



Metodi analize u elektronici

Dragan Mančić, Marko Dimitrijević

Uvod

- Svaka naučna disciplina ima odgovarajuće **naučne metode**, koji predstavljaju procese kojima se dolazi do saznanja o određenim fenomenima putem postavljanja pretpostavki i njihovog proveravanja kroz eksperimente.
- U tehničkim naukama, postoje dve kategorije metoda, **metodi analize** i **metodi sinteze**.
- **Metodima analize** se dolazi do saznanja o funkciji određenog složenijeg sistema razmatranjem njegovih elemenata i njihovih međusobnih odnosa. **Metodima sinteze**, na osnovu poznate funkcije od jednostavnijih elemenata se realizuju složeniji sistemi.

Metodi analize

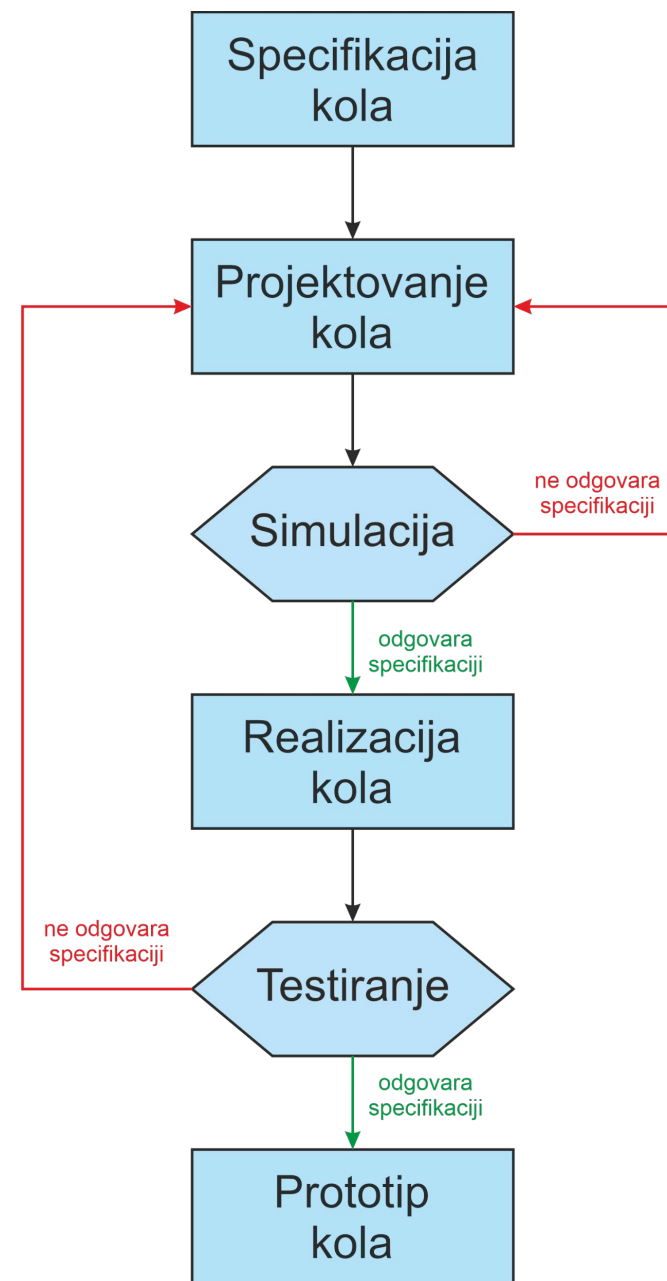
- Najznačajniji metodi analize u elektronici su **simulacija, verifikacija i testiranje**.
- U procesu projektovanja elektronskih kola i sistema, naizmenično sa metodima *sinteze* se sprovode i metodi *analize* kako bi se proverila funkcionalnost kola/sistema koje se projektuje i eliminisale greške koje se u procesu projektovanja javljaju.
- **Simulacija** je postupak koji se primenjuje u svim fazama realizacije i na svim nivoima složenosti elektronskih kola i sistema.
- **Verifikacija** je postupak provere funkcionalnosti sistema za različite uslove i scenarije rada. Uglavnom se primenjuje kod složenih digitalnih sistema.
- **Testiranje** je postupak fizičke provere sistema, koji se sprovodi na prototipu kola ili sistema, na kraju procesa projektovanja.

Značaj simulacije

- Prva elektronska kola su bila realizovana od diskretnih komponenti. Postupak projektovanja se sastojao od više ciklusa fizičke realizacije kola, merenja električnih veličina i podešavanja parametara kola.
- Ovakav proces je dugotrajan i skup, a u procesu projektovanja integrisanih kola je praktično nemoguć – fizička realizacija integrisanog kola je dugotrajna i skupa, a merenje električnih veličina je moguće samo na kontaktima integrisanog kola. Integrisana kola zbog velikog broja elemenata nije moguće zameniti ekvivalentnim kolom realizovanim od diskretnih komponenti.

Uprošćen proces realizacije kola

- *Specifikacija* kola je postupak definisanja funkcije elektronskog kola ili sistema i uslova pod kojim kolo ili sistem manifestuje definisanu funkciju.
- *Projektovanje* je postupak sinteze elektronskog kola ili sistema. Projektovanje obuhvata više faza koje se mogu odvijati sukcesivno ili paralelno. U svakoj fazi projektovanja je uključena *simulacija*.



Tipovi elektronskih kola

- **Analogna elektronska kola** se sastoje od pasivnih elemenata (otpornici, kondenzatori i kalemovi) i aktivnih poluprovodničkih elemenata (tranzistora). Naponi i struje u analognim kolima su **analogni signali**.
- **Digitalna kola** se sastoje od elementarnih logičkih kola i memorijskih elemenata. Naponi u digitalnim kolima imaju diskretne, najčešće binarne vrednosti, koje predstavljaju logička stanja kola.
- **Kola sa mešovitim signalima** sadrže analogni i digitalni deo, kao i odgovarajuće konvertore signala (A/D i D/A).

Tipovi simulacija

- **Simulacija na nivou električnih kola**, *simulacija analognih kola* – kolo se simulira na nivou električnih elemenata, rezultati simulacije su fizičke veličine: naponi, struje, snaga, impedanse, itd.
- **Simulacija na logičkom nivou**, *simulacija digitalnih kola* – kolo se simulira na logičkom nivou, rezultat simulacije su logička stanja kola.
- **Simulacija na nivou sistema** – rezultati simulacije su ponašanje i karakteristike celokupnog sistema.

Zadaci simulacije

- Provera novih ideja bez fizičke realizacije.
- Provera funkcije kola, detektovanje i otklanjanje problema u kolu pre fizičke realizacije.
- Pобољшanje performansi kola (smanjenje broja elemenata, smanjenje potrošnje, smanjenje uticaja šumova...).
- Brza analiza ponašanja kola pri izmenama parametra kola i komponenti.
- Analiza kola u uslovima koje je teško moguće fizički ostvariti: prisustvo šumova, visoke temperature, opasni uslovi (visoki napon, električna pražnjenja), potreba za skupom mernom opremom, itd.

Istorija simulacije – teorija i počeci

- '50 – Postavljeni su osnovni teorijski koncepti: teorija električnih kola, teorija grafova, jednačine stanja električnog kola.
- '60 – Napisani su prvi algoritmi za rešavanje i integraciju diferencijalnih jednačina. Pojavili su se programi za simulaciju (simulatori) prve generacije, koji su mogli da rešavaju samo podeljena linearna kola i njihov opseg primene je bio prilično ograničen.
- '70 – primena metoda potencijala čvorova i modifikovanog metoda potencijala čvorova u programima za simulaciju, poboljšani algoritmi za rešavanje diferencijalnih jednačina, realizovani su prvi modeli poluprovodničkih komponenti (tranzistora).

Istorija simulacije – prvi praktični simulatori

- 1971 – Napredak u računarskoj tehnici i razvoj numeričkih metoda doveo je do razvoja programa za nelinearnu analizu. Na Univerzitetu u Berkliju je razvijen „simulacioni program druge generacije“ u početku nazvan **CANCER**, kasnije **SPICE** (**S**imulation **P**rogram **W**ith **I**ntegrated **C**ircuit **E**mphasis). IBM je razvio svoj simulator, nazvan **ASTAP** (**A**dvanced **S**tatistical **A**nalysis **P**rogram).
- '80 – SPICE je postao standardni alat za simulaciju. Predstavljene su prve verzije simulatora za PC računare (1983, PSPICE). Komercijalne verzije simulatora su dobile bolje korisničke interfejse, podršku za modele poluprovodničkih komponenti, poboljšana je stabilnost i tačnost numeričkih metoda, simulatori su integrisani u okruženja za projektovanje i razvoj elektronskih kola sa velikim brojem elemenata.

Istorija simulacije – razvoj i široka primena

- '90 – Razvijen je veliki broj komercijalnih simulatora zasnovanih na SPICE2 i SPICE3 verzijama. Razvijeni su algoritmi za simulaciju na višeprosesorskim sistemima i superračunarima. Predstavljani su prvi simulatori kola sa mešovitim signalima.
- 1993 - Na Elektronskom fakultetu u Nišu, u Laboratoriji za projektovanje elektronskih kola, grupa naučnika (Vančo Litovski, Dejan Glozić, Željko Mrčarica i ostali) je razvila simulator ALECSIS.
- 2000 – Na tržištu je postao dostupan veliki broj integrisanih alata za projektovanje VLSI/ULSI integrisanih kola u submikronskim tehnologijama (veličina tranzistora na integrisanom kolu je manja od $1\mu\text{m}$).

Istorija simulacije – savremeni simulatori

- Danas je dostupan veliki broj simulatora opšte namene:
 - baziranih na SPICE platformi: LTSPICE (Linear Technologies), MULTISIM (National Instruments), SPICE 2G.6, HSPICE, PSpice 9 (Cadence), IsSPICE (IntoSoft), AIM-Spice 3.2, MicroCapV, Electronic WorkBench.
 - ELDO (Menthor Graphics), Spectre (Cadence), SABER (Analogy)
- Simulatori za specifične namene:
 - Simulatori za visoke frekvencije: Spectre RF (Cadence), MDS-HP (EESoft), Serenade (AnSoft)
 - Simulatori za simboličku analizu
 - Simulatori različitih domena (elektromehanički, elektrotermički)
 - Eksperimentalni i edukativni simulatori (RSPICE i OPTIMA)

Simulacija analognih kola

- Poznavanje ponašanja električnih kola zahteva istovremeno rešavanje niza jednačina.
- Najlakši problem u analizi kola je pronalazak jednosmernih napona čvorova (**jednosmernog radnog režima** ili **jednosmerne radne tačke**) linearnog kola, što zahteva rešavanje jednačina izvedenih iz Kirchhoff-ovih zakona za napone i struje.
- Za kola sa malim brojem linearnih elemenata, u kojima je zavisnost struja koje protiču kroz grane od napona čvorova linearna, tačno određivanje jednosmerne radne tačke je moguće i ručnim izračunavanjem.
- Za linearna kola sa velikim brojem elemenata rešenja jednosmernog režima, a posebno rešenja u frekvencijskom ili vremenskom domenu su veoma složena.

Simulacija analognih kola

- Analiza kola koja sadrže nelinearne elemente je još komplikovanija i dodaje još jedan nivo složenosti – rešavanje sistema nelinearnih jednačina koji se u opštem slučaju ne može rešiti eksplicitno, već samo numerički.
- Samo se kola sa malim brojem nelinearnih elemenata mogu rešiti ručnim proračunima, bez računara, pri čemu se dobijaju samo približno tačni rezultati. Za ovakav postupak je neophodno primeniti određene aproksimacije, kako bi se odredio jednosmerni režim kola.
- Još jedan nivo složenosti se javlja kada treba predvideti ponašanje električnog kola u vremenskom ili frekvencijskom domenu. Jednačine kola postaju nelinearne integro-diferencijalne jednačine, koje se mogu ručno rešiti samo u izuzetno malom broju slučajeva i sa značajnim ograničenjima.

Simulacija analognih kola

- Kako je fizička realizacija integrisanog kola kompleksna i skupa, realizacija prototipa u cilju pronalaženja i otklanjanja grešaka u projektu, i na kraju potvrđivanja njegove ispravnosti, nije isplativa. Zato je neophodan nekakav *simulirani prototip*.
- Ovakav simulirani prototip se može ostvariti na računaru pomoću programa za **električnu simulaciju i analizu**. Programi namenjeni električnoj simulaciji i analizi kola, koji rešavaju jednačine postavljene na osnovu Kirhofovih zakona za napone i struje, Omovog zakona i strujno-naponskih zavisnosti nelinearnih elemenata, nazivaju se **simulatorima električnih kola**.

Simulacija analognih kola

- Još jedan važan faktor koji je doprineo razvoju računarskih programa za simulaciju električnih kola bio je veliki rast proizvodnje, pad cena i rast performansi računara.
- Ova dva međusobno zavisna tehnološka faktora, kompleksna integrisana kola i računari velikih performansi, odredili su i potrebu i alat za automatizaciju procesa projektovanja elektronskih kola.
- Istraživanje tehnika, metoda i algoritama za automatizaciju projektovanja i simulaciju elektronskih kola je postalo posebna disciplina u okviru elektronike, ali i računarske tehnike, koja se naziva **automatizacija u projektovanju elektronskih kola (Electronic Design Automation – EDA)**.

SPICE simulatori

- **SPICE** (**S**imulation **P**rogram **W**ith **I**ntegrated **C**ircuit **E**mphasis) je familija programa za simulaciju električnih i elektronskih kola opšte namene, za **nelinearne jednosmerne, nelinearne prelazne i linearne naizmenične režime**. Podjednako su pogodni za rešavanje linearnih i nelinearnih električnih kola.
- Svaki program za simulaciju kola opšte namene mora da omogući tri osnovne analize: **analizu jednosmernog režima** (jednosmerna radna tačka, *DC operating point*), **analizu naizmeničnog režima** (frekvencijski odziv, *AC*) i **analizu prelaznog režima** (*transient analysis*). Delovi programa (algoritma) koji sprovode navedene analize se nazivaju **solveri**.
- SPICE simulatori su zasnovani na algoritmima za rešavanje jednačina kola postavljenih na osnovu **metoda potencijala čvorova**.

SPICE simulatori

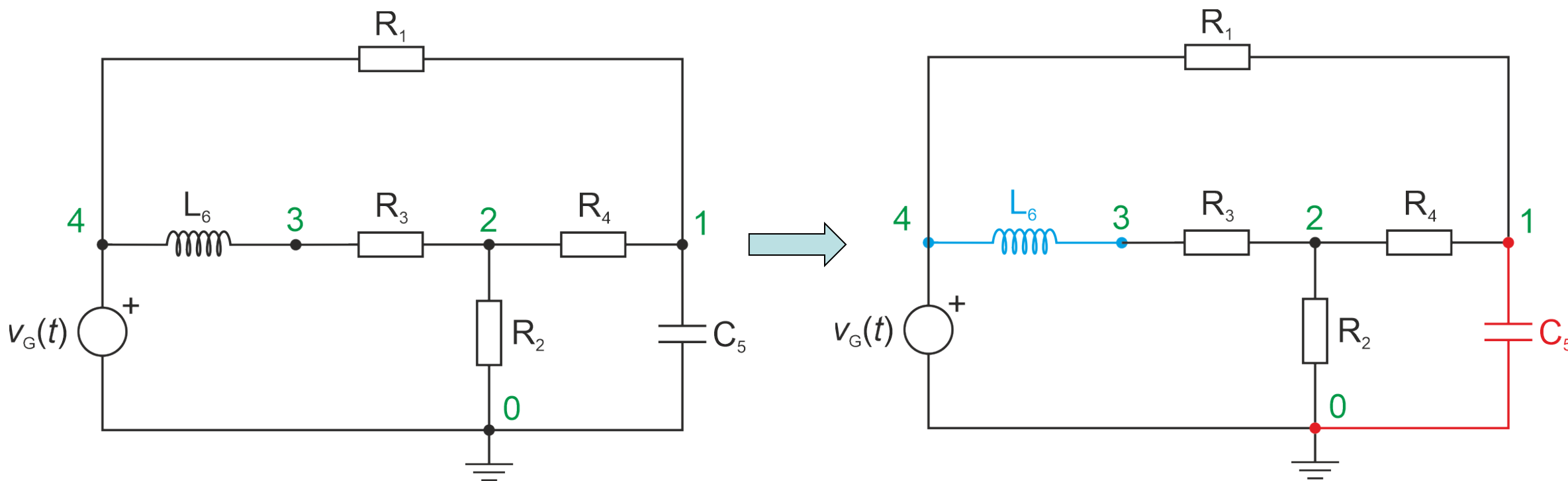
- Kolo koje se simulira može sadržati različite elemente:
 - pasivne elemente kao što su otpornici, kondenzatori, kalemovi, spregnuti kalemovi;
 - nezavisne strujne i naponske generatore;
 - kontrolisane strujne i naponske generatore;
 - prenosne vodove;
 - poluprovodničke elemente: diode (usmeračke, Zener, varikap, itd.), bipolarne tranzistore, tranzistore sa efektom polja (MOSFET, MESFET i JFET), druge poluprovodničke komponente i integrisana kola koja se tretiraju kao „crne kutije“.

Jednosmerna analiza

- *Solver za jednosmernu analizu* izračunava jednosmernu radnu tačku kola, pri čemu se kondenzatori tretiraju kao prekidi, a kalemovi kao kratki spojevi u kolu. U određenim slučajevima kondenzatori i kalemovi se mogu predstaviti i modelovati konačnim otpornostima (provodnost dielektrika i otpornost obloga kondenzatora, otpornost provodnika u kalemu).
- Linearni sistem jednačina koji opisuje kolo se izračunava eksplicitno.
- Sistem jednačina koji opisuje kolo može biti nelinearan, što je posledica nelinearnih strujno-naponskih karakteristika poluprovodničkih ili drugih nelinearnih elemenata.
- SPICE koristi iterativne numeričke metode za rešavanje sistema nelinearnih jednačina kola.

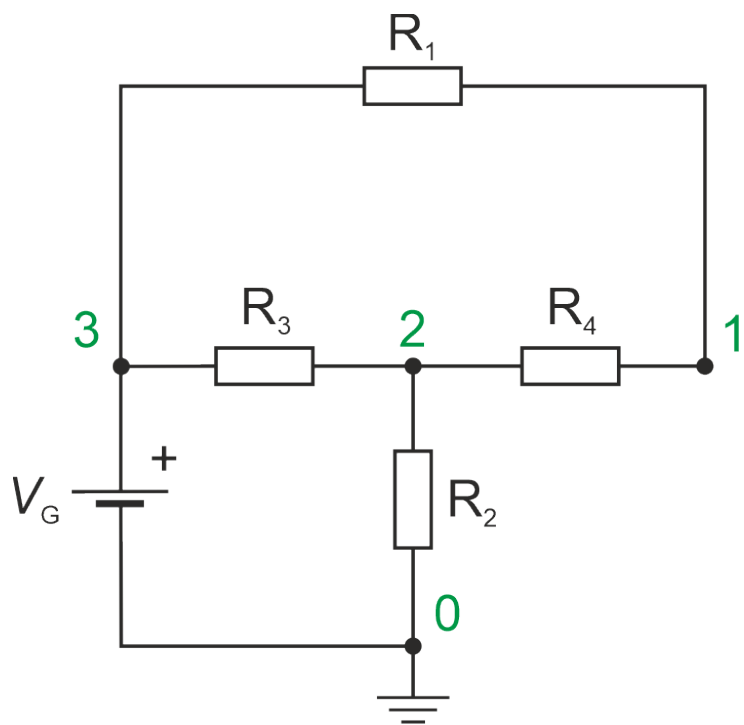
Jednosmerna analiza – primer linearnog kola

- Elementi kola su linearni, kolo ima četiri čvora. Za analizu jednosmernog režima, kalemovi se menjaju kratkim spojem, a kondenzatori prekidom.



Jednosmerna analiza – primer linearnog kola

- Ekvivalentno kolo ima jedan čvor manje, pošto kalem predstavlja kratak spoj, naponi čvorova između kojih je povezan su jednaki.



$$G_1 = 1/R_1, G_2 = 1/R_2, G_3 = 1/R_3, G_4 = 1/R_4$$

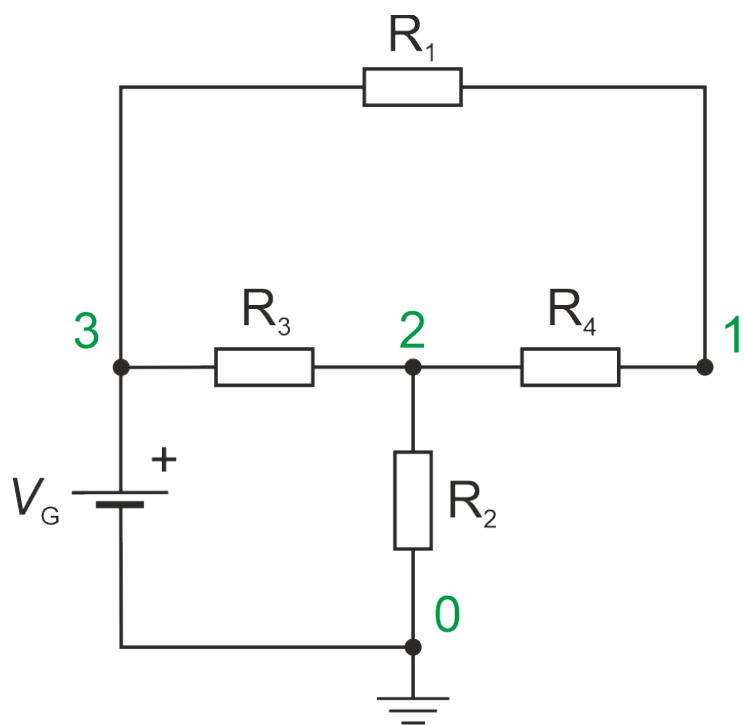
$$V_3 = V_G$$

$$V_1(G_1 + G_4) - V_2G_4 - V_GG_1 = 0$$

$$V_2(G_2 + G_3 + G_4) - V_1G_4 - V_GG_3 = 0$$

Jednosmerna analiza – primer linearnog kola

- Sistem jednačina se može predstaviti u matričnom obliku:



$$V_1(G_1 + G_4) - V_2G_4 = V_G G_1$$

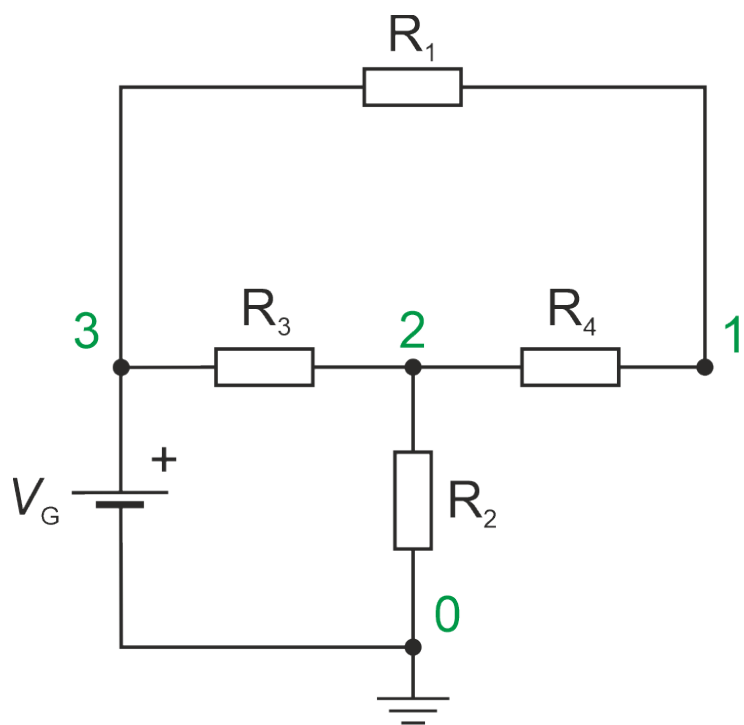
$$-V_1G_4 + V_2(G_2 + G_3 + G_4) = V_G G_3$$

$$\begin{bmatrix} G_1 + G_4 & -G_4 \\ -G_4 & G_2 + G_3 + G_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_G G_1 \\ V_G G_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{J}$$

Jednosmerna analiza – primer linearnog kola

- Da bi se odredili naponi čvorova, tj. vektor napona \mathbf{V} , potrebno je pronaći inverznu matricu \mathbf{G}^{-1} .



$$\mathbf{V} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{J}$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 + G_4 & -G_4 \\ -G_4 & G_2 + G_3 + G_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_G G_1 \\ V_G G_3 \end{bmatrix}$$

Jednosmerna analiza – primer linearnog kola

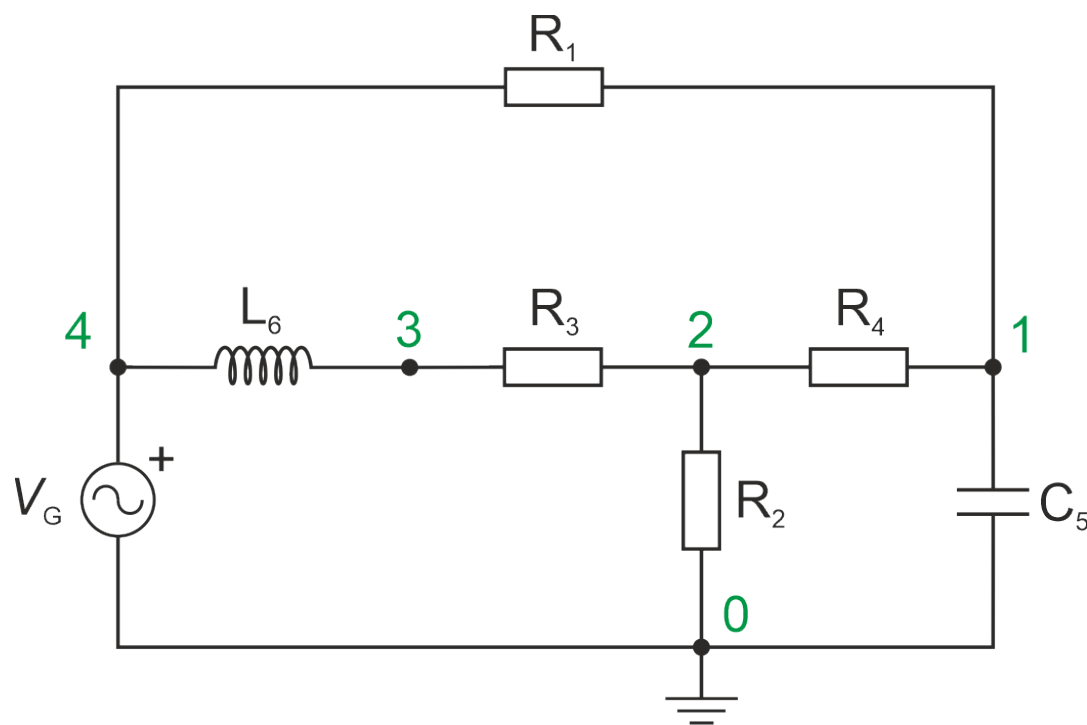
$$\mathbf{G}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{G_2 + G_3 + G_4}{G_1 G_2 + G_1 G_3 + G_1 G_4 + G_2 G_4 + G_3 G_4} & \frac{G_4}{G_1 G_2 + G_1 G_3 + G_1 G_4 + G_2 G_4 + G_3 G_4} \\ \frac{G_4}{G_1 G_2 + G_1 G_3 + G_1 G_4 + G_2 G_4 + G_3 G_4} & \frac{G_1 + G_4}{G_1 G_2 + G_1 G_3 + G_1 G_4 + G_2 G_4 + G_3 G_4} \end{bmatrix}$$

Naizmenična analiza

- *Solver za analizu naizmeničnog režima* izračunava kompleksne vrednosti napona čvorova **linearnog kola** u funkciji frekvencije sinusnog signala dovedenog na ulaz kola.
- Za nelinearna kola, poput elektronskih kola koja sadrže tranzistore, analize naizmeničnog režima su moguće za **naizmenične signale malih amplituda**: pretpostavlja se da je amplituda izvora pobude mala u poređenju sa termalnim naponom ($V_m \ll V_T$). Samo pod ovim uslovom nelinearni elementi u kolu mogu biti zamenjeni **linearizovanim modelima** koji modeluju njihovo ponašanje u okolini jednosmerne radne tačke.

Naizmenična analiza – primer linearnog kola

- Elementi kola su linearni, kolo ima četiri čvora. Za analizu naizmeničnog režima, kalemovi i kondenzatori imaju konačne impedanse.



$$G_1 = 1/R_1, G_2 = 1/R_2, G_3 = 1/R_3, G_4 = 1/R_4, \\ G_5 = j\omega C_5, G_6 = 1/j\omega L_6$$

$$V_4 = V_G$$

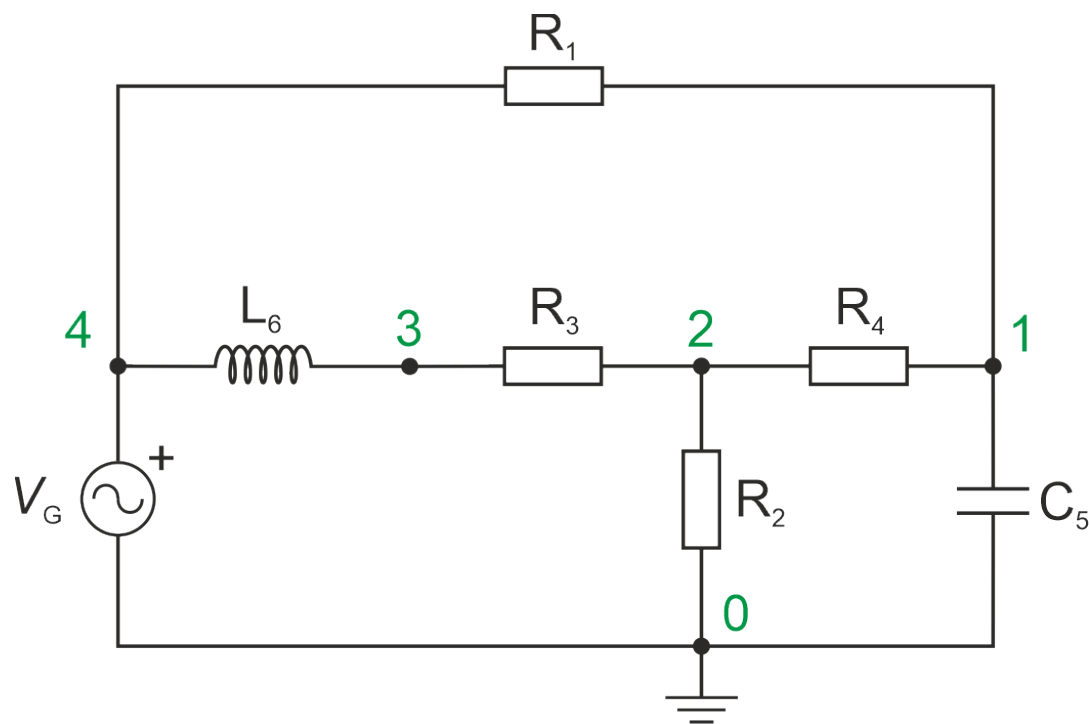
$$V_1(G_1 + G_4 + G_5) - V_2G_4 - V_G G_1 = 0$$

$$V_2(G_2 + G_3 + G_4) - V_1G_4 - V_3G_3 = 0$$

$$V_3(G_3 + G_6) - V_2G_3 - V_G G_6 = 0$$

Naizmenična analiza – primer linearnog kola

- Sistem jednačina se može predstaviti u matričnom obliku:



$$V_1(G_1 + G_4 + G_5) - V_2G_4 - V_G G_1 = 0$$

$$V_2(G_2 + G_3 + G_4) - V_1G_4 - V_3G_3 = 0$$

$$V_3(G_3 + G_6) - V_2G_3 - V_G G_6 = 0$$

$$V_1(G_1 + G_4 + G_5) - V_2G_4 + 0 \cdot V_3 = V_G G_1$$

$$-V_1G_4 + V_2(G_2 + G_3 + G_4) - V_3G_3 = 0$$

$$0 \cdot V_1 - V_2G_3 + V_3(G_3 + G_6) = V_G G_6$$

Naizmenična analiza – primer linearnog kola

- Sistem jednačina se može predstaviti u matičnom obliku:

$$V_1(G_1 + G_4 + G_5) - V_2G_4 + 0 \cdot V_3 = V_G G_1$$

$$-V_1G_4 + V_2(G_2 + G_3 + G_4) - V_3G_3 = 0$$

$$0 \cdot V_3 - V_2G_3 + V_3(G_3 + G_6) = V_G G_6$$

$$\begin{bmatrix} G_1 + G_4 + G_5 & -G_4 & 0 \\ -G_4 & G_2 + G_3 + G_4 & -G_3 \\ 0 & -G_3 & G_3 + G_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_G G_1 \\ 0 \\ V_G G_6 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{J}$$

Naizmenična analiza – primer linearnog kola

- Da bi se odredili naponi čvorova, tj. vektor napona \mathbf{V} , potrebno je pronaći inverznu matricu \mathbf{G}^{-1} .

$$\mathbf{V} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{J}$$

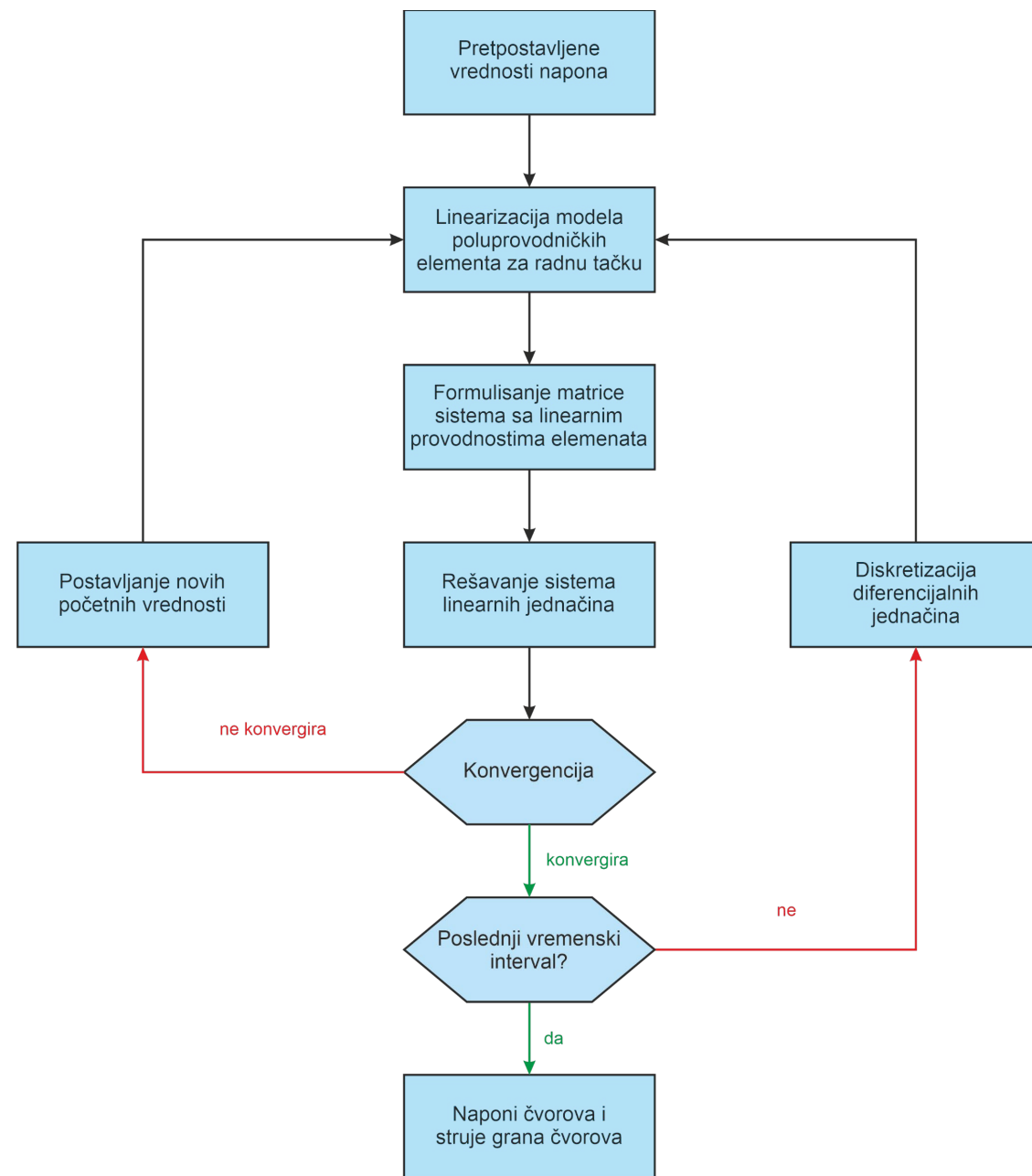
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 + G_4 + G_5 & -G_4 & 0 \\ -G_4 & G_2 + G_3 + G_4 & -G_3 \\ 0 & -G_3 & G_3 + G_6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_G G_1 \\ 0 \\ V_G G_6 \end{bmatrix}$$

Analiza prelaznih režima

- *Solver za analizu prelaznih režima* pronalazi talasne oblike (vremensku zavisnost) napona u svakom čvoru kola.
- Analiza prelaznog režima je analiza u vremenskom domenu.
- Prilikom ove analize ne postoje ograničenja u veličini amplitude pobudnog signala (**analiza za signale velikih amplituda**). U izračunavanjima se uzimaju u obzir nelinearne karakteristike poluprovodničkih elemenata.
- U opštem slučaju, izračunavaju se sistemi nelinearnih diferencijalnih jednačina, što zahteva zadavanje početnih uslova – početnih vrednosti naelektrisanja kondenzatora i flukseva kalemova. Ovakva vrsta analize je najkomplikovanija i zahteva najviše vremena za izračunavanje.
- Osim osnovnih analiza, simulatori mogu izvršavati i druge tipove analiza (analiza potrošnje, parametarske analize, osetljivost, itd.)

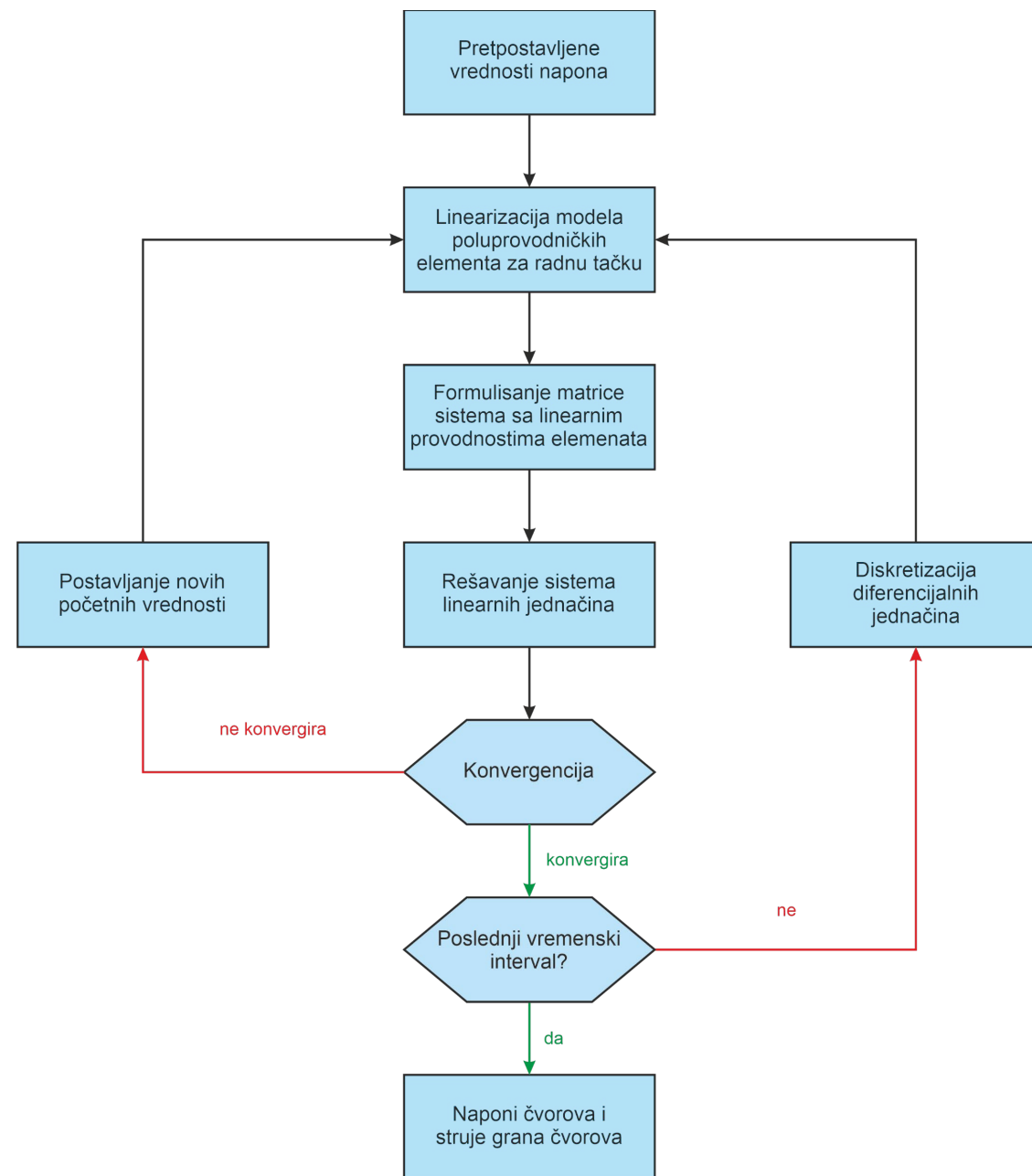
Analiza prelaznih režima

- Simulator prvo pronalazi jednosmerne napone u kolu (jednosmerna radna tačka). Ukoliko je kolo linearno, nepoznati jednosmerni naponi čvorova se nalaze direktno rešavanjem sistema linearnih jednačina.
- Ukoliko kolo sadrži nelinearne elemente, postupak određivanja jednosmernih napona i struja počinje pretpostavljanjem njihovih vrednosti.



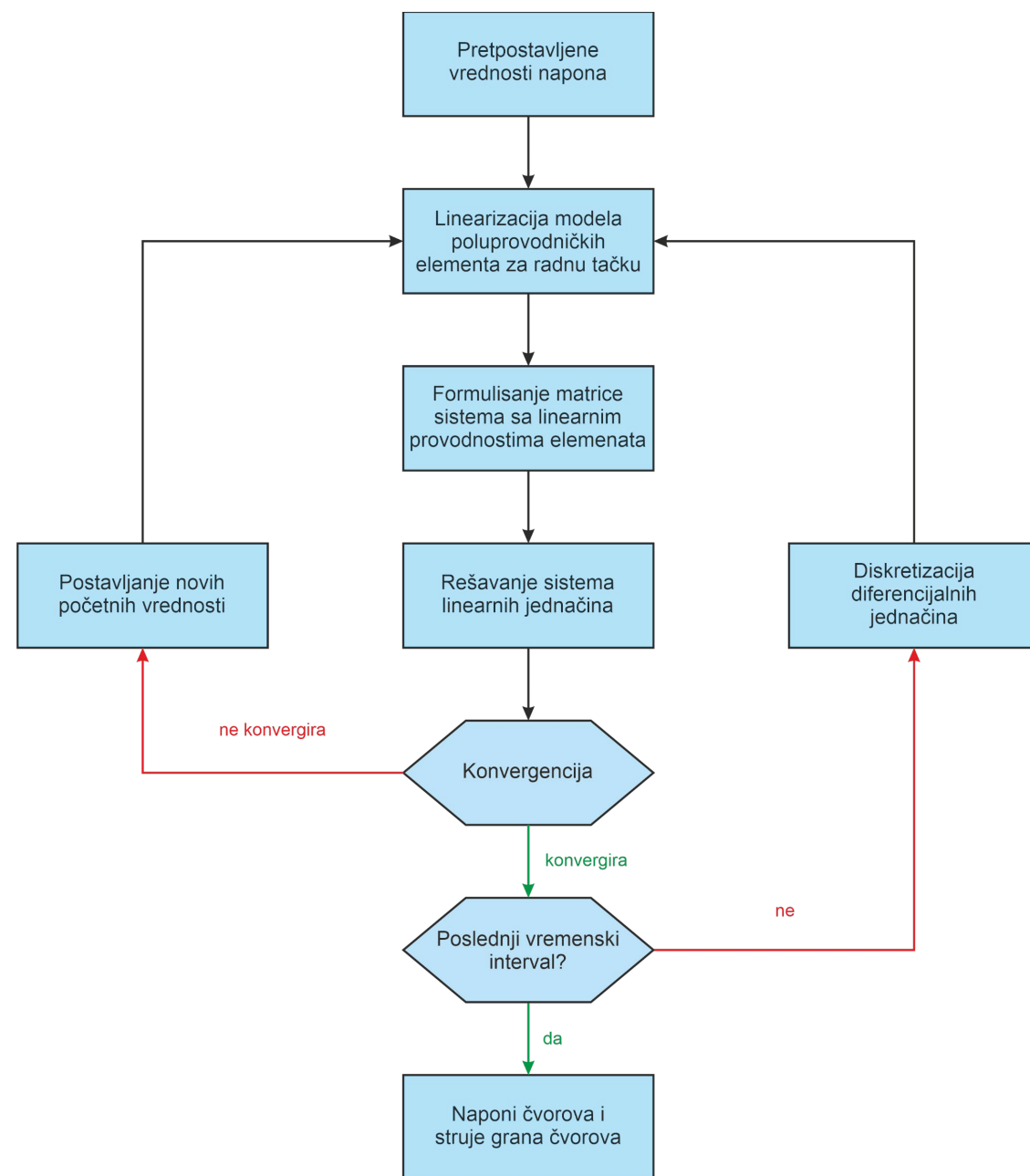
Analiza prelaznih režima

- Sledi niz sukcesivnih iterativnih procesa za rešavanje algebarskih nelinearnih jednačina, koje u svakom koraku daju bolju aproksimaciju traženih vrednosti (konvergiraju ka tačnoj vrednosti).
- Iterativni postupak konvergira ka rešenju koje predstavlja jednosmernu radnu tačku za analizu naizmeničnih signala male amplitude ili početne vrednosti za analizu prelaznih režima u vremenskom domenu – rešenje u početnom (nultom) vremenu.



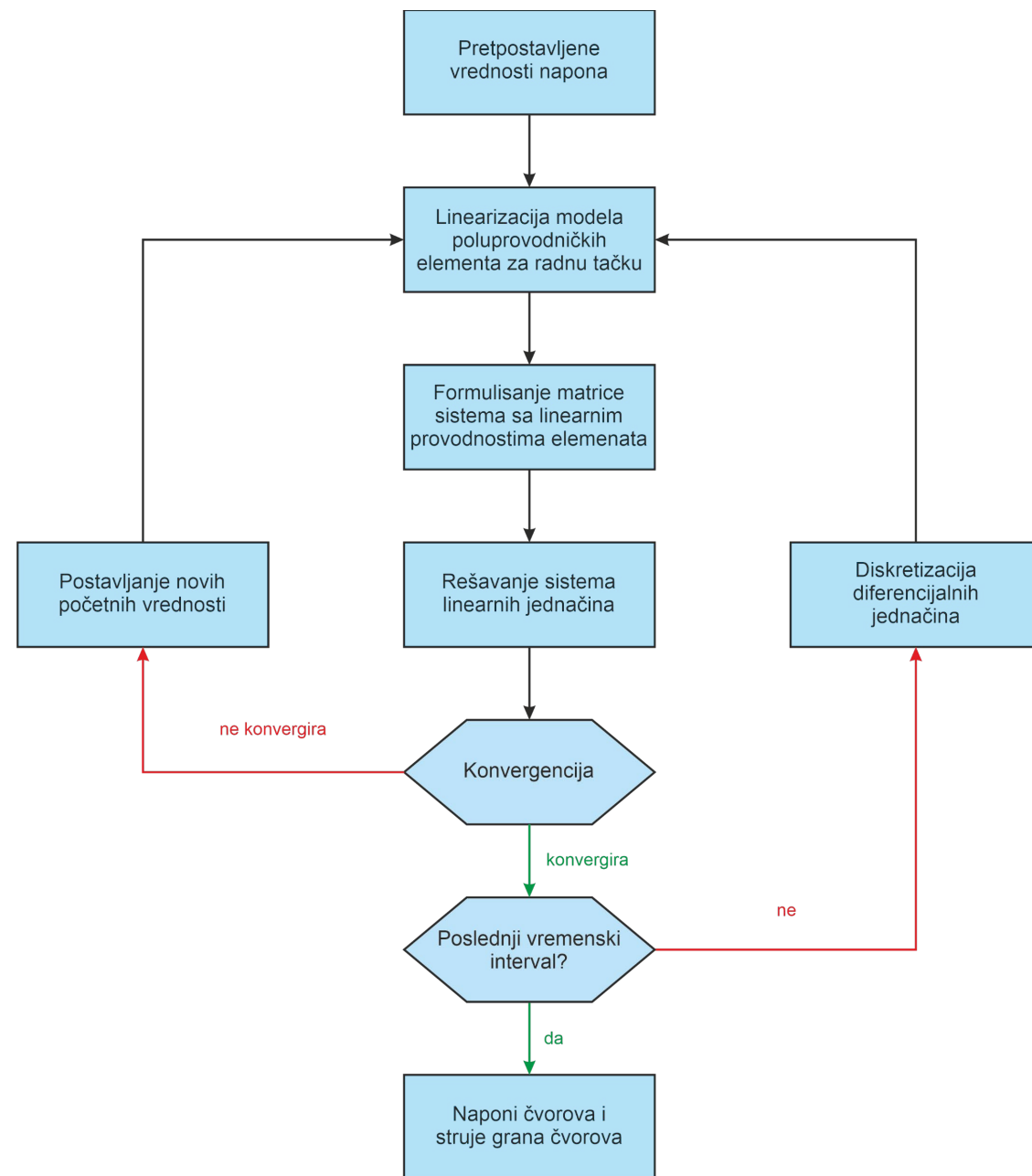
Analiza prelaznih režima

- U određenim slučajevima, iterativni postupak ne konvergira ka jedinstvenom rešenju. U tom slučaju, neophodno je poći od nove pretpostavke za vrednosti napona čvorova u kolu (unutrašnja petlja algoritma).
- Prilikom analize u vremenskom domenu, iterativni postupak se ponavlja za svaku tačku u vremenu (spoljna petlja algoritma) za zadato vreme simulacije.



Analiza prelaznih režima

- Solver za vremenski domen koristi metod numeričke integracije koji sistem običnih diferencijalnih jednačina (*Ordinary Differential Equations*, ODE) interpretira kao sistem nelinearnih algebarskih jednačina.
- Analiza u vremenskom domenu (koji je po svojoj prirodi kontinualan) se svodi na analizu niza kvazi-stacionarnih slučajeva (koji su diskretni, predstavljaju stanja u određenim instancama vremena u kojima se pretpostavlja da nema promena u kolu).



Algoritmi i metodi

Simulator kola koristi sledeće specifične algoritme:

- Algoritam za numeričku integraciju koji transformiše (diskretizuje) nelinearne diferencijalne jednačine u nelinearne algebarske jednačine. Standardno, SPICE koristi dva metoda drugog reda, **trapezni** i **višekoračni Gear-ov metod** za numeričku integraciju. Savremenije implementacije SPICE-a imaju solveere koji koriste i druge algoritme, kao što su metodi **Runge-Kutta** ili metod prediktor-korektor. Korisnik simulatora može da izabere željeni metod numeričke integracije.
- Algoritam za linearizaciju nelinearnih algebarskih jednačina. SPICE koristi modifikovan **iterativni Newton-Raphson-ov postupak**.

Algoritmi i metodi

- Sistem linearnih algebarskih jednačina koje opisuju električno kolo se rešava primenom operacija sa matricama. Broj jednačina u sistemu, odnosno dimenzija matrice sistema jednaka je broju čvorova kola čije napone je potrebno odrediti. Kako ovaj broj može biti izuzetno velik, potrebno je uvesti određene optimizacije.
- Matrica sistema je retka matrica (*sparse matrix*) – broj elemenata različitih od nule je mnogo manji od ukupnog broja elemenata matrice. Ovo je posledica same prirode električnih kola – pojedini čvorovi su povezani sa samo nekoliko drugih čvorova. Ova osobina matrice sistema omogućava efikasnu primenu tehnika **Gauss-ove eliminacije** i **LU dekompozicije** koje SPICE koristi za rešavanje sistema linearnih jednačina.

Opis kola

Prilikom opisa kola za simulaciju (formiranja net-liste) moraju se poštovati sledeća pravila:

- Kolo mora uvek da ima referentan čvor – masu, čija je oznaka 0. Naponi svih ostalih čvorova se izračunavaju u odnosu na masu.
- Svaki čvor u kolu mora biti povezan sa najmanje dva elementa; izuzetak su samo čvorovi vezani za neopterećene prenosne vodove.
- Svaki čvor u kolu mora imati konačnu odvodnost ka masi u jednosmernom režimu. (Za jednosmerni režim kondenzatori predstavljaju prekid, a kalemovi kratke spojeve.) Ovo pravilo sprečava pojavu plivajućih čvorova, za koje simulator ne može odrediti jednosmernu radnu tačku.

Opis kola

Kako SPICE koristi modifikovani metod potencijala čvorova za pronalaženje napona čvorova i struja kroz elemente koji su određeni samo naponom, kao što su idealni naponski generatori i kalemovi, moraju se poštovati i sledeća dva ograničenja:

- kolo ne može sadržati konturu koja se sastoji od idealnih naponskih generatora ili kalemova;
- kolo ne može sadržati granu koja se sastoji od idealnih strujnih izvora ili kondenzatora.

Prvo ograničenje je posledica Kirchhoff-ovog zakona za napone, a drugo Kirchhoff-ovog zakona za struje.

Elementi i modeli u opisu kola

- Topologija kola, opisi elemenata kola i modela elemenata predstavljaju suštinu opisa kola u procesu simulacije.
- Deklaracija elementa u opisu kola (net listi) sadrži informacije o povezivanju elementa sa drugim elementima (topologija kola), eksplicitno zadatu vrednost elementa (otpornost, kapacitivnost, induktivnost,...) ili referencu na model elementa koji se nalazi u biblioteci modela.
- Deklaracije modela neophodne su za definisanje parametara poluprovodničkih elemenata ili jednostavnijih kola ugrađenih u složenija (operacioni pojačavači, komparatori, itd).

Elementi i modeli u opisu kola

Element	Deklaracija	Model
GaAs MESFET	B	GASFET
Kondenzator	C	CAP
Dioda	D	D
Naponom kontrolisan naponski izvor	E	-
Strujom kontrolisan strujni izvor	F	-
Naponom kontrolisan strujni izvor	G	-
Strujom kontrolisan naponski izvor	H	-
Strujni generator	I	-
JFET tranzistor	J	NJF, PJF (n i p kanalni)
Spregnuti kalemovi	K	CORE
Kalem	L	IND

Elementi i modeli u opisu kola

Element	Deklaracija	Model
MOSFET	M	NMOS, PMOS
Bipolarni tranzistor	Q	NPN, PNP
Otpornik	R	RES
Naponom kontrolisani prekidač	S	VSWTCH
Prenosni vod	T	TRN
Naponski generator	V	-
Strujom kontrolisani prekidač	W	ISWITCH
IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor)	Z	NIGBT
Ostalo (operacioni p., komparator, ref. napon, kvarc, itd.)	X	SUBCKT

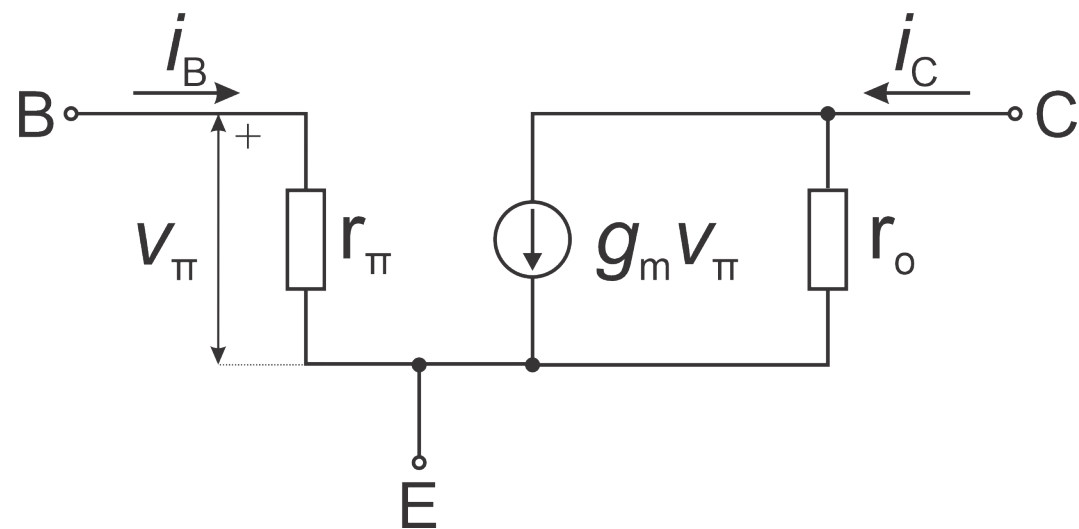
Modeli poluprovodničkih elemenata

- Modeli poluprovodničkih elemenata imitiraju njihovo ponašanje u kolu.
- Modeli se kreiraju na osnovu fundamentalnih fizičkih procesa u poluprovodniku (fizički modeli) ili na osnovu ponašanja same komponente u određenim uslovima (empirijski modeli). Empirijski modeli se često nazivaju i **kompaktni modeli**.
- Kompaktni modeli se dobijaju na osnovu merenja karakteristika samih elemenata ili simulacije fundamentalnih fizičkih procesa. Ovi modeli su manje precizni od fizičkih, ali su znatno brži, tako da se koriste u procesu simulacije.
- Kompaktni modeli se mogu predstaviti električnom šemom i skupom parametara. U opštem slučaju, određeni parametri modela ne moraju imati električnu prirodu.

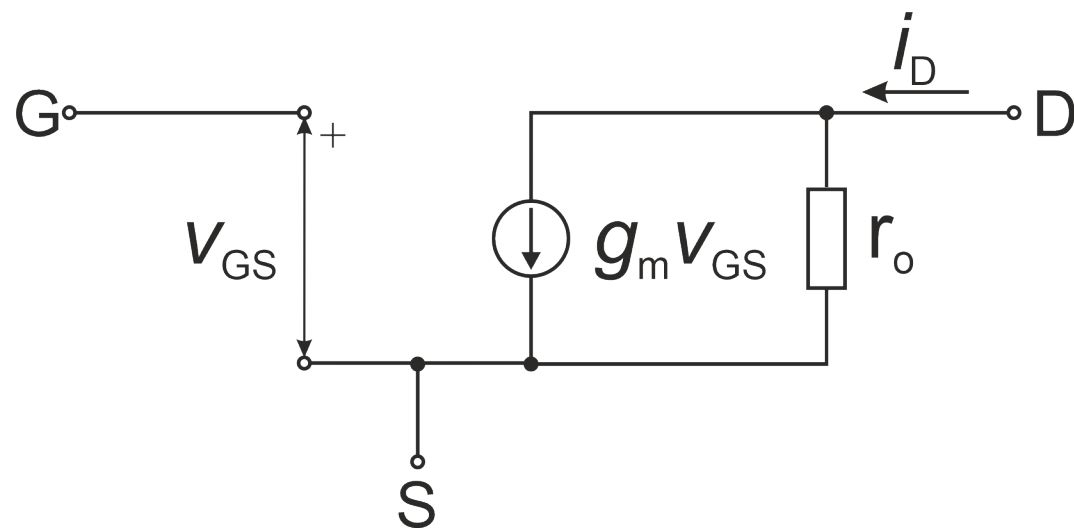
Modeli tranzistora

- Tranzistori su relativno jednostavni poluprovodnički elementi, ali ispoljavaju veoma kompleksno ponašanje (nelinearnost, različiti režimi rada, efekti na visokim frekvencijama,...). Da bi se analizirala kola koja koriste tranzistore, neophodno je modelovati fizičke pojave koje se manifestuju u njihovom radu pomoću modela.
- Postoji veliki broj različitih modela koji se razlikuju prema složenosti, broju parametara i nameni: hibridni π model (bipolarni i MOSFET tranzistor), model h parametara (bipolarni i MOSFET tranzistor), Ebers-Moll-ov model (bipolarni tranzistor), Gumel-Poon-ov model (bipolarni tranzistor).
- Za jednostavnu analizu kola sa bipolarnim tranzistorima u aktivnom režimu i kola sa MOSFET tranzistorima u režimu zasićenja, za signale malih amplituda, najčešće se koristi **hibridni π model**.

Hibridni π model tranzistora

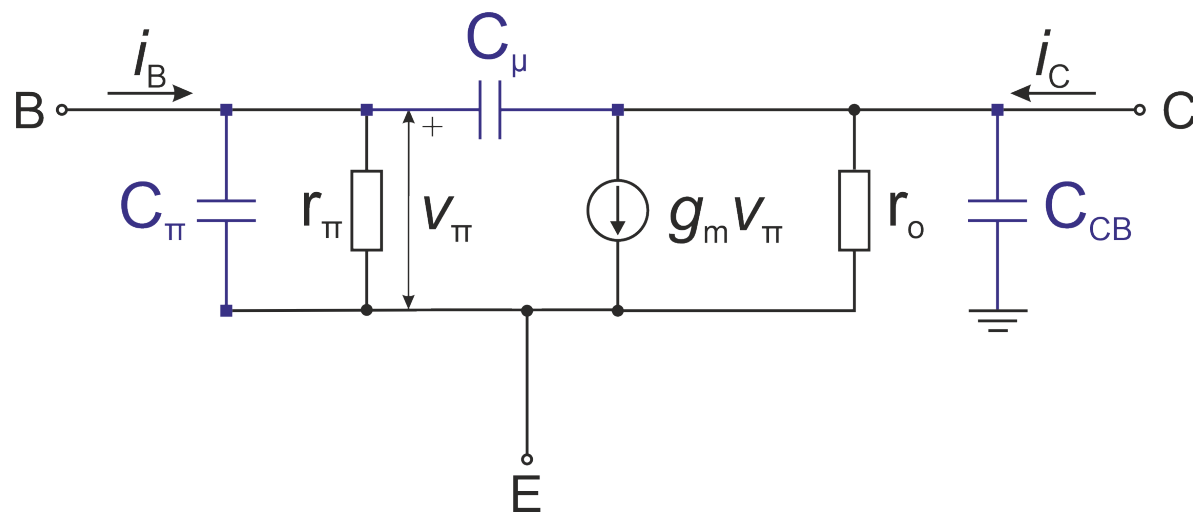


Bipolarni tranzistor

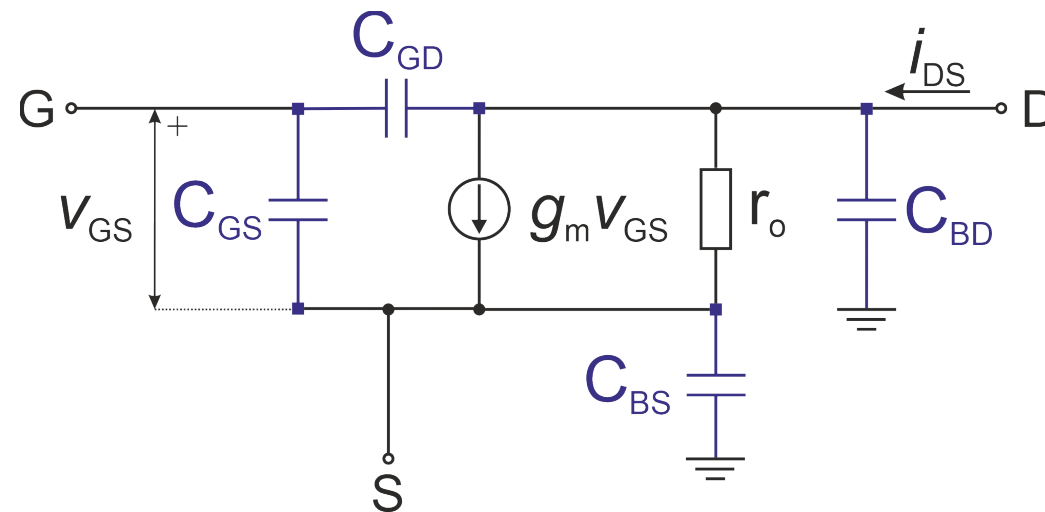


MOSFET

Hibridni π model tranzistora za visoke frekvencije

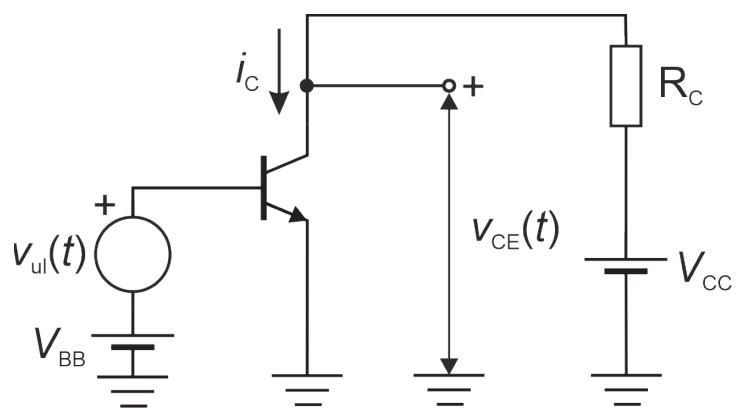


Bipolarni tranzistor

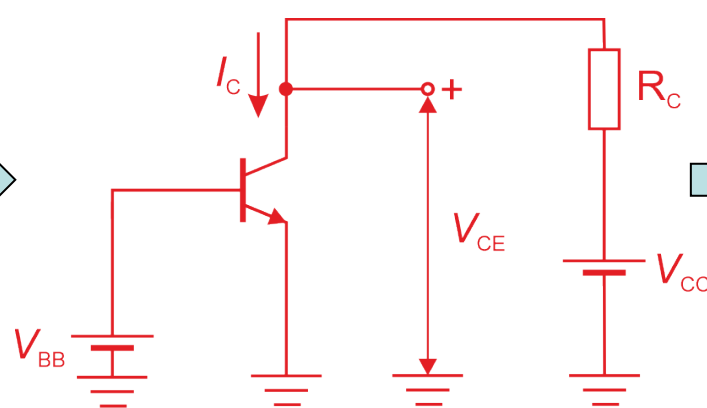


MOSFET

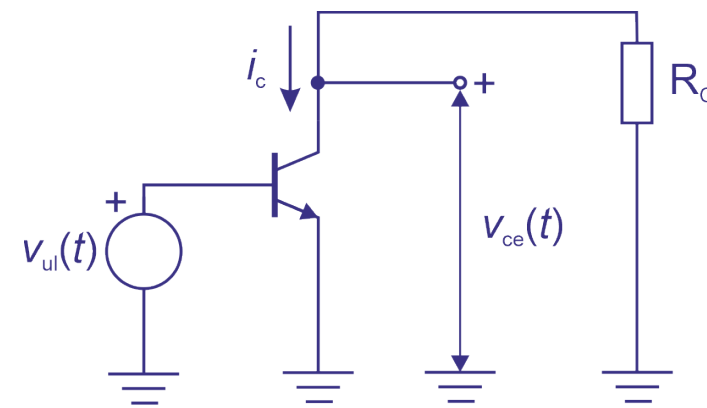
Simulacija kola pojačavača sa bipolarnim tranzistorom



Kolo pojačavača



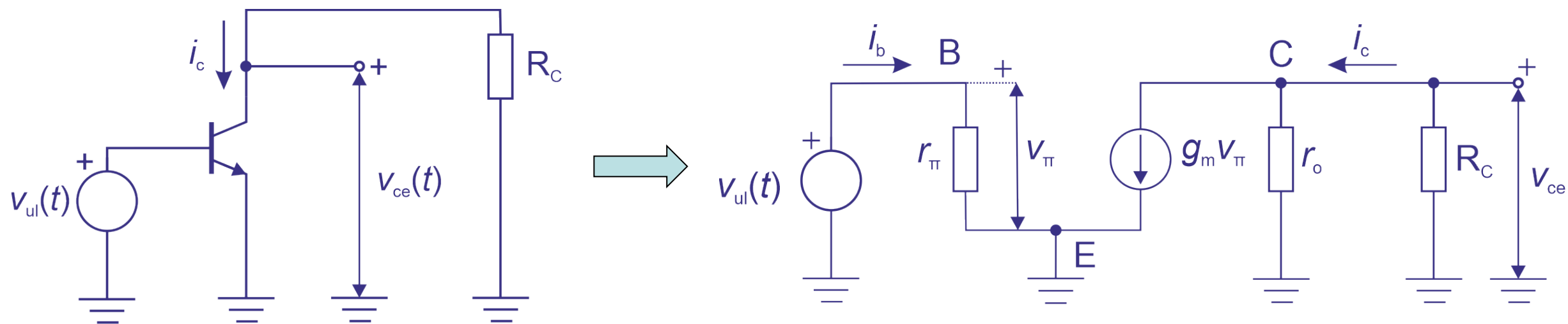
Jednosmerna
radna tačka



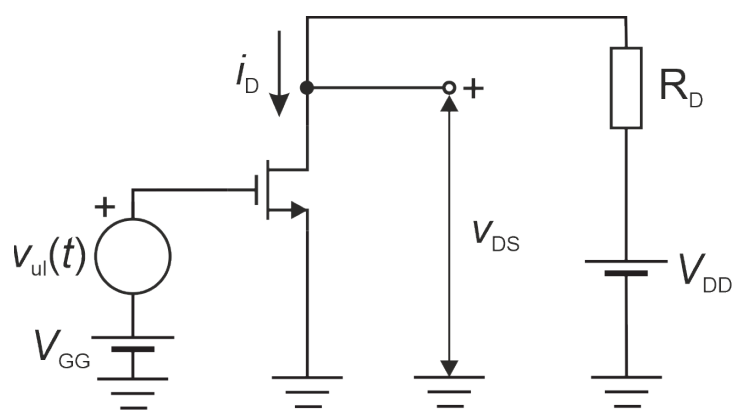
Kolo za simulaciju
naizmeničnog režima

Primena modela bipolarnog tranzistora

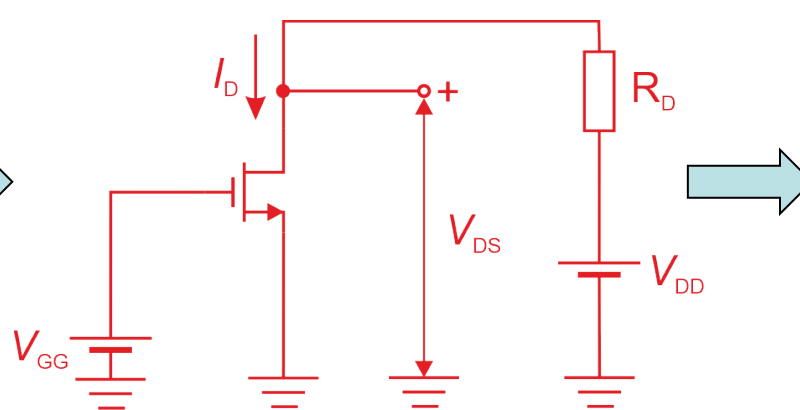
- Vrednosti parametara modela r_{π} , g_m i r_o zavise od jednosmerne radne tačke



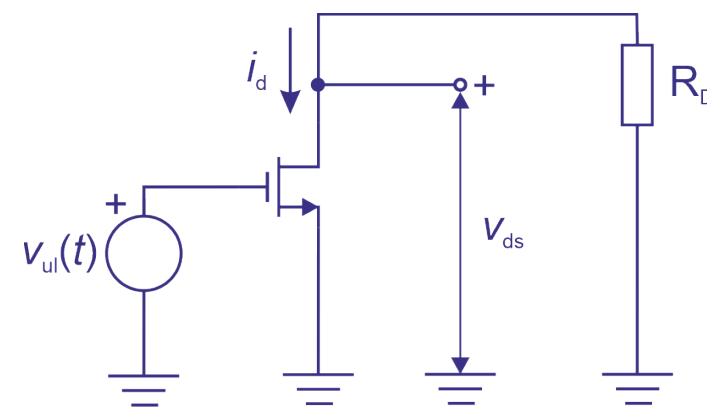
Simulacija kola pojačavača sa MOSFET-om



Kolo pojačavača



Jednosmerna
radna tačka



Kolo za simulaciju
naizmeničnog režima

Primena modela MOSFET-a

- Vrednosti parametara modela g_m i r_o zavise od jednosmerne radne tačke

