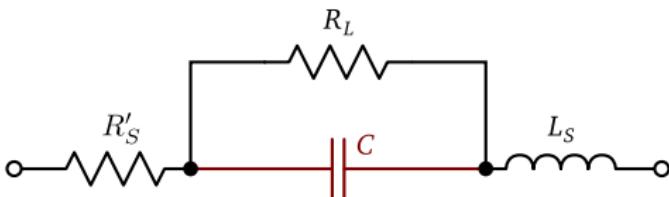
Prekidač S_2 se otvara, napon na kondenzatoru počinje da raste eksponencijalno, da bi se, posle nekog vremena, ustalio na vrednosti V_{DA} (u ovom slučaju će posle 15 min biti $V_{DA} \simeq 200 \text{ mV}$).



Dielektrična apsorpcija

Prilikom testiranja osciloskop ili multimetar moraju imati ulaznu otpornost $10\text{ M}\Omega$ ili veću. Proizvođači sprovode testove prema standardu MIL-PRF-19978. U zavisnosti od vrste dielektrika, vrednost dielektrične apsorpcije može biti od 0,005% (polipropilenski kondenzatori) do 15% (aluminijumski elektrolitski kondenzatori). Efekat dielektrične apsorpcije se u mnogim primenama može zanemariti, ali kod pojedinih (A/D konvertori) može bitno uticati na performanse kola.

Ako se efekat dielektrične apsorpcije zanemari:



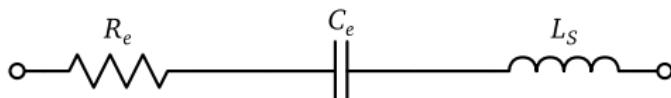
Impedansa kola je:

$$Z = Z_{R'_S} + (Z_{R_L} \parallel Z_C) + Z_{L_S}, \quad (22)$$

odnosno:

$$Z = R'_S + \left(R_L \parallel \frac{1}{j\omega C} \right) + j\omega L. \quad (23)$$

Ekvivalentno redno kolo modela:



$$R_e = R'_S + \frac{R_L}{1 + (\omega R_L C)^2} \quad (24)$$

$$C_e = C \left(1 + \frac{1}{(\omega R_L C)^2} \right) \quad (25)$$

Za sve učestanosti za koje je $(\omega R_L C)^2 \gg 1$ je $C_e \simeq C$. Otpornost $R_e \equiv R_S$ predstavlja ekvivalentnu serijsku otpornost (ESR).

Završne napomene

- Prikazane električne šeme ne uključuju sve detalje i mogu se koristiti *isključivo* u obrazovne svrhe.
- **Kondenzatori mogu ostati napunjeni duži vremenski period, čak i kada je uređaj isključen iz napajanja!!!**
- **Standardne kondenzatore ne priključivati na mrežni napon, između faze i nule, između faze i uzemljenja, ili između nule i uzemljenja!!!**
- Radi konciznosti, u ovoj prezentaciji nisu dati detalji vezani za izvođenje pojedinih izraza, kao i razmatranja vezana za fazore. Te informacije se mogu naći u materijalima iz predmeta Elektrotehnika I i II, kao i na Internetu.

Elektronske komponente

Kalemovi

Z. Prijić, D. Danković

Univerzitet u Nišu
Elektronski fakultet u Nišu

Predavanja 2022.



Sadržaj

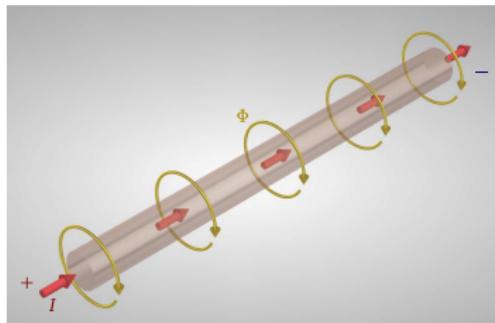
- 1 Kalem - Definicije
- 2 Odziv kalema na impulsnu pobudu
- 3 Odziv kalema na naizmenični signal
- 4 Kalem na visokim učestanostima
 - Otpornik na visokim učestanostima
 - Memristor (informativno)

Deo 1

Kalem - Definicije

Kalem - definicije

Promena struje kroz provodnik uspostavlja u njegovoj okolini magnetno polje¹. Magnetno polje se predstavlja koncentričnim linijama magnetnog fluksa Φ . Jedinica za magnetni fluks je Veber (Wb).

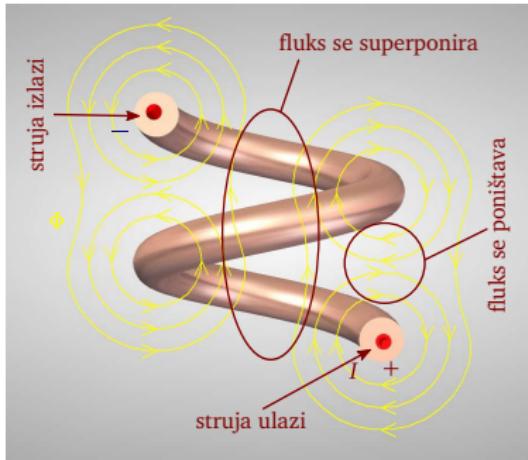


Smer magnetnog fluksa se određuje prema pravilu desne ruke: Kada palac desne ruke pokazuje smer struje, vrhovi prstiju savijenih oko provodnika pokazuju smer magnetnog fluksa.

¹Detaljnije o elektromagnetizmu u predmetu Elektrotehnika II.

Kalem - definicije

Osnovni princip

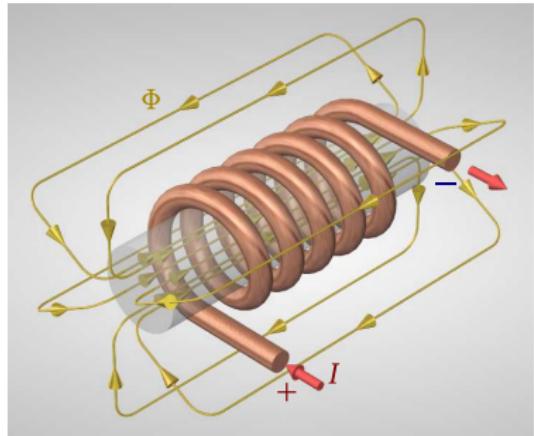
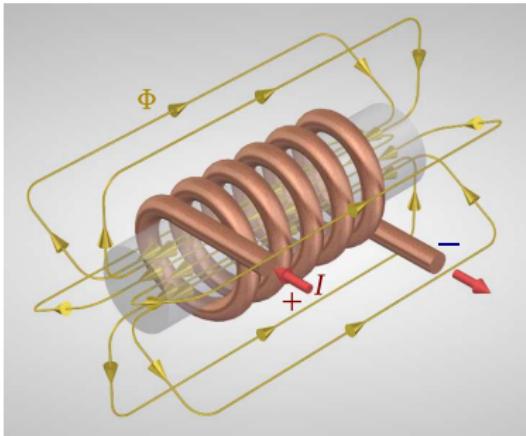


Namotavanjem provodnika formira se kalem. Fluks se poništava neposredno uz susedne navojke, a superponira unutar kalema. Superpozicijom se povećava gustina magnetnog fluksa unutar kalema.

Kalem vrši akumulaciju energije u elektromagnetsnom polju.

Kalem - definicije

Za dati smer struje, smer fluksa zavisi od smera namotaja kalema!



Smer fluksa **kroz kalem** se određuje prema pravilu desne ruke: kada vrhovi prstiju desne ruke savijeni oko kalema pokazuju smer struje, tada vrh palca pokazuje smer fluksa kroz kalem.

Kalem - definicije

Gustina fluksa i induktivnost

Gustina magnetnog fluksa B predstavlja broj linija fluksa Φ koje prolaze kroz površinu A :

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

Jedinica za gustinu magnetnog fluksa je Tesla ($T=Wb\ m^{-2}$).

Induktivnost kalema L predstavlja meru promene magnentog fluksa $d\Phi$ usled promene struje kroz kalem di_L :

$$L = N \frac{d\Phi}{di_L} , \quad (1)$$

pri čemu je N broj navojaka kalema. Jedinica za induktivnost je Hen-ri (H).

Kalem - definicije

Indukovani napon

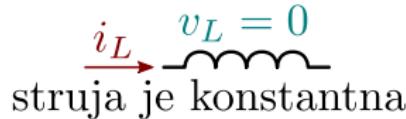
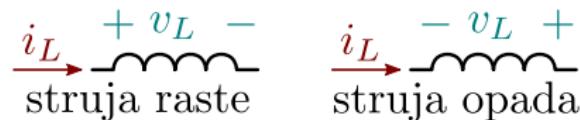
Promena magnetnog fluksa $d\Phi$ u vremenu t indukuje na krajevima kalema napon (Faradejev zakon):

$$v_L = N \frac{d\Phi}{dt} . \quad (2)$$

Kada promenu magnetnog fluksa izaziva struja koja protiče kroz kalem, polaritet indukovanih napona je takav da se suprotstavlja promeni struje!

Kalem - definicije

Indukovani napon!



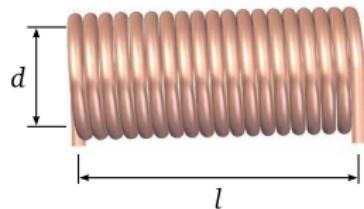
Iz (1) i (2) je:

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} . \quad (3)$$

Kalem

Izračunavanje induktivnosti

Induktivnost kalema se izračunava pomoću različitih aproksimativnih i empirijskih formula. Za kalem sa N navojaka motan bez koraka (između navojaka nema rastojanja) često se koristi formula:



$$L \simeq \frac{(0,1d)^2 N^2}{4,5d + 10l} \text{ } (\mu\text{H}), \quad (4)$$

pri čemu su d i l u mm. d je unutrašnji prečnik kalema, a formula važi za $l \geq d/2$.

Formula (4) se sreće i u obliku $L \simeq d^2 N^2 / (18d + 40l)$, pri čemu su d i l u inčima (1 inč = 2,54 cm). Takođe se koristi i formula $L \simeq FN^2 d$ (μH), pri čemu je $F = f(d/l)$ korekcioni faktor, a d je u inčima.

Kalem

Izračunavanje induktivnosti - primer

Za kalem koji ima 20 navojaka motanih bez koraka, unutrašnji prečnik 20 mm i dužinu 20 mm, induktivnost je:

$$L \simeq \frac{(0,1d)^2 N^2}{4,5d + 10l} = \frac{(0,1 \cdot 20)^2 \cdot 20^2}{4,5 \cdot 20 + 10 \cdot 20} \simeq 5,52 \mu\text{H}$$

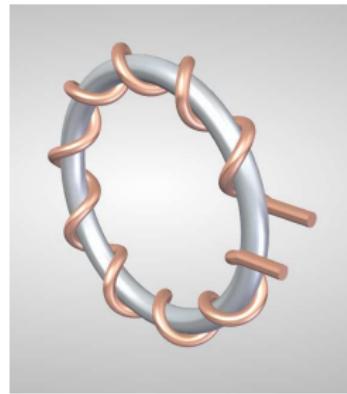
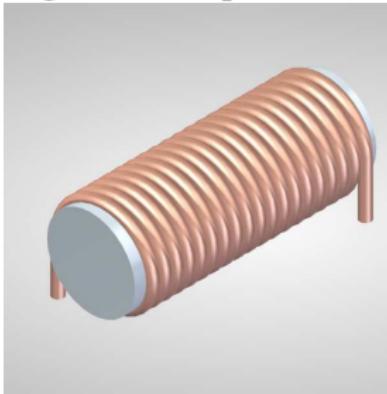
Prečnik žice kalema je:

$$d_w = \frac{l}{N} = \frac{20}{20} = 1 \text{ mm} .$$

Kalem

Jezgro

Induktivnost kalema se može povećati ubacivanjem jezgra od magnetnog materijala (gvožde, feriti, itd.). Jezgro povećava gustinu fluksa unutar kalema, pa time omogućava akumulaciju veće količine energije u magnetnom polju kalema. Jezgra mogu biti različitog oblika, npr. cilindrična i torusna².

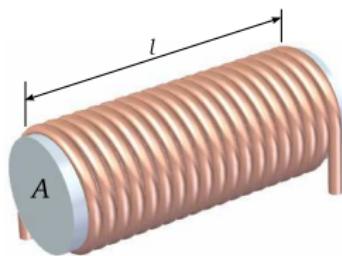


²Google: „inductor“ → Images (Slike).

Kalem

Izračunavanje induktivnosti

Induktivnost kalema sa jezgrom se izračunava pomoću različitih aproksimativnih i empirijskih formula. Za kalem sa cilindričnim jezgrom i N navojaka, motan bez koraka, se koristi formula:



$$L \simeq \frac{\mu A N^2}{l} \quad (\text{H}), \quad (5)$$

pri čemu su μ i A magnetna permeabilnost i poprečni presek jezgra, respektivno. A je u m^2 , a l je u m.

Magnetna permeabilnost materijala je $\mu = \mu_0 \mu_r$, pri čemu je $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$ magnetna permeabilnost vakuma, a μ_r je relativna magnetna permeabilnost jezgra.

Kalem

Izračunavanje induktivnosti - primer

Za kalem sa jezgrom koji ima 20 navojaka motanih bez koraka, dužinu 20 mm, prečnik jezgra 20 mm i relativnu magnetnu permeabilnost jezgra $\mu_r = 3$:

$$A = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi = \left(\frac{0,02}{2}\right)^2 \pi \simeq 3,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2,$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3 \simeq 3,77 \times 10^{-6} \text{ H m}^{-1},$$

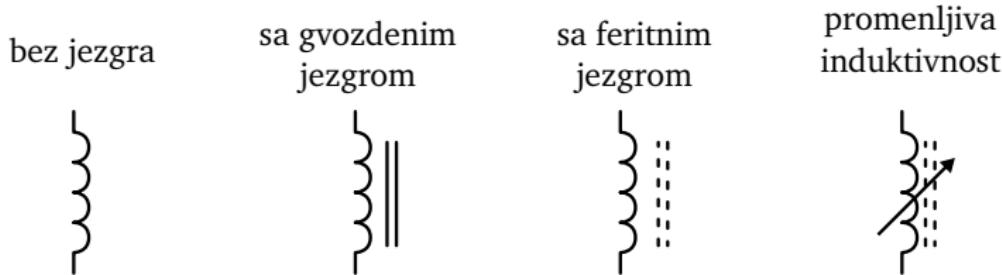
$$L \simeq \frac{\mu A N^2}{l} = \frac{3,77 \times 10^{-6} \cdot 3,14 \times 10^{-4} \cdot 20^2}{0,02} \simeq 23,67 \mu\text{H}.$$

Induktivnost kalema sa jezgrom uvek je veća od induktivnosti kalema istih dimenzija bez jezgra.

Kalem

Standardne vrednosti induktivnosti i električni simboli

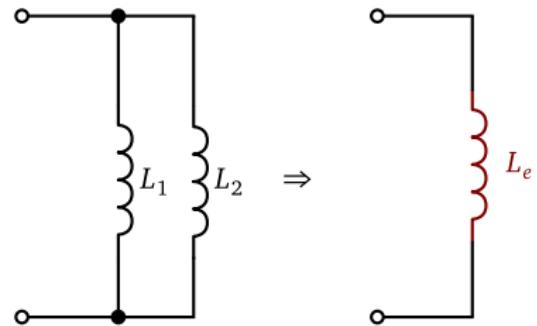
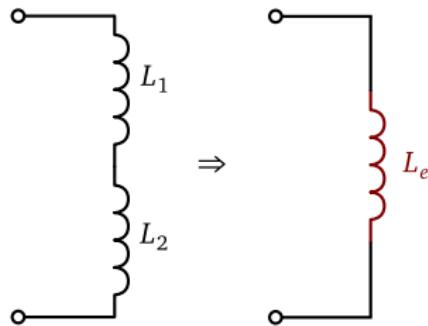
Standardne vrednosti induktivnosti su u opsegu 1 nH–100 mH. Vrednosti induktivnosti se, slično kao i vrednosti otpornosti, pojavljuju u nizovima. Na primer: 10, 12, 15, 18, 20, 22, 27, 33, 39, 47, 51, 56, 68, 82 μ H. Kalemovi takođe mogu biti i sa promenljivom induktivnošću.



Tipične vrednosti tolerancija induktivnosti su 5% i 10%.

Kalem

Redna i paralelna veza kalemova



- Za rednu vezu: $L_e = L_1 + L_2$;
- Za paralelnu vezu: $L_e = \frac{1}{\left(\frac{1}{L_1}\right) + \left(\frac{1}{L_2}\right)} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$.

Kalem

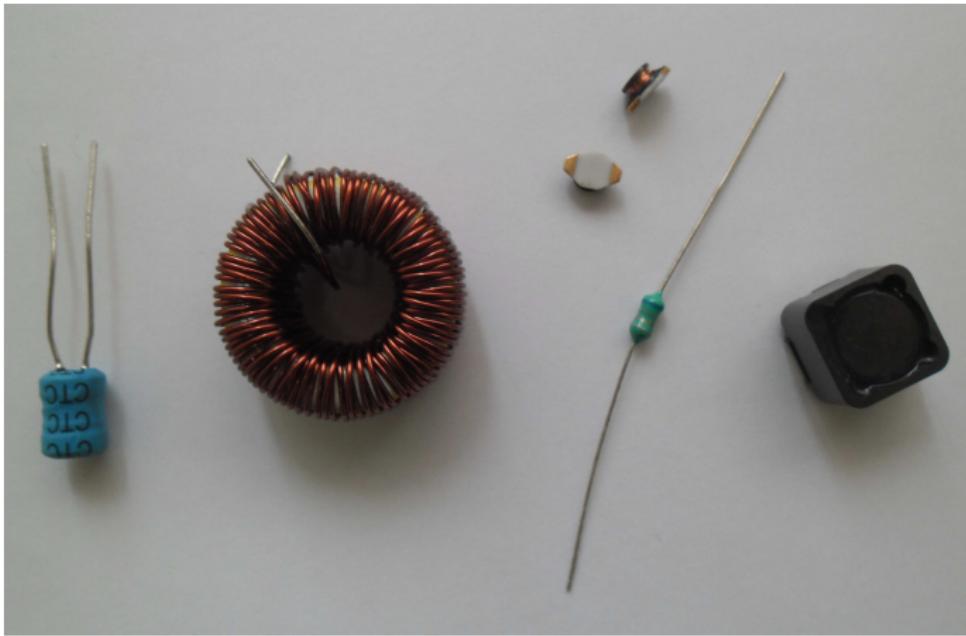
Nazivna struja (*Rated Current*)

Maksimalna struja koja može da prođe kroz kalem naziva se *nazivna* ili *nominalna struja*. Proizvođači u tehničkim specifikacijama naznавају да li je reč o jednosmernoj (DC) ili efektivnoj (rms) vrednosti naizmenične struje. Vrednost nominalne struje pre svega zavisi od vrste materijala od koje je napravljen kalem, kao i od geometrijskih parametara. Ako kroz kalem prođe struja veća od nominalne, na kalemu će doći do značajne disipacije snage, odnosno pregrevanja. Posledica po električno kolo može biti prekid.

Kalem - Definicije

Odziv kalema na impulsnu pobudu
Odziv kalema na naizmenični signal
Kalem na visokim učestanostima

Kalem

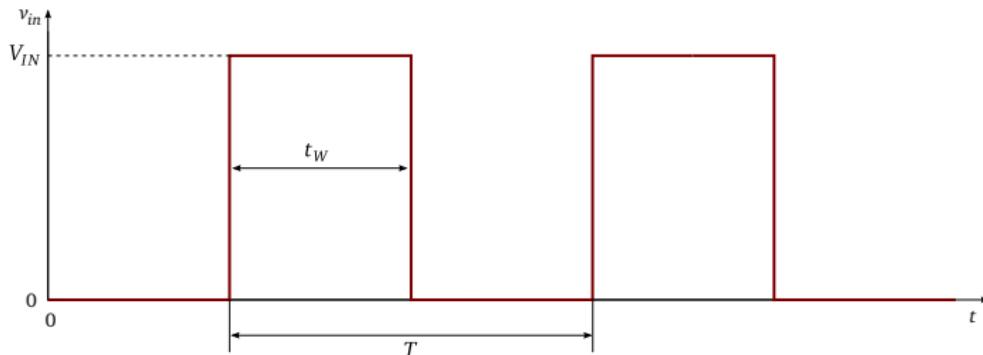


Deo 2

Odziv kalema na impulsnu pobudu

Impulsna pobuda

Povorka naponskih impulsa



Amplituda impulsa je V_{IN} . Učestanost impulsa je $f = 1/T$, pri čemu je T perioda impulsa. Faktor iskorišćenja periode (*Duty Cycle*) je:

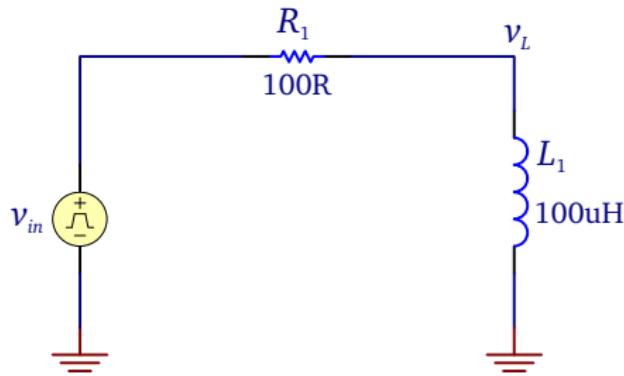
$$D = \frac{t_W}{T} \times 100 \quad (\%)$$

Impulsi se kontinualno ponavljaju sa periodom T .

Odziv kalema na impulsnu pobudu

Osnovno kolo

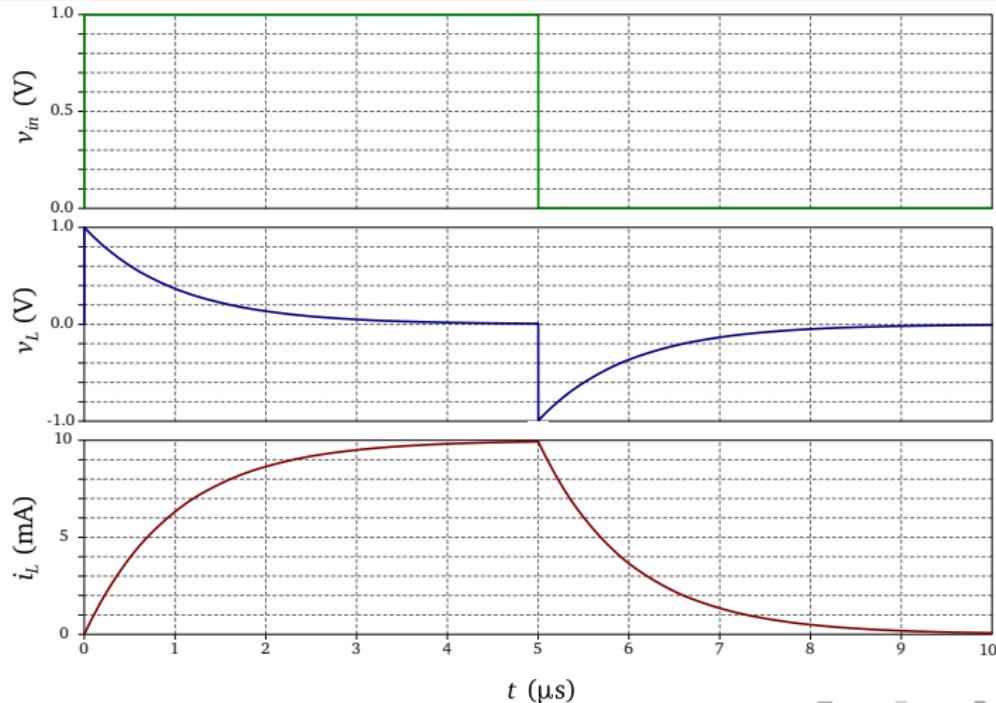
Na kalem $L_1 = 100 \mu\text{H}$ se, preko otpornika $R_1 = 100 \Omega$, dovodi povorka impulsa v_{in} .



Neka je amplituda impulsa $V_{IN} = 1 \text{ V}$, perioda $T = 10 \mu\text{s}$, a faktor iskorišćenja periode $D = 50\%$.

Odziv kalema na impulsnu pobudu

Pobudni napon v_{in} , napon na kalemu v_L i struja kroz kalem i_L



Odziv kalema na impulsnu pobudu

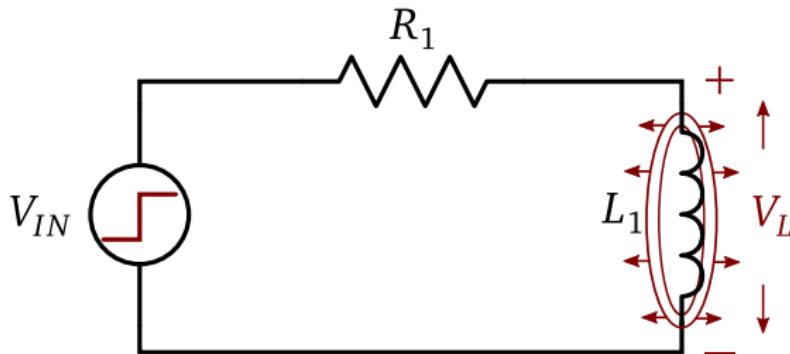
Mehanizam

- Neposredno po dovođenju impulsa, na krajevima kalema se indukuje napon $V_L = V_{IN}$, koji teži da se suprotstavi promeni struje kroz kalem - u prvom trenutku struja kroz kalem je jednaka nuli.
- Zbog kontinualnog prisustva impulsa, struja kroz kalem počinje da raste, a indukovani napon opada, sve dok ne postane jednak nuli. Struja kroz kalem postaje konstantna i njenu vrednost ograničava otpornik R_1 . Kalem se električno pojavljuje kao kratak spoj i kolo ulazi u stacionarno stanje.

Da bi kroz kalem protekla struja, na njegovim krajevima se prvo uspostavlja napon!

Odziv kalema na impulsnu pobudu

U trenutku dovođenja impulsa



Magnetno polje se „širi“ – kalem počinje da akumulira energiju. Indukovani napon V_L je takvog polariteta da teži da se suprotstavi protoku struje kroz kalem.

Odziv kalema na impulsnu pobudu

Vremenska konstanta

- Struja raste eksponencijalno, tako da je:

$$i_L = \frac{V_{IN}}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (6)$$

pri čemu je τ vremenska konstanta kalema:

$\tau = \frac{L_1}{R_1} \quad (s)$

(7)

- Kolo ulazi u stacionarno stanje nakon vremena $t \simeq 5\tau$. Tada je struja kroz kalem konstantna i iznosi $I_L = V_{IN}/R_1$ (u primeru $1\text{V}/100\Omega = 10\text{mA}$).

Odziv kalema na impulsnu pobudu

Energija

- U stacionarnom stanju kalem je akumulirao energiju W_L u magnetnom polju:

$$W_L = \frac{1}{2}L_1 I_L^2 \text{ (J)} . \quad (8)$$

Akumulirana energija je posledica rada koji je „uložio“ izvor da bi uspostavio konstantnu struju kroz kalem.

Odziv kalema na impulsnu pobudu

Mehanizam

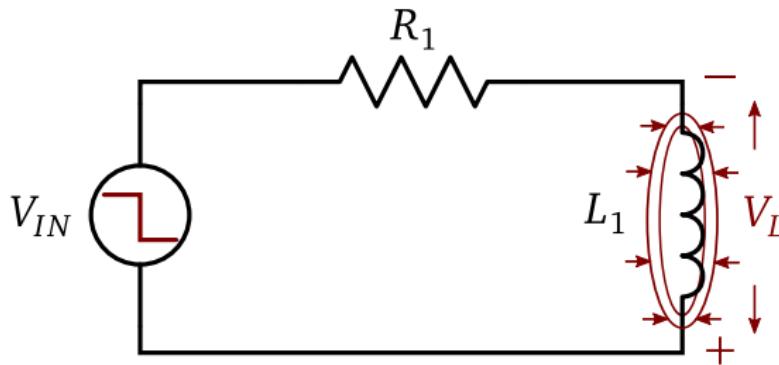
- Neposredno po prestanku dejstva impulsa, na krajevima kalem se indukuje napon $V_L = -V_{IN}$, koji teži da održi prethodno uspostavljeno stacionarno stanje - zbog toga je *negativan*!
- Zbog odsustva impulsa, struja kroz kalem počinje da opada, a indukovani napon raste³, sve dok ne postane jednak nuli. Struja kroz kalem postaje jednaka nuli i kolo ulazi u stacionarno stanje.

Napomena: indukcija negativnog napona na kalemu je posebno opasna jer može oštetiti izvor!

³Raste od vrednosti $-V_{IN}$ do nule.

Odziv kalema na impulsnu pobudu

U trenutku prestanka impulsa



Magnetno polje „kolabira“ – kalem počinje da oslobađa energiju. Indukovani napon V_L je takvog polariteta da teži da zadrži uspostavljeni protok struje kroz kalem.

Odziv kalema na impulsnu pobudu

Mehanizam

- Struja opada eksponencijalno, tako da je:

$$i_L = \frac{V_{IN}}{R_1} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (9)$$

- Kolo ulazi u stacionarno stanje nakon vremena $t \simeq 5\tau$. Tada je struja kroz kalem jednaka nuli. Napon na kalemu je takođe jednak nuli.

Odziv kalema na impulsnu pobudu

Primer

Za razmatrano kolo:

$$\tau = \frac{L_1}{R_1} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{100} = 1 \mu\text{s}$$

Kalem će biti u stacionarnom stanju za vreme:

$$t \simeq 5\tau = 5 \mu\text{s}$$

Ako je vreme trajanja impulsa t_W kraće od 5τ , kalem neće biti u stacionarnom stanju, već će struja kroz njega varirati.

Odziv kalema na impulsnu pobudu

Opšta formula

U opštem slučaju se trenutna vrednost struje kroz kalem može opisati pomoću izraza:

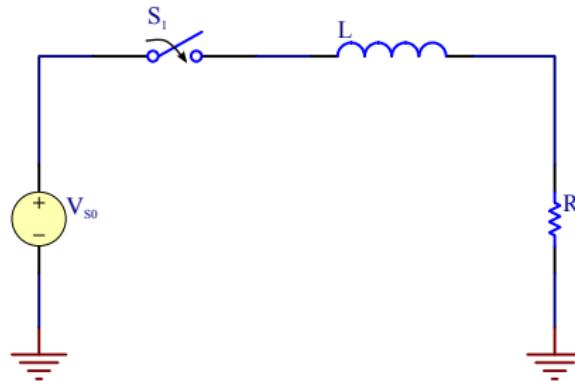
$$i_L = I_2 + (I_1 - I_2) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

gde su I_1 i I_2 početna i krajnja vrednost struje kroz kalem, respektivno.

Kalem sa impulsnom pobudom se koristi kod prekidačkih (*switch*) izvora napajanja - za računare, tablete, mobilne telefone, itd.

Odziv kalema na impulsnu pobudu

Izvor i prekidač

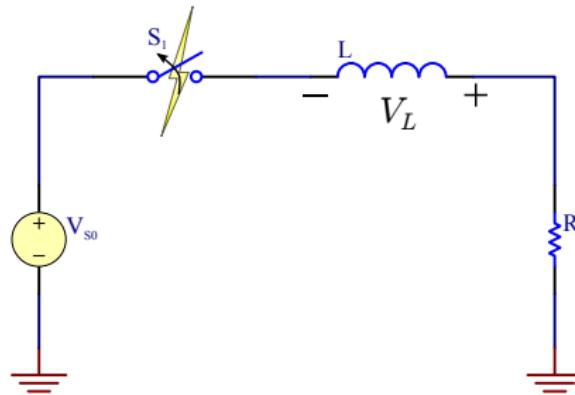


Nakon zatvaranja prekidača uspostavlja se stacionarno stanje, na isti način kao i u kolu sa impulsnom pobudom.

Odziv kalema na impulsnu pobudu

Izvor i prekidač - princip svećice

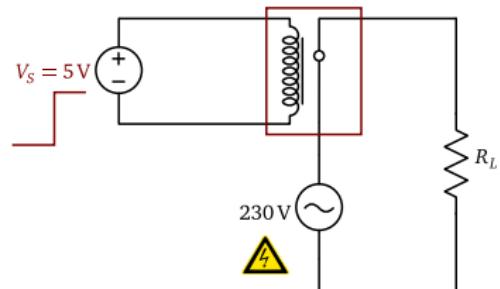
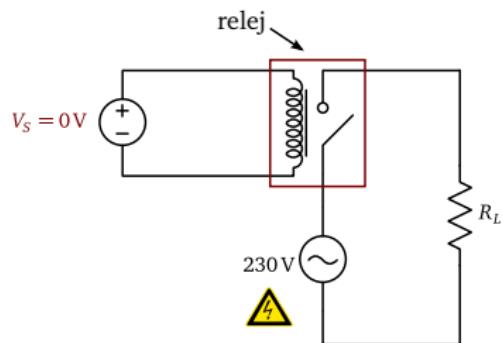
Prilikom otvaranja prekidača dolazi do nagle promene vrednosti struje u kolu od V_{S0}/R do nule. Na prekidaču se, usled velike razlike potencijala na njegovim krajevima, može pojaviti varničenje!



Odziv kalema na impulsnu pobudu

Relej (relay)

Relej (*relay*) je elektromehanička komponenta koja se sastoji od kalem i prekidača u jednom kućištu. Kada se kalem impulsno pobudi, prekidač se zatvara pod dejstvom elektromagnetskog polja kalemata.



Odziv kalema na impulsnu pobudu

Relej

Prekidač se otvara ukidanjem impulsne pobude kalema. Izvor V_S se štiti od negativnog napona na krajevima kalema diodom⁴.

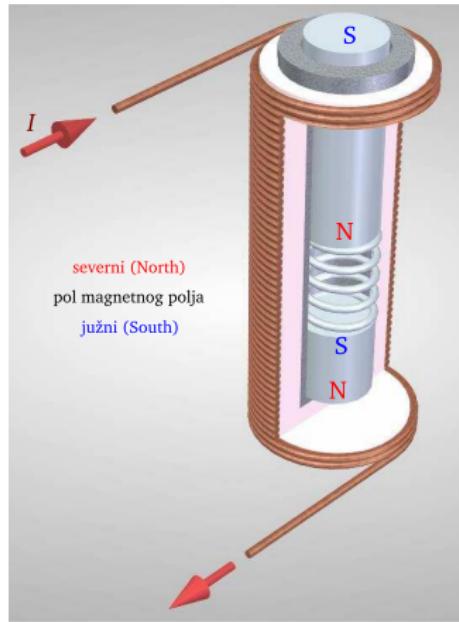
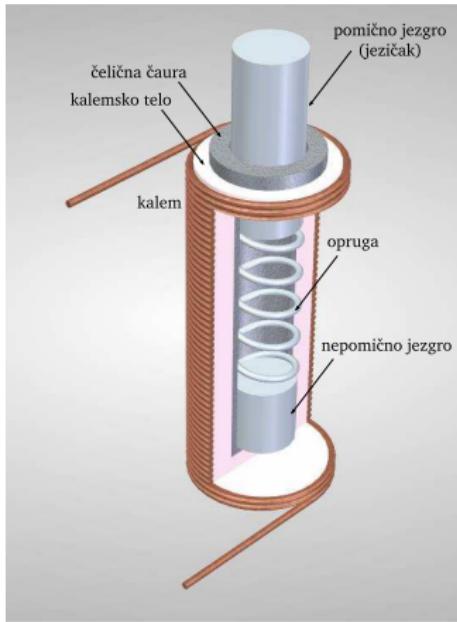


Releji mogu biti sa različitim brojem kontakata i položaja, slično kao prekidači.

⁴Videti predavanja o diodama.

Odziv kalema na impulsnu pobudu

Solenoid



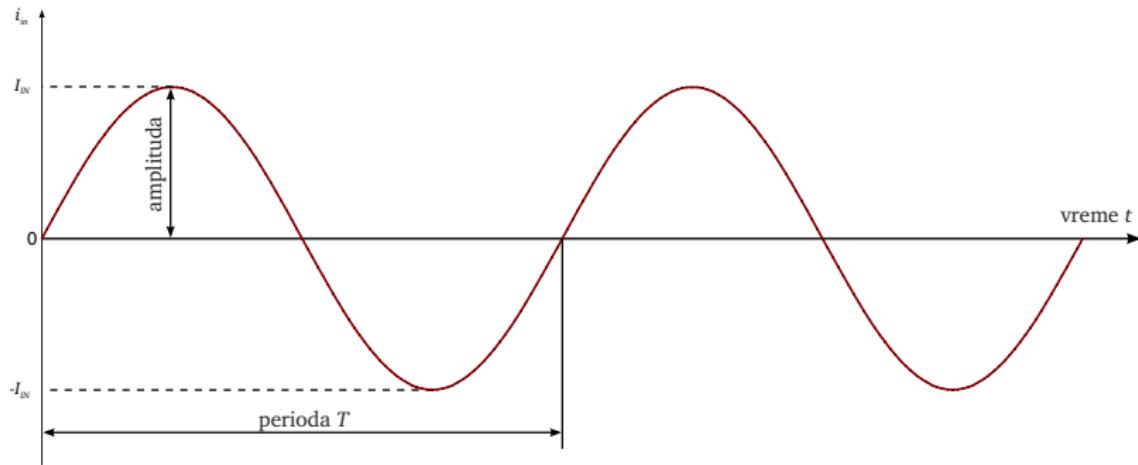
Primena: elektromagnetske brave, elektromehanički ventili.

Deo 3

Odziv kalema na naizmenični signal

Odziv kalema na naizmenični signal

Prostoperiodični naizmenični signal (sin) - AC



Signal se ponavlja sa periodom T . Učestanost signala je:

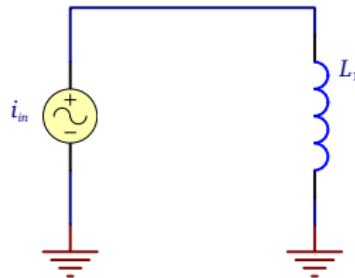
$$f = \frac{1}{T}$$

Odziv kalema na naizmenični signal

Idealni kalem sa naizmeničnom pobudom

Neka je, u idealnom slučaju, $R_1 = 0$. Na kalem se dovodi prostoperiodični naizmenični signal i_{in} :

$$i_{in} = I_{IN} \sin(\omega t)$$



Kružna učestanost ω je:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Odziv kalema na naizmenični signal

Trenutna vrednost struje

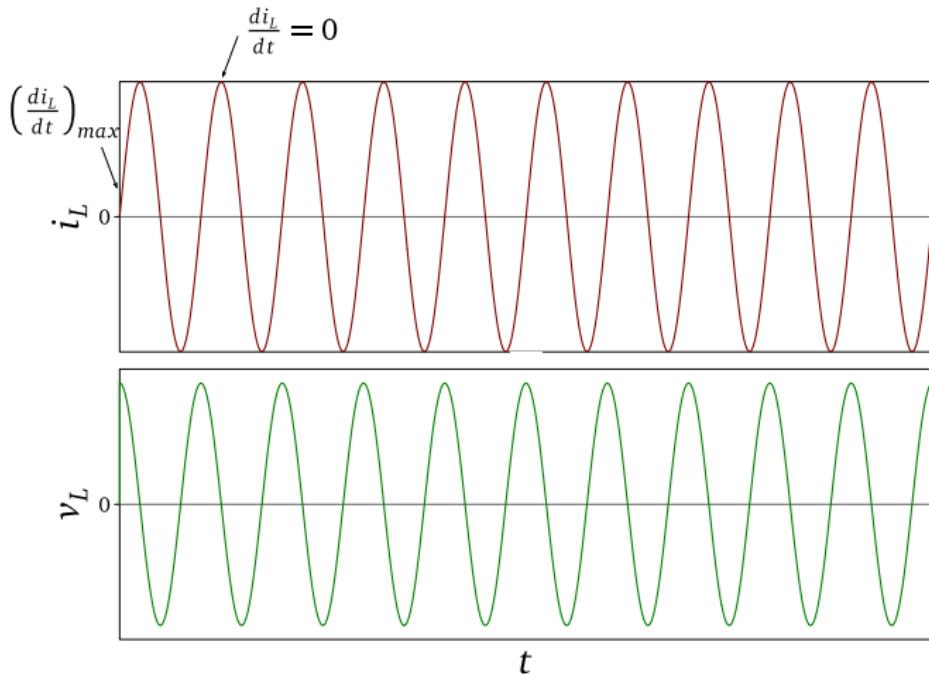
Prema definiciji je trenutna vrednost napona na kalemu:

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (11)$$

- napon na kalemu će biti maksimalan kada je promena struje u vremenu maksimalna
- napon na kalemu će biti jednak nuli kada je promena struje u vremenu jednaka nuli

Odziv kalema na naizmenični signal

Da bi kroz kalem protekla struja, na njegovim krajevima najpre mora da se pojavi napon!



Odziv kalema na naizmenični signal

Reaktansa kalema (*Inductive Reactance*)

- Ako se poveća učestanost, struja kroz kalem će se brže menjati u vremenu. Zbog toga će napon da poraste: $f \uparrow \Rightarrow \omega \uparrow \Rightarrow di_L/dt \uparrow \Rightarrow v_L \uparrow$
- Ako se poveća induktivnost, porašće i napon: $L \uparrow \Rightarrow v_L \uparrow$

Može se definisati mera otpora koji kalem pruža promeni struje kroz njega. Ona je, na osnovu prethodnih zaključaka, direktno proporcionalna učestanosti i induktivnosti. Naziva se *reaktansa kalema*:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (\Omega) \quad (12)$$

Odziv kalema na naizmenični signal

Reaktansa kalema - granični slučajevi

Kada je induktivnost fiksna:

- Za niske učestanosti reaktansa ima malu vrednost. Za jednostrani signal $\omega = 0 \Rightarrow X_L = 0$, pa se kalem u kolu pojavljuje kao kratak spoj.
- Za visoke učestanosti reaktansa ima veliku vrednost. Za naizmenični signal visoke učestanosti $\omega \rightarrow \infty \Rightarrow X_L \rightarrow \infty$, pa se kalem u kolu pojavljuje kao prekid!

Odziv kalema na naizmenični signal

Reaktansa kalema - primer

Neka je $L = 10 \mu\text{H}$.

- Za $f = 10 \text{ Hz}$ je:

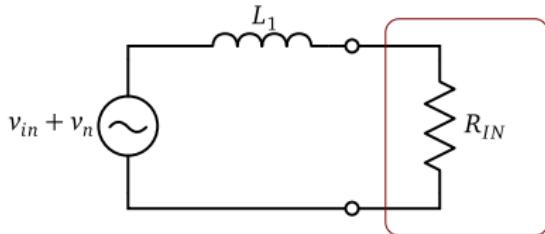
$$X_L = 2\pi f L \simeq 0,628 \text{ m}\Omega$$

- Za $f = 100 \text{ MHz}$ je:

$$X_L = 2\pi f L \simeq 6,28 \text{ k}\Omega$$

Odziv kalema na naizmenični signal

Kalem kao prigušnica - primer



Na ulaz kola koje je aproksimirano ulaznom otpornošću $R_{IN} = 100\Omega$ dovodi se *željeni* pobudni signal v_{in} učestanosti $f_{in} = 50\text{Hz}$.

Na *željeni* pobudni signal superponira se *neželjeni* signal (šum) v_n učestanosti $f_n = 200\text{kHz}$ i amplitude koja može biti približno jednaka amplitudi pobudnog signala v_{in} . Potrebno je minimizovati uticaj šuma na R_{IN} . U tu svrhu se može upotrebiti kalem L_1 , koji se u ovom kontekstu naziva *prigušnica (choke)*.

Odziv kalema na naizmenični signal

Kalem kao prigušnica - primer

U prvoj aproksimaciji se može uzeti da amplitudu šuma treba oslabiti za red veličine (10 puta) u odnosu na amplitudu pobudnog signala. To znači da reaktansa kalema na 200 kHz treba da bude 10 puta veća od otpornosti R_{IN} , tj. $X_L = 1 \text{ k}\Omega$. Potrebna induktivnost kalema je:

$$L_1 = \frac{X_L}{2\pi f_n} = \frac{1000}{2\pi \cdot 0,2 \times 10^6} \simeq 800 \mu\text{H},$$

pa se može uzeti najbliža standardna vrednost $820 \mu\text{H}$.

Na učestanosti pobudnog signala:

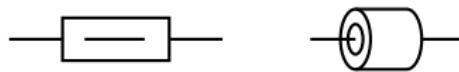
$$X_L = 2\pi f_{in} L = 2\pi \cdot 50 \cdot 820 \times 10^{-6} \simeq 0,26 \Omega,$$

pa kalem praktično nema uticaja.

Odziv kalema na naizmenični signal

Kalem kao prigušnica

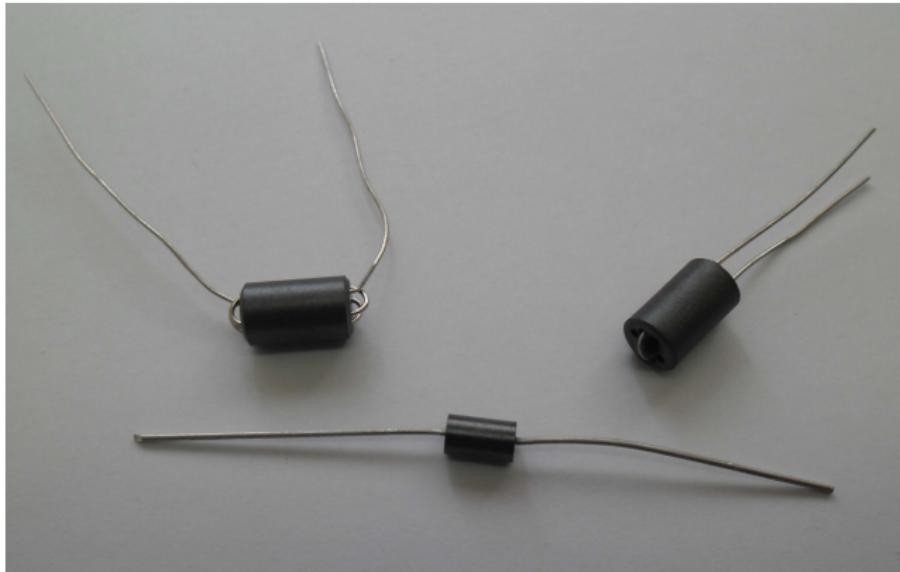
Kalem se upotrebljava kao prigušnica za uklanjanje različitih vrsta neželjenih signala koji se mogu pojaviti u kolima na linijama napajanja, linijama za prenos podataka, itd. Jezgra takvih kalemova su feritna, pa se nazivaju feritne prigušnice ili feritne perle (*ferrite bead*). U praksi se koriste različiti električni simboli:



Prigušnice se proizvode u through-hole i SMD varijantama, za različite učestanosti i nazivne struje.

Odziv kalema na naizmenični signal

Kalem kao prigušnica



Odziv kalema na naizmenični signal

Kalem kao prigušnica



Odziv kalema na naizmenični signal

Snaga

Idealni kalem ne disipira energiju. Tokom jedne poluperiode naizmeničnog signala energija se akumulira u kalemu u obliku magnetnog polja. Tokom druge poluperiode se akumulirana energija vraća izvoru. Teorijski gledano, nema gubitka energije na kalemu. Trenutna snaga je:

$$p_L = v_L i_L$$

Kada je trenutna snaga pozitivna, kalem akumulira energiju. Kada je trenutna snaga negativna, kalem vraća energiju.

Odziv kalema na naizmenični signal

Efektivna vrednost naizmeničnog signala (*Root Mean Square – rms*)

Efektivna vrednost naizmeničnog napona jednaka je vrednosti jednosmernog napona koji na istom opterećenju disipira istu snagu kao i taj naizmenični napon. Slično važi i za struju. Efektivna vrednost *sinusnog* signala predstavlja njegovu amplitudu podeljenu sa $\sqrt{2}$:

$$V_{eff} = \frac{V_{IN}}{\sqrt{2}}$$

$$I_{eff} = \frac{I_{IN}}{\sqrt{2}}$$

Odziv kalema na naizmenični signal

Reaktivna snaga (*Reactive Power*)

Kod kalema se definiše *reaktivna snaga*:

$$P_{Lr} = V_{Leff} I_{Leff} \text{ (VAR)} \quad (13)$$

Jedinica je VAR - Volt-Amper-Reaktivni. Za reaktivnu snagu važe relacije:

$$P_{Lr} = \frac{V_{Leff}^2}{X_L}$$

$$P_{Lr} = I_{Leff}^2 X_L$$

Odziv kalema na naizmenični signal

Impedansa (*Impedance*)

Oblik Omovog zakona za naizmenične signale:

$$Z = \frac{V}{I} \quad (14)$$

Veličina **Z** se naziva *impedansa* i predstavlja kompleksni broj.

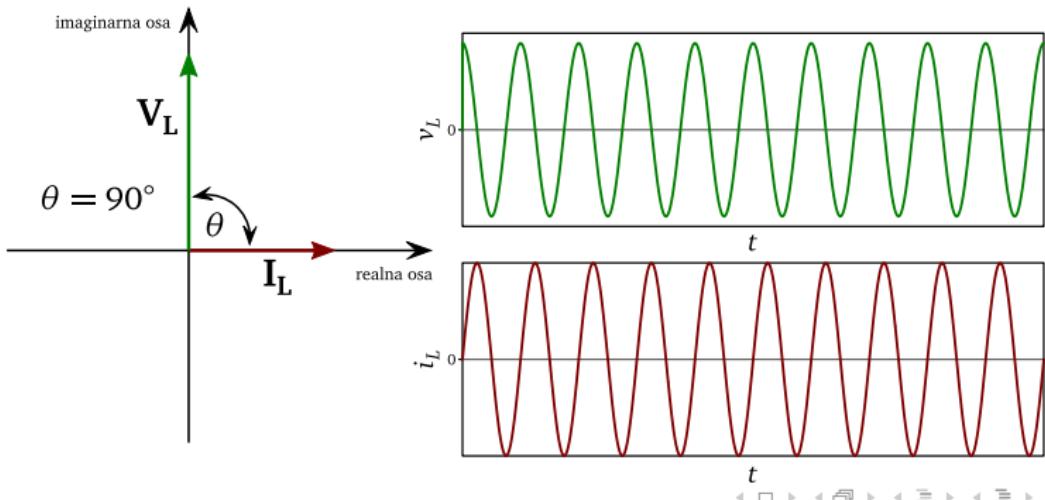
- Kod otpornika su struja i napon u fazi, pa je:

$$Z_R = \frac{V_R}{I_R} = \frac{V_R \angle 0^\circ}{I_R \angle 0^\circ} = \frac{V_R}{I_R} = R \quad (15)$$

Odziv kalema na naizmenični signal

Fazni pomeraj kod kalema

Kod kalema napon ne prati struju u vremenu, već u odnosu na nju ide ispred (prednjači). Drugim rečima, napon i struja su međusobno *fazno pomereni* i to tako da napon prednjači u odnosu na struju za 90° .



Odziv kalema na naizmenični signal

Impedansa kalema

Pošto napon prednjači u odnosu na struju za 90° , impedansa kalema je:

$$Z_L = \frac{V_L}{I_L} = \frac{V_L \angle 90^\circ}{I_L \angle 0^\circ} = \frac{V_L}{I_L} \angle (90^\circ - 0^\circ) = X_L \angle 90^\circ \quad (16)$$

U kompleksnom obliku je:

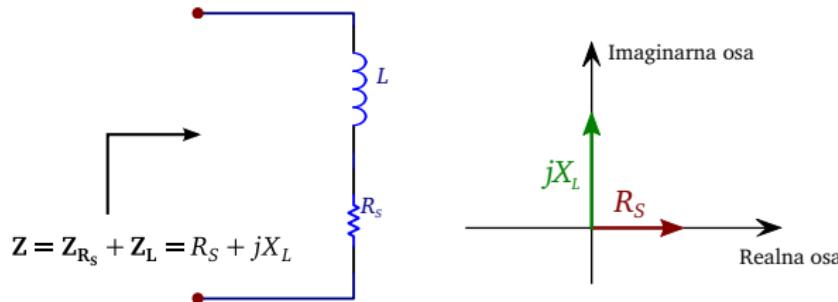
$$\boxed{Z_L = jX_L} \quad (17)$$

pri čemu je $X_L = \omega L = 2\pi fL$ reaktansa kalema definisana izrazom (12).

Odziv kalema na naizmenični signal

Ekvivalentna serijska otpornost (*Equivalent Series Resistance*)

Žica u namotajima realnog kalema reaguje na promenu struje, tako što disipira energiju u vidu topote. To znači da, za razliku od idealnog, kod realnog kalema postoji gubitak energije. Ovaj gubitak se može električno opisati uvođenjem otpornika na red sa idealnim kalemom.

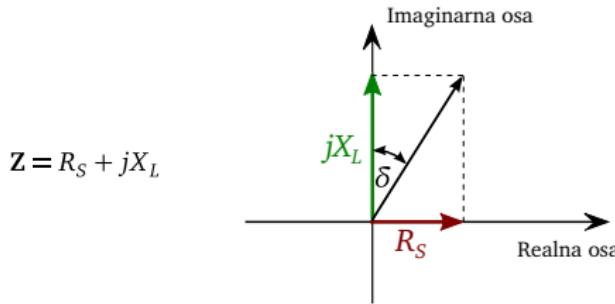


Otpornost R_s se naziva *ekvivalentna serijska otpornost (ESR)*.

Odziv kalema na naizmenični signal

Gubici u namotajima

Gubici u namotajima se mogu opisati preko *tangensa ugla gubitaka* δ :



$$\tan \delta = \frac{R_S}{X_L} = \frac{R_S}{\omega L} \quad (18)$$

Tangens ugla gubitaka naziva se još i faktor disipacije (*Dissipation factor*) i označava sa *DF*.

Odziv kalema na naizmenični signal

Faktor dobrote (*Quality Factor*)

Recipročna vrednost tangensa ugla gubitaka naziva se *faktor dobrote kalema Q*:

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{\omega L}{R_S} \quad (19)$$

Faktor dobrote je u stvari odnos reaktivne snage idealnog kalema i snage disipirane na njegovim namotajima:

$$Q = \frac{P_{Lr}}{P_{R_S}} = \frac{I_{Lef}^2 X_L}{I_{Lef}^2 R_S} = \frac{X_L}{R_S} = \frac{\omega L}{R_S} \quad (20)$$

Odziv kalema na naizmenični signal

Faktor dobrote

Šta pokazuje faktor dobrote?

- Da bi kalem mogao da radi na višim učestanostima, potrebno je da ima što manju ekvivalentnu serijsku otpornost.

Proizvođači u tehničkim specifikacijama obično daju minimalnu i tipičnu vrednost faktora dobrote, pri određenim učestanostima (npr. za 100 MHz).

Kalem - Definicije

Odziv kalema na impulsnu pobudu

Odziv kalema na naizmenični signal

Kalem na visokim učestanostima

Otpornik na visokim učestanostima

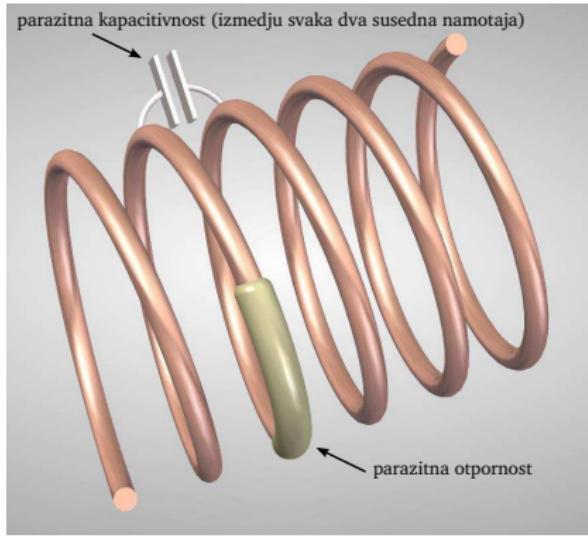
Memristor (informativno)

Deo 4

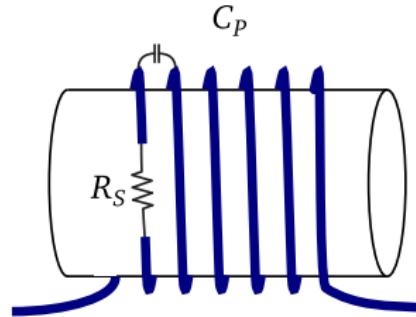
Kalem na visokim učestanostima

Kalem na visokim učestanostima

Parazitna kapacitivnost



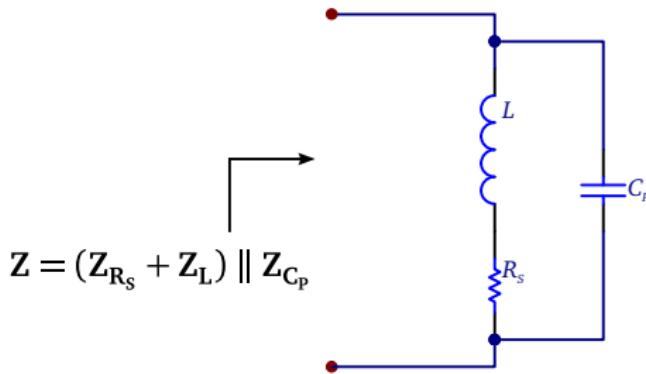
Zbog postojanja navojaka, realni kalem poseduje i parazitnu kapacitivnost.



Kalem na visokim učestanostima

Parazitna kapacitivnost (*Stray Capacitance*)

Ova kapacitivnost se može električno opisati uvođenjem kondenzatora paralelno sa idealnim kalemom i njegovom ekvivalentnom serijskom otpornošću.



Kalem na visokim učestanostima

Impedansa kola

Reaktansa i impedansa⁵ kondenzatora su:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (\Omega) \quad (21)$$

$$Z_C = -jX_C \quad (22)$$

pri čemu je C kapacitivnost kondenzatora.

Impedansa kola je:

$$Z = (Z_{R_s} + Z_L) \parallel Z_{C_p} \quad (23)$$

⁵Detaljnije u delu o kondenzatorima.

Kalem na visokim učestanostima

Impedansa kola

Ekvivalentna serijska otpornost ima značajan uticaj na impedansu samo na niskim učestanostima. Već na srednjim učestanostima se može smatrati da je $Z_L \gg Z_{R_s}$, pa se kolo svodi na paralelnu vezu kalema i kondenzatora:

$$Z \simeq Z_L \parallel Z_{C_p} \quad (24)$$

- Reaktansa kondenzatora opada sa porastom učestanosti:

$$X_C \sim \frac{1}{f}$$

- Reaktansa kalema raste sa porastom učestanosti:

$$X_L \sim f$$

Kalem na visokim učestanostima

Rezonantna učestanost

Na rezonantnoj učestanosti f_r će reaktanse kondenzatora i kalema biti jednake:

$$X_L = X_{C_p} \implies 2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C_p},$$

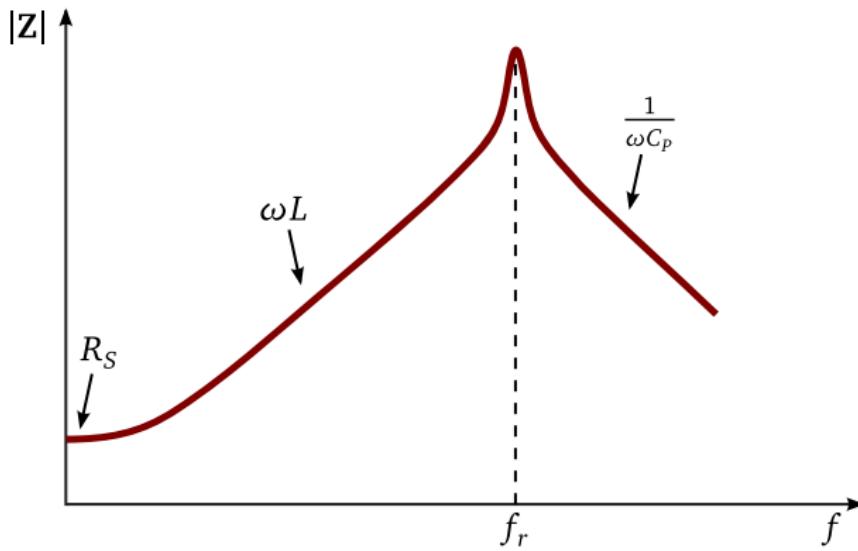
odakle je:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_p}} \quad (25)$$

Ova učestanost se naziva *sopstvena rezonantna učestanost (self resonant frequency)*.

Kalem na visokim učestanostima

Zavisnost impedanse realnog kalema od učestanosti



Kalem na visokim učestanostima

Impedansa

- Do sopstvene rezonantne učestanosti dominira induktivna priroda impedanse.
- Iznad sopstvene rezonantne učestanosti dominira kapacitivna priroda impedanse.

Kod kalema sa jezgrom, ekvivalentno kolo uključuje i otpornost koja predstavlja gubitke u jezgru. U zavisnosti od jezgra, ova otpornost se može pojaviti redno ili paralelno.

Kalem na visokim učestanostima

Otpornost pri niskim učestanostima

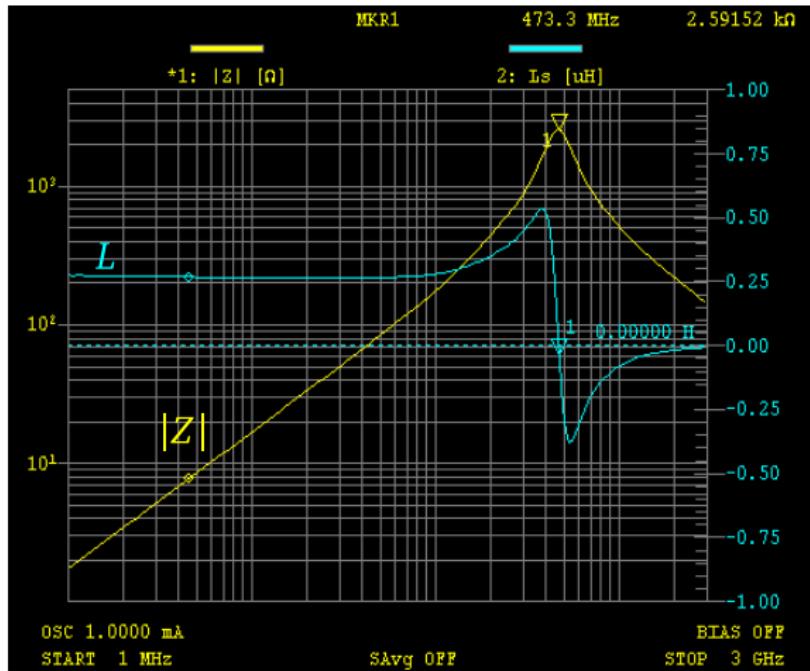
U tehničkim specifikacijama kalema proizvođači daju parametar „DC Resistance“, što predstavlja otpornost pri niskim učestanostima. Za kalemove male induktivnosti ova otpornost je relativno mala i uglavnom se može zanemariti. Međutim, kod kalemova većih induktivnosti ona može biti desetine, pa i stotine Ω !

Izvod iz tehničke specifikacije jedne vrste kalemova:

Inductance at 1 kHz (μH)	DC Resistance (Ω)
10	0,011
100	0,090
1000	0,844
10000	7,3
100000	90

Kalem na visokim učestanostima

Eksperimentalne karakteristike realnog kalema



Kalem na visokim učestanostima

- Iznad sopstvene rezonantne učestanosti impedansa kalema počinje da opada!
- Sopstvena rezonantna učestanost implicitno zavisi od konstrukcije kalema.
- Područje primene određenog tipa kalema ograničeno je sopstvenom rezonantnom učestanošću.

Kalem na visokim učestanostima

1 Kalem - Definicije

2 Odziv kalema na impulsnu pobudu

3 Odziv kalema na naizmenični signal

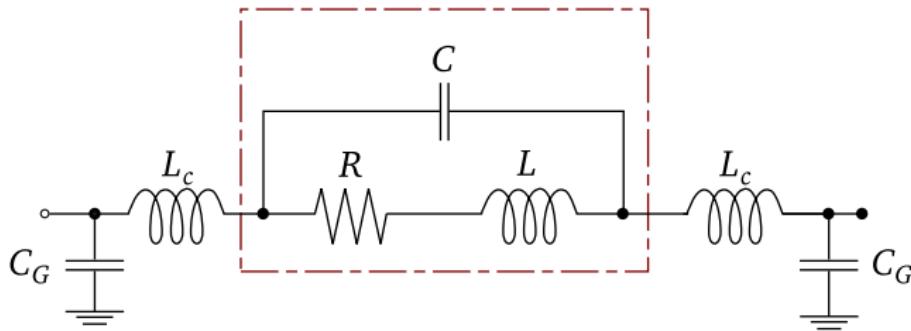
4 Kalem na visokim učestanostima

- Otpornik na visokim učestanostima

- Memristor (informativno)

Otpornik na visokim učestanostima

Ekvivalentno električno kolo otpornika R sa parazitnim komponentama.

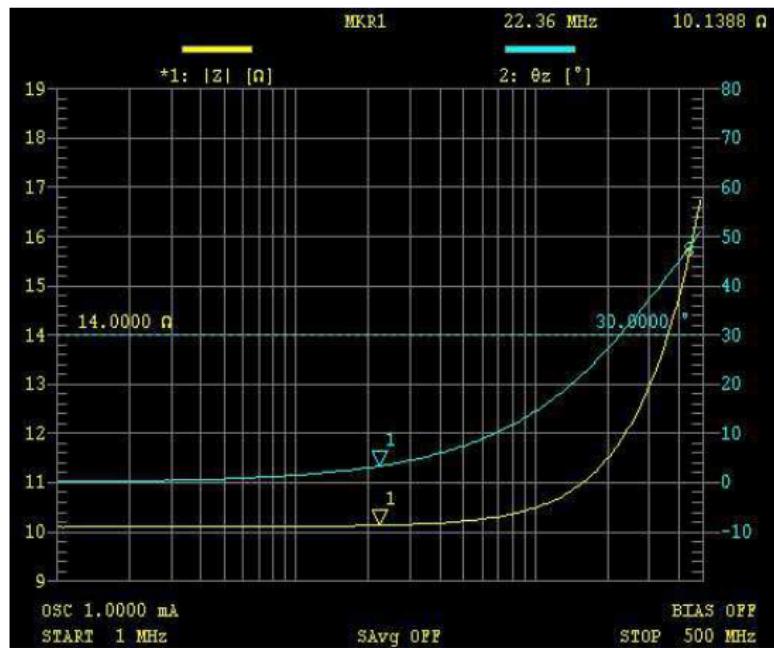


- za male otpornosti je $L \gg L_C$, pa se L_C zanemaruje.
- za veće otpornosti je $L \ll L_C$, pa se L zanemaruje.

Napomena: Za detalje videti predavanja o otpornicima.

Otpornik na visokim učestanostima

Primer: $R = 10 \Omega \pm 5\%$, $L_C \simeq 0$, $C_G = 0$.



Impedansa raste sa po-
rastom učestanosti.

Otpornik na visokim učestanostima

Primer: $R = 1 \text{ k}\Omega \pm 5\%$, $L \approx 0$, $C_G = 0$.



Impedansa opada sa porastom učestanosti.

Kalem na visokim učestanostima

1 Kalem - Definicije

2 Odziv kalema na impulsnu pobudu

3 Odziv kalema na naizmenični signal

4 Kalem na visokim učestanostima

• Otpornik na visokim učestanostima

• Memristor (informativno)

Fundamantalne električne veličine

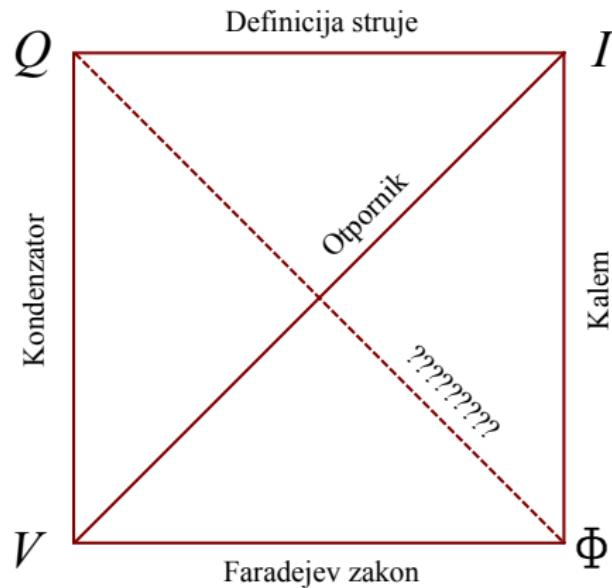
- Naelektrisanje (Q)
- Struja (I)
- Napon (V)
- Magnetni fluks (Φ)

Veze između:

- ① nalektrisanja i struje: $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$
- ② napona i magnetnog fluksa: $V \sim -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ (Faradejev zakon)
- ③ napona i struje: $R = \frac{U}{I}$
- ④ nalektrisanja i napona: $C = \frac{Q}{U}$
- ⑤ fluksa i struje: $L = \frac{\Phi}{I}$

Dijagram veza

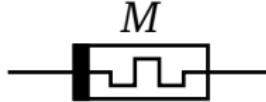
Nedostaje veza između nanelektrisanja i magnetnog fluksa



Četvrti element

R, C, L, M

Memristor je element koji povezuje nakelektrisanje i magnentni fluks:

$$M \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta q}$$


Praktično, memristor je komponenta čija otpornost treba da se menjala srazmerno količini nakelektrisanja koja kroz nju prolazi. Kad nakelektrisanje prestane da prolazi, otpornost komponente treba da ostane „zapamćena“. Memristor je teorijski opisan 1971., a eksperimentalno realizovan 2008. godine i to korišćenjem nanotehnologije.

Poređenja radi, kondenzator, otpornik i kalem su otkriveni 1745., 1827. i 1831. godine, respektivno.

Završne napomene

- Prikazane električne šeme ne uključuju sve detalje i mogu se koristiti *isključivo* u obrazovne svrhe.
- Radi konciznosti, u ovoj prezentaciji nisu dati detalji vezani za izvođenje pojedinih izraza. Te informacije se mogu naći u materijalima iz predmeta Elektrotehnika I i II.
- Predstavljanje kompleksnih brojeva je uprošćeno u odnosu na formalne definicije, koje se mogu pronaći u literaturi iz premeta Matematika I.

Završne napomene

Preporučena literatura

- ① S. Ristić, *RLC komponente*, Prosveta, Niš, 2005. (ISBN: 86-7455-653-1)
- ② S. Ristić, *Elektronske komponente*, Skripta, Elektronski fakultet, Niš, 2011. (<http://mikroelektronika.elfak.ni.ac.rs>→literatura)
- ③ T. Floyd, *Principles of Electric Circuits, Conventional Current Version*, 9th Ed., Pearson, 2013. (ISBN: 978-1292025667)
- ④ T. Kuphaldt, *Lessons in Electric Circuits, Volume II – AC*, 2014. (<http://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits>)

Elektronske komponente

Transformatori

Z. Prijić, D. Danković

Univerzitet u Nišu
Elektronski fakultet u Nišu

Predavanja 2021.



Sadržaj

1 Međusobna induktivnost

2 Transformator

- Snaga
- Reflektovano opterećenje
- Pravidna snaga
- Realni transformator

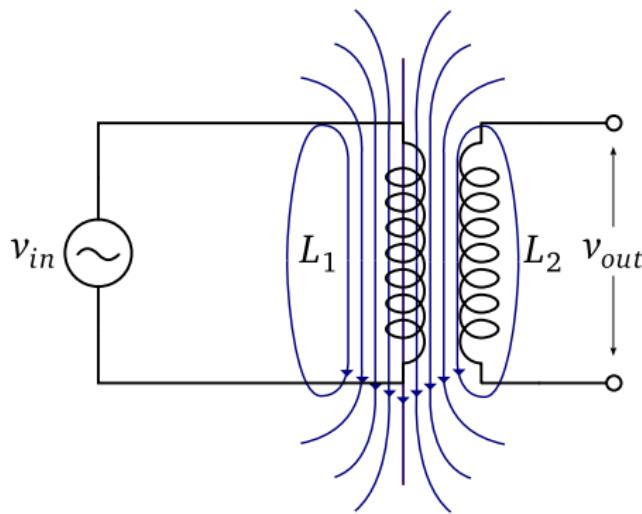
3 Primene

Deo 1

Međusobna induktivnost

Međusobna induktivnost

Spregnuti kalemovi



Kalem L_2 se nalazi u magnetnom polju kalemata L_1 . Kalemovi su magnetno spregnuti.

Međusobna induktivnost

Koeficijent sprege

Pod dejstvom naizmeničnog napona v_{in} , kroz kalem L_1 protiče struja, usled čega se u njegovoj okolini pojavljuje magnetno polje. Magnetno polje kalema L_1 prolazi kroz kalem L_2 . Zbog toga se na krajevima kalema L_2 indukuje napon v_{out} . Promena napona v_{out} u vremenu pratiti promene napona v_{in} . Amplituda napona v_{out} zavisi od *međusobne induktivnosti* (*mutual inductance*) dva kalema. Međusobna induktivnost se kvantifikuje preko *koeficijenta sprege*:

$$k = \frac{\phi_{12}}{\phi_1},$$

gde je ϕ_{12} deo magnetnog fluksa kojim kalem L_1 „zahvata“ kalem L_2 , a ϕ_1 ukupni magnentni fluks kalema L_1 .

Međusobna induktivnost

Međusobna induktivnost je:

$$L_M = k \sqrt{L_1 L_2} . \quad (1)$$

Primer: Kalem $L_1 = 12 \mu\text{H}$ zahvata kalem $L_2 = 16 \mu\text{H}$ polovinom svog ukupnog magnentog fluksa. Koeficijent sprege je:

$$k = \frac{\phi_{12}}{\phi_1} = \frac{\frac{1}{2}\phi_1}{\phi_1} = 0,5 ,$$

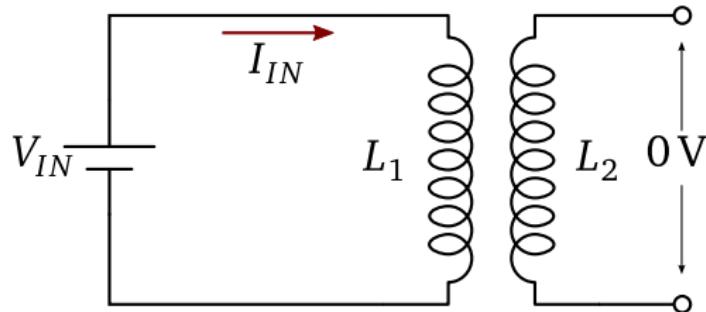
pa je međusobna induktivnost:

$$L_M = k \sqrt{L_1 L_2} = 0,5 \sqrt{12 \cdot 16} = 0,5 \sqrt{192} \simeq 0,5 \cdot 14 = 7 \mu\text{H} .$$

Međusobna induktivnost

Spregnuti kalemovi - jednosmerni signal

Ako je ulazni signal jednosmerni, na krajevima kalema L_2 se neće pojaviti indukovani napon, jer u kolu kalema L_1 nema **promene** struje, koja je nužna za promenu magnetnog fluksa.

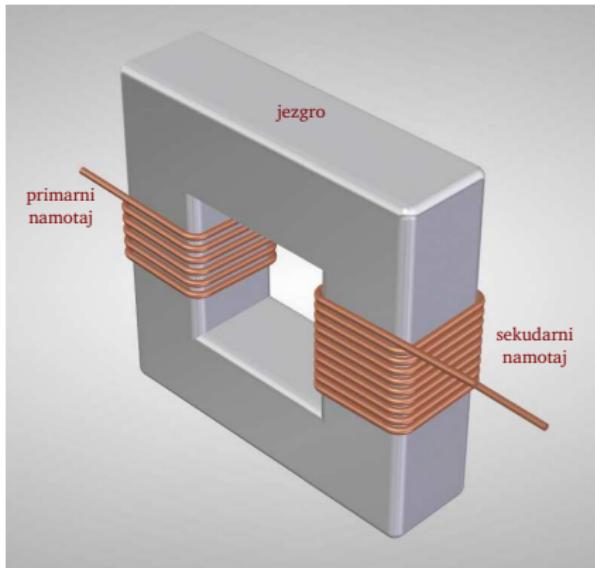


Deo 2

Transformator

Transformator

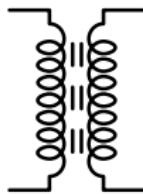
Definicija



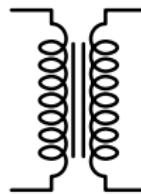
Transformator je elektronska komponenta koja se sastoji od dva kalema spregnuta na jednom magnetnom jezgru (*core*). Kalem na koji se dovođi ulazni signal naziva se primarni namotaj (*primar*), a kalem na kome se pojavljuje izlazni signal naziva se sekundarni namotaj (*sekundar*).

Transformator

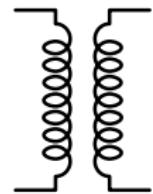
Električni simboli



(a)



(b)



(c)

- (a) transformator sa feritnim jezgrom
- (b) transformator sa gvozdenim jezgrom
- (c) transformator sa vazdušnim jezgrom (bez jezgra)

Transformator

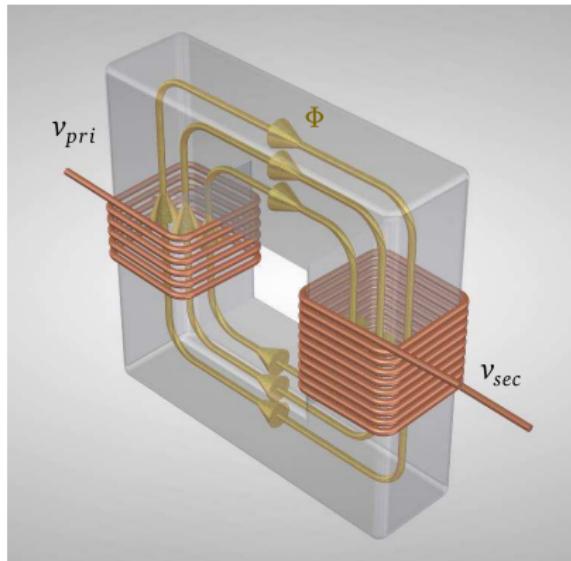
Svrha magnetnog jezgra

S obzirom da je od magnetnog materijala, jezgro predstavlja medijum u kome se koncentriše magnetni fluks. Zbog toga se koeficijent sprege između kalemoveva povećava. Jezgra mogu biti različitog oblika¹ (pravougaona, cilindrična, torusna, itd.). Proizvode se od različitih magnetnih materijala, a tipično se koriste feriti i gvozdjeni limovi. Jezgro takođe predstavlja mehanički nosač za kalemove. Jezgro i namotaji su međusobno električno izolovani (žica je lakirana). Kod transformatora bez jezgra kalemovi su namotani na nosač od nemagnetnog materijala, unutar koga je vazdušni džep (npr. šuplji cilindar).

¹Google: „transformer cores“ → Images (Slike).

Transformator

Ilustracija koncentracije linija magnetnog fluksa Φ u jezgru



Pod dejstvom napona v_{pri} na ulazu, naizmenična struja u primaru stvara fluks koji prolazi kroz sekundar, indukujući napon v_{sec} na izlazu. Ulaz i izlaz su galvanski odvojeni (ne-ma direktnе električne sprege između dva dela kola).

Transformator

Odnos transformacije

Odnos vrednosti² izlaznog i ulaznog napona određen je odnosom broja navojaka u primaru i sekundaru:

$$\frac{V_{sec}}{V_{pri}} = \frac{N_{sec}}{N_{pri}} = n . \quad (2)$$

U zavisnosti od vrednosti **odnosa transformacije** (*turns ratio*) n , transformator može da:

- povećava vrednost ulaznog napona (*step-up*), $n > 1$;
- smanjuje vrednost ulaznog napona (*step-down*), $n < 1$;
- zadržava vrednost ulaznog napona, $n = 1$.

²Kod transformatora se podrazumevaju *efektivne* vrednosti signala.

Transformator

Primer

Na ulaz transformatora odnosa transformacije $n = 0,2$ dovodi se sinusni signal efektivne vrednosti $V_{pri} = 230\text{V}$. Efektivna vrednost izlaznog signala će biti:

$$V_{sec} = nV_{pri} = 0,2 \cdot 230 = 46\text{V}.$$

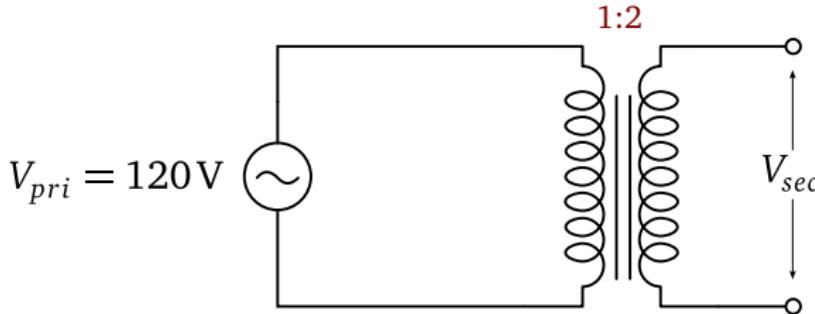
Pošto je:

$$N_{pri} = \frac{N_{sec}}{n} = \frac{N_{sec}}{0,2} = 5N_{sec},$$

to će primar imati 5 puta više navojaka od sekundara (uobičajeno se piše 5:1 kod simbola transformatora).

Transformator

Primer



Sekundar ima dva puta više navojaka od primara:

$$\frac{N_{sec}}{N_{pri}} = n = 2 ,$$

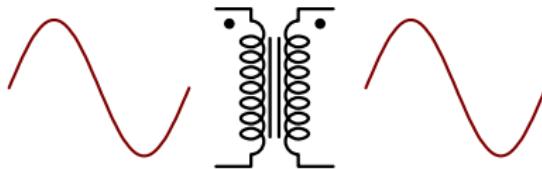
pa je:

$$V_{sec} = nV_{pri} = 2 \cdot 120 = 240\text{V} .$$

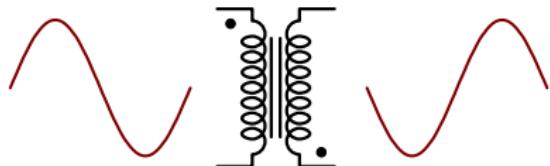
Transformator

Faza signala

Ulagani i izlagni signal mogu biti u fazi ili protivfazi, što zavisi od smera motanja primara i sekundara³, odnosno smera fluksa kroz jezgro. Oznake polariteta su tačke pored kalemova (*phase dots*).



Ulagani i izlagni signal su u fazi.



Ulagani i izlagni signal su u protivfazi.

³Videti predavanja o kalemovima.

Transformator

1 Međusobna induktivnost

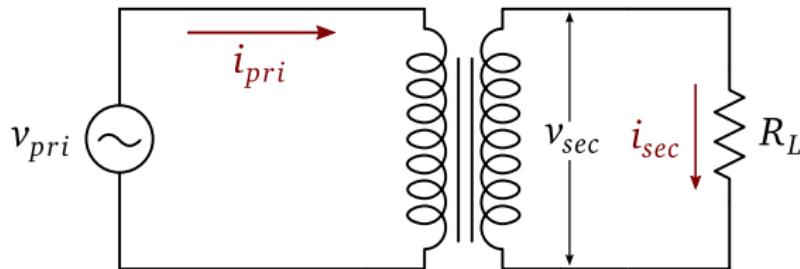
2 Transformator

- Snaga
- Reflektovano opterećenje
- Prividna snaga
- Realni transformator

3 Primene

Snaga na transformatoru

Struje



Odnos efektivnih vrednosti struja kroz sekundar i primar:

$$\frac{I_{sec}}{I_{pri}} = \frac{1}{n} . \quad (3)$$

$$V_{sec} < V_{pri} \implies I_{sec} > I_{pri}$$

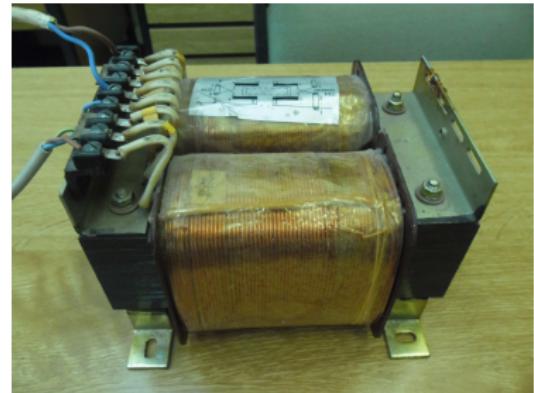
$$V_{sec} > V_{pri} \implies I_{sec} < I_{pri}$$

Snaga na transformatoru

Snaga

$$P_{pri} = V_{pri}I_{pri}$$

$$P_{sec} = V_{sec}I_{sec} = nV_{pri} \cdot \frac{1}{n}I_{pri}$$



$$P_{pri} = P_{sec} \tag{4}$$

Snaga koja se razvija na opterećenju u sekundaru jednaka je snazi koju ulaze izvor u primaru.

Transformator

1 Međusobna induktivnost

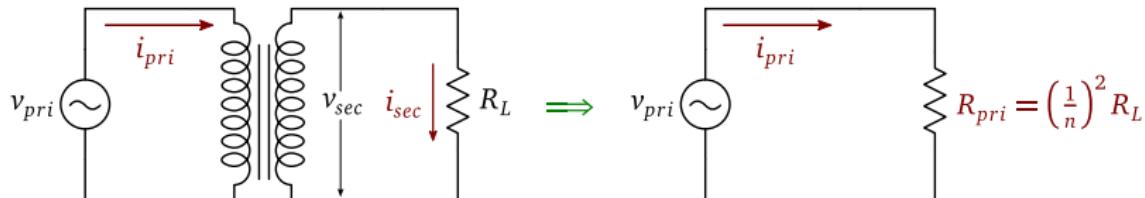
2 Transformator

- Snaga
- Reflektovano opterećenje
- Prividna snaga
- Realni transformator

3 Primene

Reflektovano opterećenje

Definicija



$$\frac{R_{pri}}{R_L} = \frac{\frac{V_{pri}}{I_{pri}}}{\frac{V_{sec}}{I_{sec}}} = \frac{V_{pri}}{V_{sec}} \cdot \frac{I_{sec}}{I_{pri}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n} = \left(\frac{1}{n}\right)^2$$

Ekvivalentni otpornik R_{pri} naziva se reflektovano opterećenje (*reflected load*).

Reflektovano opterećenje

Primer

Primer: Transformator ima odnos transformacije $n = 0,25$. Otpornost opterećenja je $R_L = 100 \Omega$.

Reflektovano opterećenje je:

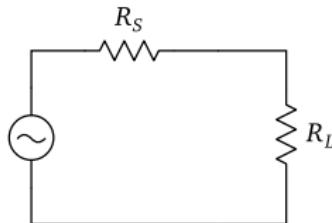
$$R_{pri} = \left(\frac{1}{n}\right)^2 R_L = \left(\frac{1}{0,25}\right)^2 \cdot 100 = 1600 \Omega.$$

Izvor u primaru „vidi“ opterećenje u sekundaru kao otpornost od 1600Ω .

Reflektovano opterećenje

Primena

Prilagođenje impedanse između izvora i potrošača:



Izvor čija je otpornost R_S maksimalnu snagu predaje opterećenju (potrošaču) otpornosti R_L kada je:

$$R_S = R_L . \quad (5)$$

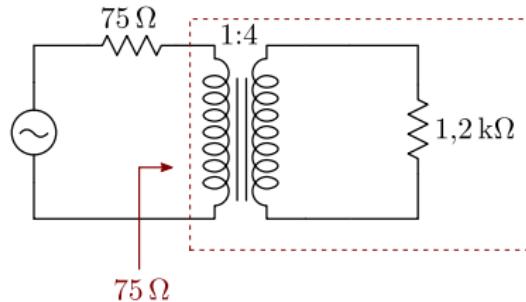
Pomoću transformatora je moguće izvršiti prilagođenje impedanse između izvora i potrošača.

Reflektovano opterećenje

Primena

Primer: $R_S = 75 \Omega$ (TV koaksijalni kabl), $R_L = 1,2 \text{ k}\Omega$. Potreban je transformator sa odnosom transformacije:

$$n = \sqrt{\frac{R_L}{R_{pri}}} = \sqrt{\frac{1200}{75}} = 4.$$



Primer: $R_S = 1,6 \text{ k}\Omega$ (pojačavač), $R_L = 4 \Omega$ (zvučnik) $\Rightarrow n = \sqrt{4/1600} = 1/20$

Transformator

1 Međusobna induktivnost

2 Transformator

- Snaga
- Reflektovano opterećenje
- **Prividna snaga**
- Realni transformator

3 Primene

Prividna snaga

VA - volt–amper

Snaga transformatora se standardno izražava u volt–amperima (VA) i naziva se prividna snaga (*apparent power*). Kada je opterećenje transformatora isključivo kapacitivno ili induktivno⁴, tada primar ne predaje snagu sekundaru. Zbog toga izražavanje snage u W nema smisla!

Transformatori se deklarišu za:

- ulazni napon (napon na primaru);
- učestanost napona;
- izlazni napon (napon na sekundaru);
- prividnu snagu;

⁴Na idealnom kondenzatoru i kalemu nema gubitka energije.

Prividna snaga

Primer

Transformator je deklarisan za $V_{pri} = 230\text{ V}$, $f = 50\text{ Hz}$, $V_{sec} = 36\text{ V}$ i prividnu snagu $P_{app} = 8\text{ VA}$. Struja kroz opterećenje:

$$I_L \equiv I_{sec} = \frac{P_{app}}{V_{sec}} = \frac{8}{36} = 222\text{ mA}.$$

Struja kroz primar:

$$I_{pri} = \frac{P_{app}}{V_{pri}} = \frac{8}{230} \simeq 35\text{ mA}.$$

Odnos transformacije:

$$n = \frac{V_{sec}}{V_{pri}} = \frac{36}{230} = 0,156.$$

Transformator

1 Međusobna induktivnost

2 Transformator

- Snaga
- Reflektovano opterećenje
- Prividna snaga
- Realni transformator

3 Primene

Realni transformator

Gubici i efikasnost

Kod realnog transformatora se pojavljuju gubici u prenosu snage usled:

- „curenja“ magnetnog fluksa van jezgra,
- osobina materijala jezgra zbog kojih se ono zagreva,
- parazitnih otpornosti namotaja primara i sekundara,
- parazitnih kapacitivnosti namotaja primara i sekundara.

Efikasnost (koeficijent korisnog dejstva) transformatora:

$$\eta = \frac{P_{sec}}{P_{pri}} \cdot 100 (\%) . \quad (6)$$

Realni transformator

Efikasnost

Primer: Izlazna snaga transformatora opterećenog otpornikom je 100 W. Snaga gubitaka u transformatoru je $P_{loss} = 4,5 \text{ W}$.

Ulagana snaga je:

$$P_{pri} = P_{sec} + P_{loss} = 100 + 4,5 = 104,5 \text{ W}.$$

Efikasnost je:

$$\eta = \frac{P_{sec}}{P_{pri}} \cdot 100 = \frac{100}{104,5} \cdot 100 = 95,7\%. \quad (7)$$

Efikasnost kod transformatora je od 70% do preko 95%, u zavisnosti od konstrukcije i materijala jezgra i namotaja.

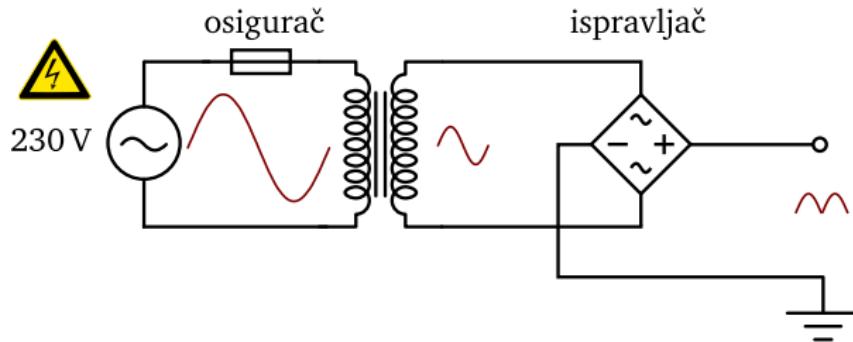
Deo 3

Primene

Primene

Mrežni transformator

Koristi za spuštanje mrežnog napona 230 V, na različite vrednosti (tipično 6 V do 18 V).

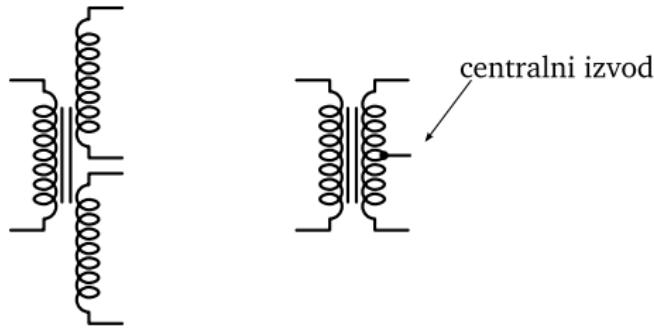


Napon na sekundaru se vodi na ispravljač⁵, koji negativnu poluperiodu pretvara u pozitivnu.

⁵Za detalje o ispravljaču videti predavanja o diodama.

Primene

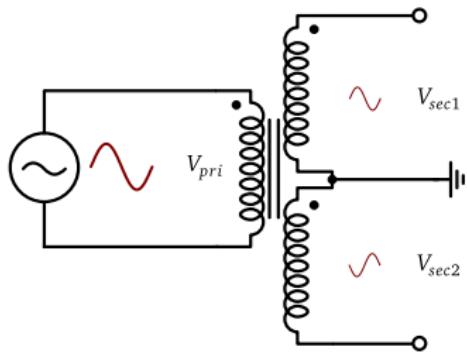
Mrežni transformator sa dva sekundara



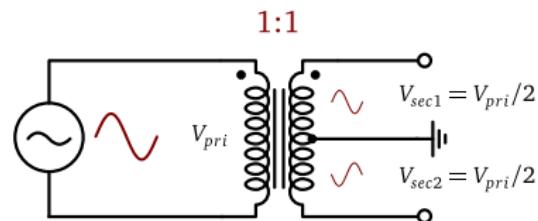
Sekundari mogu biti odvojeni ili na sekundaru može postojati centralni izvod (*center-tapped*). Centralni izvod deli sekundar na dva jednakaka dela. Postoje i varijante sa više sekundara, kao i sa više primara. Ovakvim konfiguracijama povećava se fleksibilnost primene.

Primene

Podjela napona



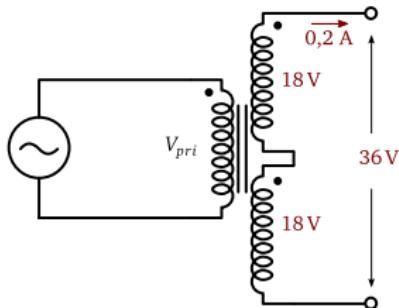
ako su sekundari identični
onda je $V_{sec1} = V_{sec2}$



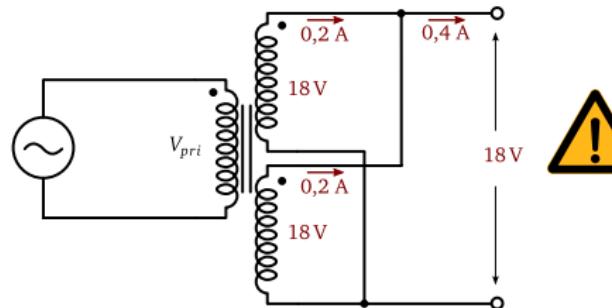
Izlazni naponi su u protivfazi.

Primene

Redna i paralelna veza sekundara



(a)



(b)

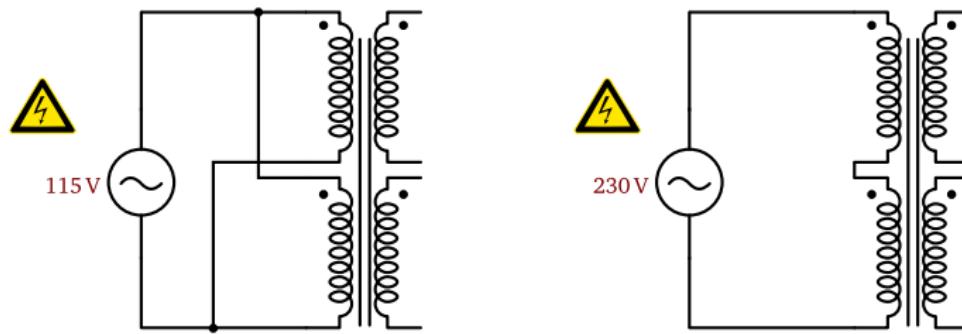
- Ⓐ udvostručava napon jednog sekundara;
- Ⓑ udvostručava struju jednog sekundara (*naponi i polaritet namotaja oba sekundara moraju biti isti!!!*);

Pre povezivanja neophodno je eksperimentalno proveriti polaritet namotaja.

Primene

Univerzalni mrežni transformator

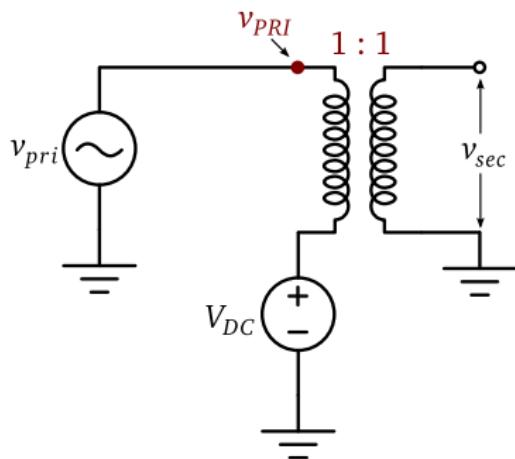
U nekim zemljama je mrežni napon 115 V/60 Hz. Transformator sa dva primara se može konfigurisati tako da zadovoljava oba standarda.



Transformator mora biti deklarisan od strane proizvođača za ovu vrstu primene!

Primene

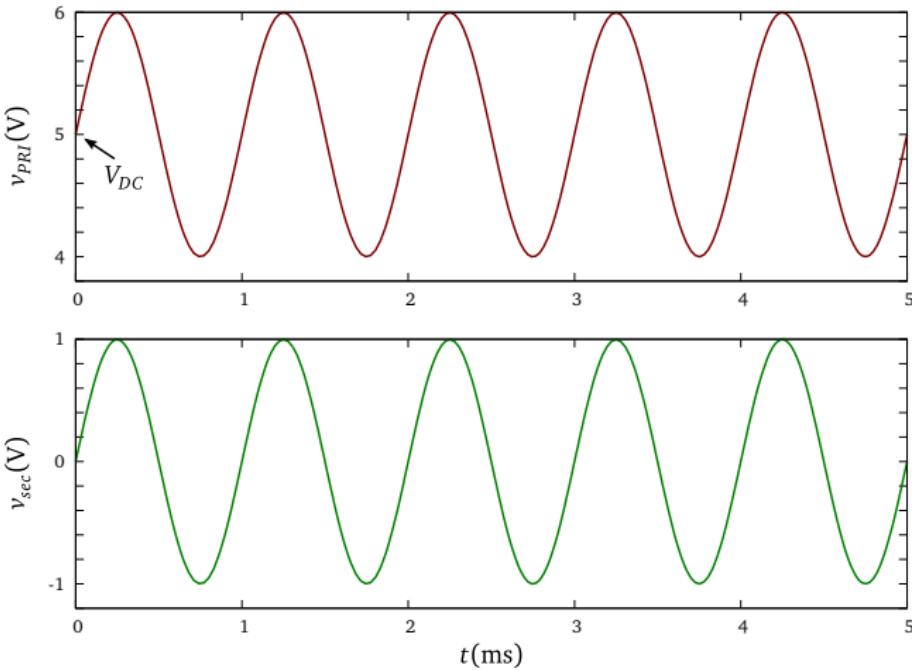
Odvajanje jednosmernog signala



U ulaznom kolu nalazi se mešoviti signal (sastoji se od naizmenične i jednosmerne komponente). U izlaznom kolu pojavljuje se samo naizmenična komponenta ulaznog signala. Ovi transformatori su tipično bez jezgra i primenjuju se kod pojačavača.

Primene

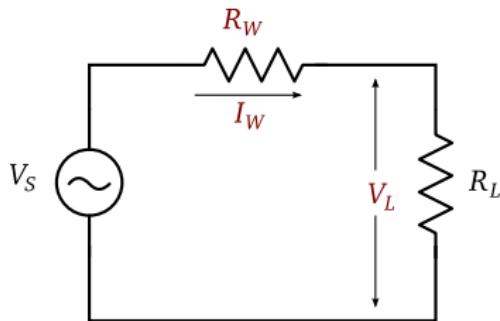
Odvajanje jednosmernog signala



Primene

Prenos električne energije

Generator naizmeničnog napona efektivne vrednosti $V_S = 230\text{ V}$ treba da isporuči snagu opterećenju $R_L = 50\Omega$ na rastojanju $l = 50\text{ km}$, preko žice otpornosti $R_l = 0,25\Omega\text{ km}^{-1}$.



Ukupna dužina žice je $l_W = 2l = 100\text{ km}$. Ukupna otpornost žice je:

$$\begin{aligned}R_W &= R_l l_W \\&= 0,25 \cdot 100 = 25\Omega.\end{aligned}$$

Primene

Prenos električne energije

Iz naponskog razdelnika je efektivna vrednost napona na opterećenju:

$$V_L = \frac{R_L}{R_W + R_L} V_S = \frac{50}{50 + 25} \cdot 230 \simeq 153 \text{ V}.$$

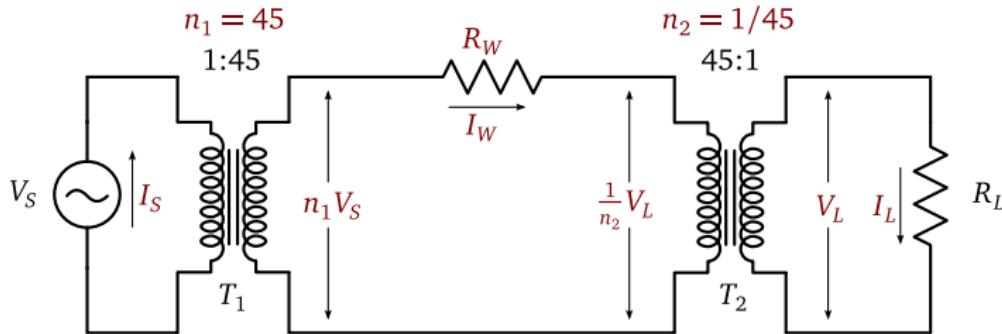
Koeficijent korisnog dejstva je odnos snage koja stiže do opterećenja i snage koju ulaže izvor:

$$\eta = \frac{V_L I_W}{V_S I_W} \cdot 100 = \frac{153}{230} \cdot 100 \simeq 67\% . \quad (8)$$

Trećina snage generatora ne stiže do opterećenja.

Primene

Prenos električne energije - ilustracija principa



Pošto je $n_1 = 45$, transformator T_1 podiže napon na približno 10 kV.
Time se struja kroz otpornik R_W znatno smanjuje:

$$I_W = \frac{1}{n_1} I_S .$$

Primene

Prenos električne energije

Transformator T_2 ima odnos transformacije $n_2 = 1/45 = 1/n_1$, pa je, prema (3), struja kroz opterećenje:

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{1}{n_2} I_W = \frac{1}{\frac{1}{n_1}} I_W = n_1 I_W ,$$

odakle je:

$$I_W = \frac{V_L}{n_1 R_L} .$$

Na optorniku R_W postoji pad napona:

$$R_W I_W = n_1 V_S - \frac{1}{n_2} V_L = n_1 (V_S - V_L) .$$

Primene

Prenos električne energije

Iz prethodnih izraza je:

$$R_W \frac{V_L}{n_1 R_L} = n_1 (V_S - V_L),$$

odakle se dobija:

$$V_L = \frac{R_L}{\frac{R_W}{n_1^2} + R_L} V_S = \frac{50}{\frac{25}{45^2} + 50} \cdot 230 = 229,94 \text{ V}.$$

Koeficijent korisnog dejstva je 99,97% (u praksi je manji jer transformatori nisu idealni).

Primene

Ostale primene

- Izolacioni transformator (izoluje opterećenje od izvora, kao i šumove iz mreže)
- Strujni transformator (za merenje jačine struje)

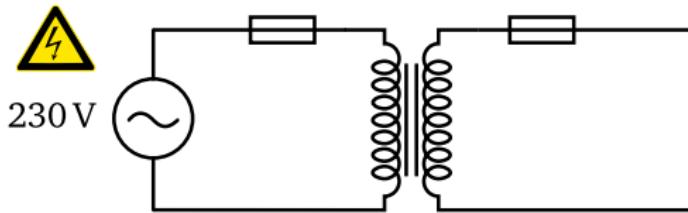


- Autotransformator (sa jednim kalemom i izvodom na njegovim namotajima, za male korekcije napona, prilagođenje impedanse, itd.)
- Regulacioni transformator (autotransformator kod koga se izlazni napon može menjati klizačem)

Kod autotransformatora i regulacionog transformatora ulaz i izlaz nisu galvanski odvojeni!

Primene

Osigurači



Osigurač u primaru štiti korisnika i okolinu. Osigurač u sekundaru štiti transformator od potencijalnog kratkog spoja na izlazu. Transformator je često najskuplja komponenta kod mnogih uređaja. Osigurači moraju biti tromi (*slow-blow*), kako bi izdržali početnu udarnu struju⁶, koja nastaje u procesu magnećenja jezgra.

⁶Videti primenu NTC optornika.

Primene

Osigurači

Proizvođači obično daju specifikacije osigurača. Na slici je transformator za montažu na štampanu ploču sa dva sekundara u čijim kolima treba da budu osigurači od po 0,5 A.



Završne napomene

Mere bezbednosti

- Prikazane električne šeme ne uključuju sve detalje i mogu se koristiti *isključivo* u obrazovne svrhe.
- **Prilikom rada sa transformatorima OBAVEZNO treba poštovati sve mere bezbednosti koje propisuju odgovarajući standardi!**
- Prilikom izbora transformatora, osigurača, kao i drugih elemenata zaštite obavezno treba proučiti dodatnu stručnu literaturu, a posebno informacije i preporuke date u tehničkim specifikacijama proizvođača.
- Transformatorima uvek treba obezbiti odgovarajuće hlađenje.

Završne napomene

Preporučena literatura

- ① S. Ristić, *RLC komponente*, Prosveta, Niš, 2005. (ISBN: 86-7455-653-1)
- ② S. Ristić, *Elektronske komponente*, Skripta, Elektronski fakultet, Niš, 2011. (<http://mikroelektronika.elfak.ni.ac.rs>→literatura).
- ③ T. Floyd, *Principles of Electric Circuits, Conventional Current Version*, 9th Ed., Pearson, 2013. (ISBN: 978-1292025667)

Temporary page!

\LaTeX was unable to guess the total number of pages correctly. there was some unprocessed data that should have been added to the final page this extra page has been added to receive it. If you rerun the document (without altering it) this surplus page will go away, because \LaTeX now knows how many pages to expect for this document.

Elektronske komponente

Prekidači i osigurači

Z. Prijić, D. Danković

Univerzitet u Nišu
Elektronski fakultet u Nišu

Predavanja 2021.



Sadržaj

1 Prekidači

2 Osigurači

Deo 1

Prekidači

(Informativno)

Prekidači

Definicija i podela

Prekidač je elektromehanička komponenta koja uspostavlja provodni put između dva dela električnog/elektronskog kola.

Električni simboli:

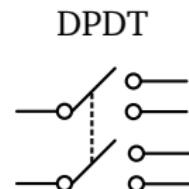
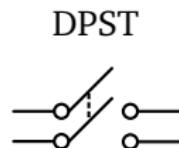
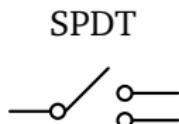
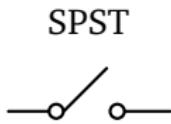


Prekidači se mogu klasifikovati prema:

- broju kontakata (*pole*) pomoću kojih prekidač uspostavlja provodni put;
- broju položaja (*throw*) u kojima prekidač ostvaruje provodni put.

Prekidači

Podela



SPST Single Pole – Single Throw

SPDT Single Pole – Double Throw

DPST Double Pole – Single Throw

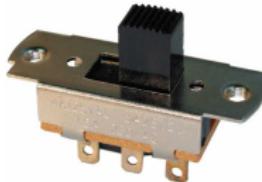
DPDT Double Pole – Double Throw

Napomena: Isprekidana linija u simbolu znači da se oba kontakta prekidača pomeraju istovremeno.

Prekidači

Podela prema načinu uspostavljanja kontakta

- klizni (*slider*)



- preklopni (*rocker*)



- polužni (*toggle*)



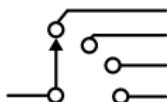
- potisni (*push*)



Prekidači

Kružni prekidač

Kružni (*rotary*) prekidač ima više položaja, a kontakt se ostvaruje okretanjem prekidača oko centralne osovine.

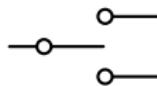


Broj položaja može biti od 2 do 24. Broj kontakata može biti 1, 2, 3 ili 4. Postoje i u SMD varijantama. Prebacivanje iz položaja u položaj mogu ostvariti tako što: (i) najpre prekinu prethodnu, a zatim uspostave narednu vezu (*break before make – non-shorting switch*); (ii) najpre uspostave narednu, a zatim prekinu prethodnu vezu (*make before break – shorting switch*).

Prekidači

Pregibni prekidač

Pregibni prekidač (*center-off*) je varijanta SPDT polužnog ili preklopnog prekidača koja ima jedan centralni (OFF) i dva periferna (ON) položaja.

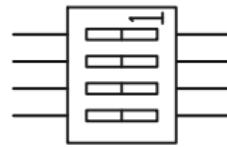
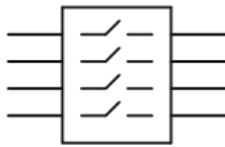


Ovakvi prekidači postoje i u kliznoj varijanti.

Prekidači

DIP prekidači

DIP (*Dual-In-Line*) prekidači predstavljaju grupu SPST prekidača u jednom kućištu. U grupi može biti 2–16 prekidača. Postoje i varijante sa samo jednim prekidačem. Predviđeni su za montažu na štampanu ploču.



DIP prekidači se koriste za konfiguriranje uređaja u proizvodnji ili nakon servisiranja. Ređe se koriste za podešavanja parametara uređaja tokom eksploatacije.

Prekidači

Taster

Taster (*tactile switch*) predstavlja SPST prekidač kojim se kontakt ostvaruje trenutno, pritiskom, a otpuštanjem se prekida.



Tasteri se primenjuju za unos podataka (tastatura) ili za operacije kao što su uključivanje i reset uređaja.

Prekidači

Mikroprekidač

Mikroprekidač predstavlja prekidač koji u osnovi funkcioniše kao taster, ali može biti u različitim *pole-throw* kombinacijama.



Primenjuju se za interakciju sa korisnikom (npr. tasteri računarskog miša). Pored toga, ugrađuju se u mehaničke sklopove koji ih automatski uključuju i isključuju.

Prekidači

Elektromehanički parametri

Za sve prekidače karakteristični su sledeći električni i mehanički parametri:

- maksimalni DC i AC napon;
- maksimalna struja pri maksimalnom DC i AC naponu;
- kontaktna otpornost;
- minimalni garantovani broj ciklusa uključivanja/isključivanja.

Podrazumevani položaji prekidača mogu biti:

- otvoren (*Normally Open – NO*)
- zatvoren (*Normally Closed – NC*)

Deo 2

Osigurači

(Informativno)

Osigurači

Definicija

Osigurači su elektronske komponente koje su namenjene prekidu električnog kola u slučaju pojave struje koja je veća od maksimalno dozvoljene za to kolo.

Svrha osigurača je zaštita korisnika uređaja, okoline, kao i samog uređaja od incidentnih situacija koje mogu nastati pojavom kratkog spoja unutar uređaja usled otkaza neke komponente, ili preopterećenja grane kola usled istovremenog rada više potrošača.

Osigurači se mogu posmatrati kao prekidači koji se nalaze u normalno zatvorenom (NC) položaju. U slučaju incidentne situacije dolazi do otvaranja kontakta prekidača.

Tipično se postavljaju na ulazu kola, odmah iza izvora napajanja.

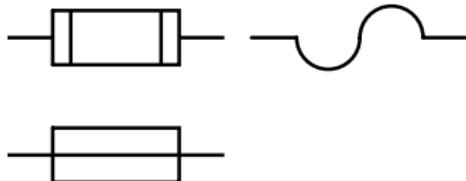
Osigurači

Podela prema načinu rada i električni simboli

Prema načinu rada osigurači se dele na:

- ireverzibilne (nakon otvaranja kontakta, više se ne mogu koristiti, već se moraju zameniti novim, pod uslovom da je otklonjen uzrok otvaranja kontakta)
- reverzibilne (nakon otvaranja kontakta, mogu se vratiti u normalno zatvoreni položaj, pod uslovom da je otklonjen uzrok otvaranja kontakta)

ireverzibilni (fuse)



reverzibilni
(circuit breaker)



Osigurači

Ireverzibilni osigurači

Irevezibilni osigurači koriste topivi umetak od žice određenog poprečnog preseka i specifične električne otpornosti. Prolazak velike struje izaziva topljenje (*melting*) žice i na taj način se kolo prekida. Po konstrukciji i dimenzijama mogu biti različiti, u kućištima sa izmenljivim umetkom, sa podnožjem ili u monolitnim kućištima za montažu na štampanu ploču.



Osigurači

Ireverzibilni osigurači

Osnovni parametri koji karakterišu osigurače:

- nominalna struja (*rated current*) – maksimalna struja koja može da prođe kroz osigurač u normalnim radnim uslovima;
- nominalni napon (*rated voltage*) – maksimalni napon za koji osigurač garantovano prekida kontakt;
- struja prekidanja (*interrupting rating, breaking capacity*) – maksimalna struja pri kojoj osigurač garantovano prekida kontakt pri nominalnom naponu;

Svi parametri se podrazumevano daju kao efektivne vrednosti najzmeničnih signala. Osigurači se mogu primeniti i za kola sa jednosmernim signalima samo ako su za to deklarisani od strane proizvođača.

Osigurači

Ireverzibilni osigurači



Reaguju na promenu temperature okoline ili na jačinu struje. Sastoje se od provodnog mosta. Kada temperatura ili jačina struje pređe kritičnu, legura koja spaja most sa izvodom se topi, a opruga odvaja most od izvoda, prekidajući na taj način kontakt.

Koriste se za zaštitu grejača i namotaja motora.

Osigurači

Podela prema brzini prekidanja kontakta

Podela se zasniva na vremenu koje je potrebno da osigurač prekine kontakt, računajući od trenutka pojave kratkog spoja ili preopterećenja:

- brzi (*fast acting*)
 - super brzi
 - srednje brzi
- tromi (*slow blow*)

Tromi osigurači se tipično koriste kod uređaja kod kojih se prilikom uključivanja pojavljuje početna udarna struja (npr. kod nekih tipova transformatora).

Za svaki tip osigurača proizvođači daju odgovarajuće krive zavisnosti vremena potrebnog za prekid kontakta od jačine struje.

Osigurači

Izbor osigurača – primer

Za osigurač je poželjno da mu normalni radni uslovi budu temperatura od 25°C i struja koja je približno 25% manja od nominalne. Na primer, ako je normalna vrednost struje u kolu uređaja 1 A, treba izabrati osigurač čija je nominalna struja 1,25 A. Ako je radna temperatura uređaja veća, potrebno je uzeti u obzir korekcioni faktor, jer se performanse osigurača degradiraju sa porastom temperature. Na primer, ako je radna temperatura uređaja 70°C , treba izabrati osigurač čija je nominalna struja 1,6 A.

Osigurači

Reverzibilni osigurači

Automatski (reset) osigurači



Sastoje se od mehanizma sa polugom koja se automatski prebacuje u položaj „isključeno“, a ručno postavlja u položaj „uključeno“. Automatsko aktiviranje mehanizma vrši se pomoću solenoida (elektromagnetski – zaštita od kratkog spoja) i bimetalne trake (elektrotermičko – zaštita od preopterećenja). Namjenjeni su pre svega zaštiti električnih instalacija.

Napomena: Izbor tipa i dimenzionisanje osigurača za električne instalacije vrši se prema odgovarajućim standardima koji nisu predmet razmatranja ovog kursa.

Osigurači

Reverzibilni osigurači

Polimerni osigurači (*polyswitch, polyfuse*)

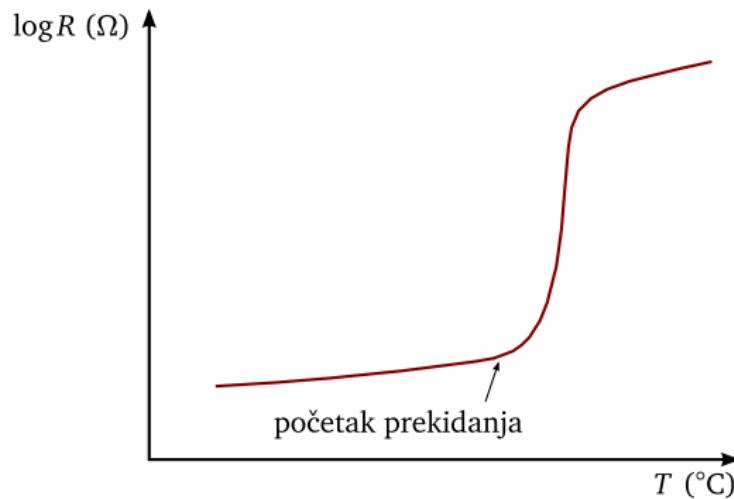


U osnovi predstavljaju PTC otpornike od polimera, sa dodatkom ugljeničnog praha koji obezbeđuje električnu provodnost. Porast struje zagreva osigurač i menja strukturu polimera iz kristalne u amorfnu. Rezultat je porast otpornosti osigurača. Nakon isključenja struje, struktura polimera se tokom hlađenja ponovo vraća u kristalnu. Zbog toga se otpornost vraća na malu, mada ne i na početnu, vrednost.

Osigurači

Reverzibilni osigurači

Tipična zavisnost optornosti polimernog osigurača od (njegove) temperaturе:



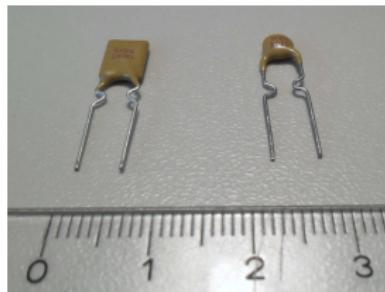
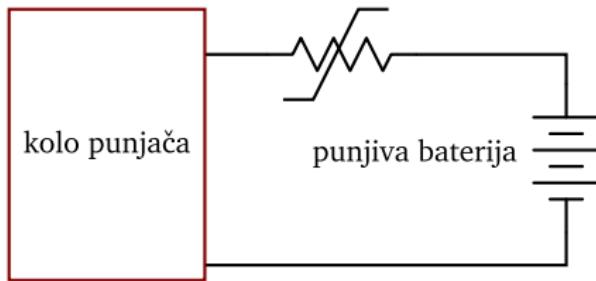
Osigurač prelazi u stanje visoke otpornosti nakon što se zagreje do određene temperature. Prelaz se opisuje terminom *trip point*.

Osigurači

Reverzibilni osigurači

Polimerni osigurači se primenjuju za zaštitu:

- računarskih komponenata
- zvučnika
- punjivih baterija
- ...



Završne napomene

- Prikazane električne šeme ne uključuju sve detalje i mogu se koristiti *isključivo* u obrazovne svrhe.
- Kod prekidača i osigurača postoji još parametara na koje treba obratiti pažnju prilikom izbora (pojava varničenja, energija topljenja, itd.).
- Prilikom postavljanja osigurača na štampanu ploču, potrebno je da linije veze na njoj budu dovoljnih dimenzija da mogu da izdrže struju prekidanja.
- Osigurači se kao zaštitna mera obavezno postavljaju u svaki uređaj prema odgovarajućim standardima.
- Kod kućnih električnih instalacija u upotrebi je kao zaštitni element i FID sklopka (*Residual Current Device*).