

3. Metódy analýzy nelineárnych a parametrických obvodov

Chovanie lineárnych obvodov je opísané lineárnymi rovnicami. Riešenie týchto rovníc je možné radom univerzálnych postupov, ktoré vždy vedú k cieľu.

Vo všeobecnosti chovanie nelineárnych a nelineárnych parametrických obvodov možno opísať sústavou nelineárnych diferenciálnych rovníc. V prípade nelineárnych obvodov neexistuje žiaden univerzálny postup riešenia. Na rozdiel od lineárnych obvodov neplatí princíp superpozície, t.j. odozvy na jednotlivé podnety sa nescítavajú, hoci sa súčasne významne ovplyvňujú.

Pri vyšetrowaní nelineárnych obvodov vo všeobecnosti riešime sústavu nelineárnych diferenciálnych rovníc prvého stupňa a sústavu nelineárnych algebraických rovníc. Túto sústavu označujeme ako sústavu stavových rovníc.

$$\frac{d[s(t)]}{dt} = [f([s(t)], [x(t)])] \quad (3.1)$$

$$[z(t)] = [F([s(t)], [x(t)])]$$

Jednotlivé matice možno vyjadriť nasledovne:

$$[z] = [s(t)] = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \cdot \\ s_n(t) \end{bmatrix}; [x] = [x(t)] = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \cdot \\ x_p(t) \end{bmatrix}; [z] = [z(t)] = \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ \cdot \\ z_m(t) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Prvkami matíc $[s(t)]$ a $[z(t)]$ sú prúdy v jednotlivých vetvách a napätia medzi uzlami vo vyšetrowanom obvode. Matica $[s(t)]$ je stavový vektor obvodu. Jednotlivé stavové veličiny $s_i(t)$ predstavujú prúd indukčnosťami obvodu a napätia na kondenzátoroch obvodu. Dôvodom prečo sú to práve tieto veličiny je to, že ich derivácie sú úmerné napätiu na príslušnej indukčnosti resp. prúde cez príslušný kondenzátor. Stavové veličiny určujú tiež okamžitú energiu viazanú príslušným akumulárnym prvkom.

$$w_L = \frac{Li^2}{2}$$

$$w_c = \frac{Cu^2}{2} \quad (3.3)$$

Vektor $[x(t)]$ predstavuje časovú závislosť budiacich nezávislých napäťových a prúdových zdrojov vyšetrowaného nelineárneho obvodu. Ďalšie elektrické veličiny predstavované prvkami $z(t)$ vektora $[z(t)]$ sú prúdy alebo napätia na nezotrvačných prvkoch obvodu. Tieto veličiny sú závislé od stavových $[s(t)]$ a budiacich veličín $[x(t)]$ obvodu. Nelineárne závislosti v sústave diferenciálnych a algebraických rovníc sú spôsobené nelinearitami obvodu. Riešenie týchto rovníc analytickými metódami je obvykle veľmi zložitá a často neznáme. Pre analýzu preto musíme použiť približné metódy. Tieto delíme na:

1. grafickovýpočtové metódy
2. analytické metódy
3. numerické (počítačové) metódy

Prvé dve z metód sú výhodné pri kvalitatívnej analýze obvodu, umožňujú nám poznať vplyv usporiadania a jednotlivých prvkov obvodu na jeho výsledné chovanie. Pri numerických metódach existuje rad hotových programových súborov určujúcich odozvy zložitých nelineárnych obvodov na rôzne typy budiacich signálov. Tu je možné študovať vplyv jednotlivých prvkov len metódou opakovaných výpočtov pre rôzne hodnoty prvkov. Tento postup ale zahmlieva podstatu funkcie jednotlivých prvkov v obvode. Pri štúdiu vlastnosti jednotlivých obvodov budeme používať metódy 1. a 2., hoci s menšou presnosťou a k prevereniu chovania konkrétneho navrhnutého obvodu použijeme niektorý program z 3. skupiny metód. V našom prípade sa budeme zameriavať na program SPICE s podpornými súbormi OrCAD a PROBE.

V istých špecifických prípadoch aj pre analýzu nelineárnych obvodov využívame princíp obdobný princípu superpozície. Obvod ktorý spracováva harmonický signál analyzujeme v dvoch krokoch:

V prvom kroku vyšetrujeme jednosmerné elektrické veličiny v obvode vplyvom napájacích napätí. Pri tejto analýze považujeme kondenzátory za rozpojený obvod a indukčnosť za skrat. Polovodičové prvky nahradzujeme ich nelineárnymi náhradami. Jednosmernou analýzou tohto nelineárneho obvodu určíme jednosmerné prúdy a napätia ,ktoré predstavujú pracovný bod príslušného obvodu.

Pre tento pracovný bod určíme linearizovaný náhradný obvod kde aktívne prvky nahradíme ich lineárnymi prírastkovými modelmi. Indukčnosti považujeme za rozpojený dvojpól a kondenzátory za skrat. Takáto náhradná schéma je označovaná ako signálová schéma. Pre takýto obvod určíme potom prenosové striedavé parametre pre malý signál.

Tento približný postup je možný len v prípade ,že hodnota budiaceho prírastkového signálu je malá. Tiež nedáva žiadne informácie o efektoch charakteristických pre nelineárne obvody (zmiešavací zisk, skreslenie, amplitúdy vyšších harmonických a pod.). Takúto metódu používame pre vyšetovanie chovania predzosilňovačov. Tam obvykle zmena pracovného bodu slúži k riadeniu zosilnenia, a vstupný signál má tak malú amplitúdu, že jeho skreslenie je zanedbateľné.

3.1. Grafickovýpočtové metódy

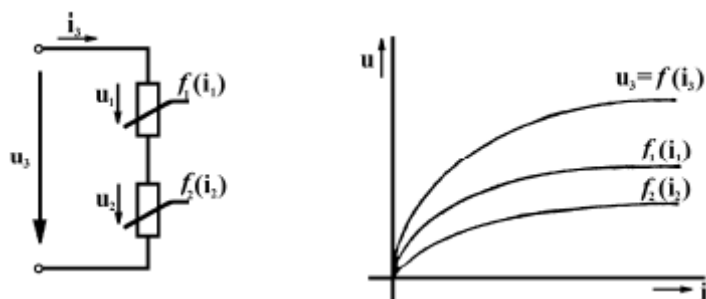
Tato metóda je vhodná pre štúdium jednoduchých nelineárnych obvodov. Klodom je jej názornosť. Vďaka jednoduchosti môžno podľa nej odhaliť typické javy v nelineárnych obvodoch. Záporom je jej pracnosť a malá presnosť. Výsledok takejto analýzy nie je v obecnom tvare. Preberme si použitie takejto metódy pre nasledujúce prípady:

A).Nelineárne a parametrické obvody nultého rádu (iba odporové prvky a zdroje el. energie).

Základný postup pri riešení obvodu je:

1. Lineárnu časť obvodu nahradiť ekvivalentným zdrojom napätia alebo prúdu.
2. Nelineárnu časť obvodu postupne zjednodušíme až na jediný nelineárny rezistor.
3. Po týchto zjednodušeníach obvod graficky riešime.

Výsledné charakteristiky dvojpólov zložených z niektorých prvkov pri kroku 2. určíme na základe nasledujúcich úprav.



Obr.3.1 Sériové radenie dvoch nelineárnych dvojpólov

Dva rezistory v sérii s charakteristikou $u = f(i)$ a $u = f(i)$. Pri spojení týchto prvkov do série použijeme grafickú konštrukciu vychádzajúcu z nasledujúcich rovníc:

$$i_c = i_1 = i_2$$

$$u_c = u_1 + u_2 = f_1(i_c) + f_2(i_c) = f(i_c) \quad (3.4)$$

Dva rezistory zapojené paralelne s charakteristikami

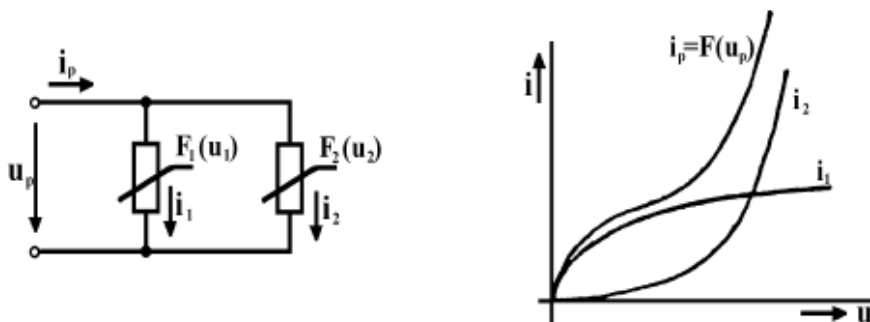
$$i_1 = F_1(u_1)$$

$$i_2 = F_2(u_2) \quad (3.5)$$

Pre výslednú charakteristiku platia rovnice:

$$u_p = u_1 = u_2$$

$$i_p = i_1 + i_2 = F_1(u_p) + F_2(u_p) = F(u_p) \quad (3.6)$$



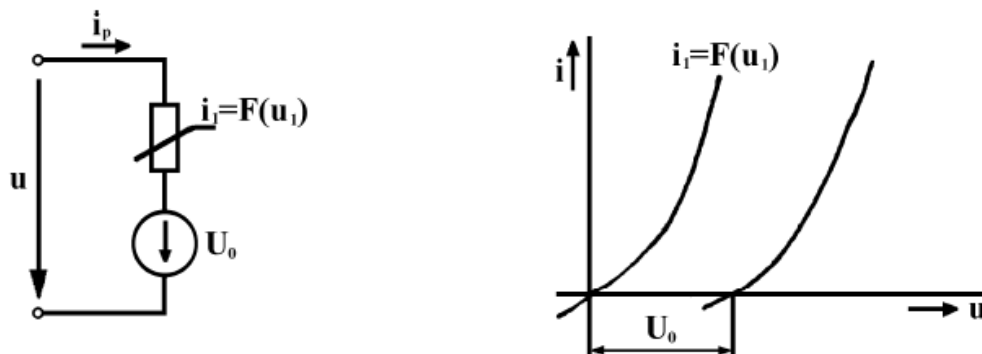
Obr.3.2. Paralelné radenie dvoch nelinearit

Grafické riešenie výslednej závislosti je na obr.3.2.

Zdroj jednosmerného napätia v sérii s nelineárnym rezistorom. Charakteristika nelineárneho odporu je posunutá v smere napät'ovej osi o hodnotu U v súlade s rovnicami (3.4) obr.3.3.

$$i = i_1; u_1 = u - U_0$$

$$i = F(u) = F(u_1 - U_0) \quad (3.7)$$



Obr.3.3 Sériové radenie nelineárneho prvku s napät'ovým zdrojom

V prípade sériového radenia nelineárneho dvojpólu s lineárnym odporom sa výsledný graf získa sčítavaním napätí pre konštantný prúd. Vychádza to z II Kirchhoffového zákona. Ak nelineárny prvok je radený paralelne s lineárnym odporom sa výsledná krivka získa na základe I. Kirchhoffového zákona grafickým sčítavaním prúdov pre konštantné napätia. (Obr.3.5). Kvalitatívne zhodnotenie oboch grafov vedie k jednému záveru, ktorý sa dosť často využíva v praktických riešeniach lelektronických obvodov. Zaradenie lineárneho rezistora do série s nelinearitou alebo pralelene k nelineárnemu dvojpólu má za následok, že krivosť výslednej charakteristiky je menšia a tým aj výsledné skreslenie signálu bude znížené.

Pri paralelnom pripojení prúdového zdroja I_0 je potrebné nelineárnu charakteristiku posunúť v smere osi prúdu. o hodnotu odpovedajúcu prúdu I_0 .

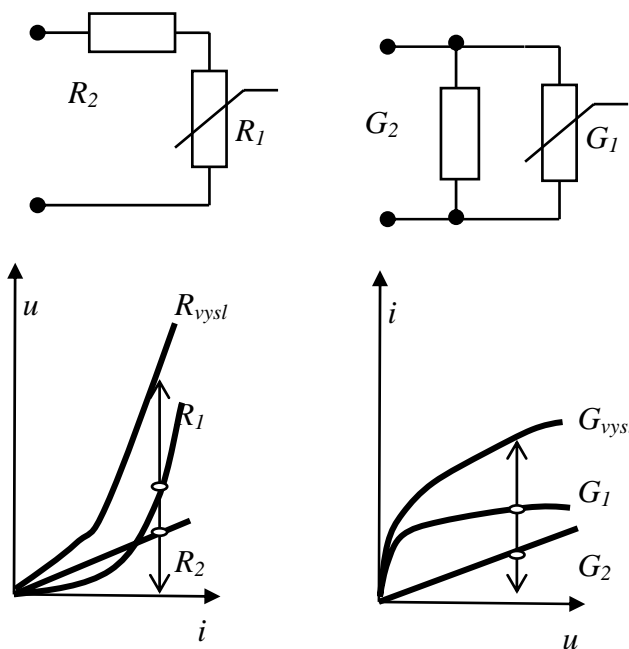
Výsledný pracovný bod nezotrvačného obvodu s výslednou nelineárnou charakteristikou (získanou v kroku 2) od zdroja elektrickej energie dostaneme grafickým riešením sústavy rovníc (3.5.a). Svorkové napätie u zdroja elektrickej energie reprezentovaného napät'ovým zdrojom je

$$u = U_0 - R_0 i$$

,kde i je prúd výslednou nelineárnou charakteristikou $i = F(u)$

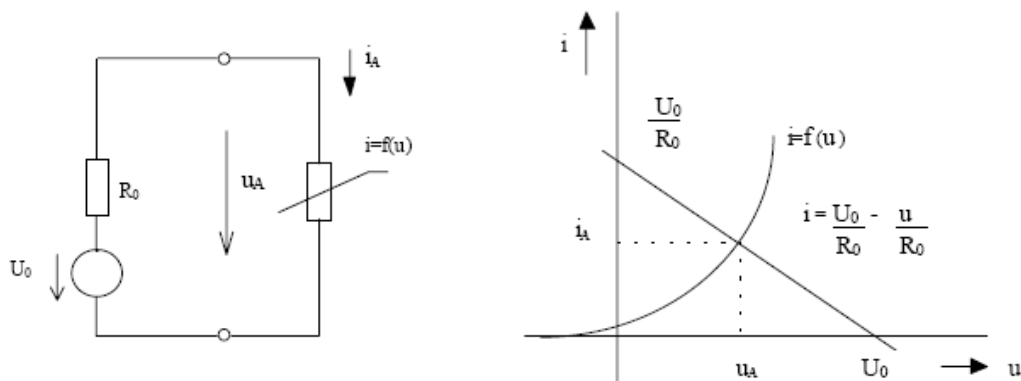
$$u = U_0 - R_0 \cdot i$$

$$i = F(u) \quad (3.8)$$



Obr.3.5 Grafické riešenie sériového a paralelného radenia nelineárneho dvojpoľu s lineárnym

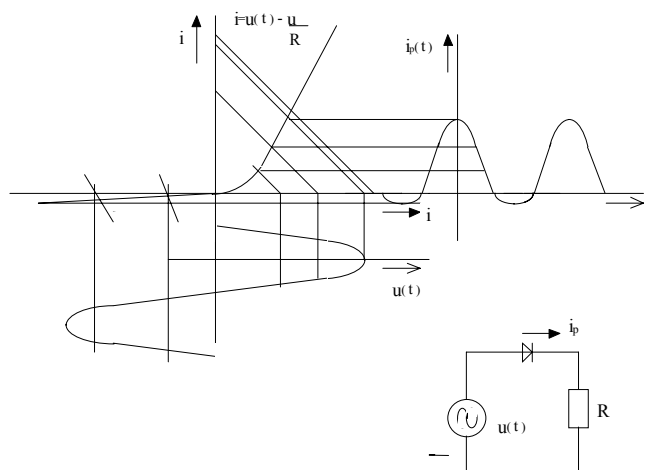
Pracovný bod je určený priesečníkmi týchto kriviek u_A , i_A obr.3.6.



Obr.3.6 Grafické určenie pracovného bodu nelineárnej záťaže a napät'ového zdroja s vnútorným odporom

Grafické riešenie obdobného obvodu pri budení striedavým signálom získame nasledujúcim postupom. Tvar výstupného priebehu určíme z charakteristiky bod po bode analogicky ako v predchádzajúcom prípade s tým rozdielom, že napätie U_0 bude nahradené okamžitou hodnotou napätia $U(t)$ obr. 3.7.

Z odvodeného grafického priebehu môžeme dosť ľahko určiť špičkové hodnoty vyšetřovaných veličín. Pomocou metód grafickej spektrálnej analýzy aj jednosmernú zložku I_{D0} a prvú I_{D1} resp. vyššie I_{Dn} harmonické. Tento postup je ale značne pracný a dosť nepresný.



Obr. 3.7. Určenie výsledného skresleného priebehu na záťaži napájanej cez nelineárny prvok.

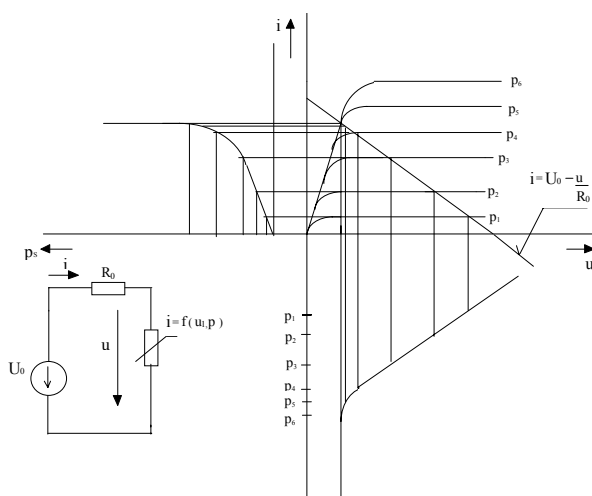
Grafické riešenie obvodu s parametricky riadeným rezistorom dostaneme následovne. Sústavu rovníc:

$$i = F(u_1, p)$$

$$i \cdot R + u_1 = U_0$$

(3.9)

riešime graficky pre rôzne hodnoty parametra p bod po bode tak ako to bolo pre prípad jednoduchej nelinearity



Obr. 3.8. Určenie závislosti výstupnej veličiny napájanej cez nelineárny parametrický obvod od parametra

Grafické riešenie dynamických obvodov s nelinearitou je pomerne zložitú. Pri existujúcej možnosti počítačovej analýzy pre svoju zložitú stráca svoj zmysel. Čitateľ najde podrobnosti v [1].

3.2. Analytické metódy

Ako bolo povedané na začiatku nemožno univerzálne aplikovať jednu analytickú metódu na všetky typy problémov. Opíšme si niektoré z použiteľných analytických postupov.

- A. **Metóda linearizácie rovníc.** Podstata je v aproximácii charakteristík nelineárneho prvku niekoľkými na seba naväzujúcimi priamkovými úsekmi. To umožní prejsť od nelineárnej rovnice k niekoľkým lineárnym diferenciálnym rovniciam, ktoré sa obvykle líšia iba hodnotami koeficientov. V miestach stykov sa počiatkové podmienky volia tak, aby jednotlivé riešenia na seba naväzovali - "metóda zašívania". Výhoda tejto už dnes málo použíwanej metódy spočíva v tom, že obvod je opísaný sústavou lineárnych rovníc. Nevýhodou je značný nárast zložitosti pri viacerých úsekoch.
- B. **Metóda pomaly sa meniacej amplitúdy.** Je vhodná pri vyšetrení prechodových javov v nelineárnych obvodoch so selektívnymi vlastnosťami (obvody kde prvá harmonická zložka signálu výrazne prevláda nad ostatnými harmonickými zložkami). Ich význam je tlmený selektívnymi vlastnosťami zaťažovacích resp. prenosových impedancií. Kvalita týchto rezonančných obvodov musí byť dostatočne vysoká. Táto podmienka je ale jediná technicky rozumná podmienka a je preto v reálnych technických systémoch splnená.

Predpokladáme, že amplitúda kmitov sa mení dostatočne pomaly vzhľadom k perióde kmitov. Rád DR znížime tým, že nehľadáme časovú zmenu okamžitých hodnôt kmitov ale len časovú zmenu amplitúdy kmitov.

- C. **Kvazilineárna metóda.** Je najčastejšie používanou metódou pri kvalitatívnych odhadoch chovania sa selektívnych nelineárnych obvodov druhého rádu pracujúcich v ustálenom režime.

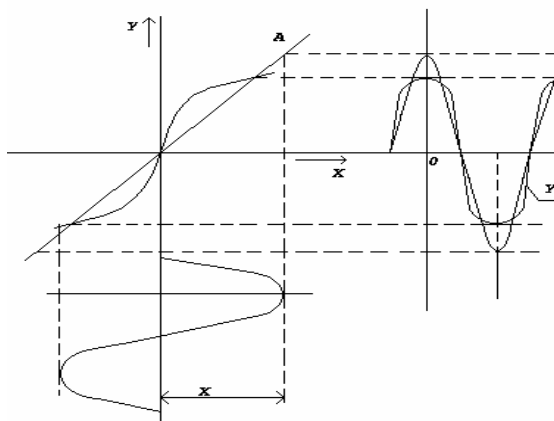
Podstatou je zámena nelineárneho prvku určitým lineárnym prvkom ktorého parameter (napr. hodnota odporu lineárneho rezistora) sa mení v závislosti od amplitúdy prechádzajúceho prúdu alebo pôsobiaceho napätia. V ustálenom stave (konštantná amplitúda) sa taký nelineárny prvok chová ako prvok lineárny s konštantným parametrom. K tomu potrebujeme poznať náhradné stredné veličiny tohoto dvoj pólu, ktoré určené pre prvú harmonickú zložku. Ich definícia vychádza z pomeru amplitúd prvých harmonických zložiek elektrických veličín. Potom máme nelineárny obvod opísaný lineárnymi rovnicami. Nelineárnosť sa prejavuje v nelineárnej závislosti stredného parametra na amplitúde príslušnej elektrickej veličiny. Hodnotu stredného parametra určujeme tak, aby náhradný lineárny prvok spôsobil ekvivalentný účinok ako nahradzovaný nelineárny prvok. Podľa druhu veličiny pre ktorú požadujeme ekvivalenciu účinku, nahradzujeme nelineárny prvok na základe týchto princípov:

I. Ekvivalencia prvkov na základe harmonickej rovnováhy.

Stredný parameter nelineárnych prvkov pre základné harmonické zložky elektrickej veličiny bude v tomto prípade definovaný ako pomer

$$P_s(X_1) = \frac{Y_1}{X_1} \quad (3.10)$$

Kde Y_1 je prvá harmonická zložky závislej veličiny $y(t)$ k amplitúde X nezávislej harmonickej veličiny $x(t)$. Amplitúdy Y_1 vyšetříme jednou z metód harmonickej analýzy. (obr.3.7)



Obr. 3.7 Určenie stredných parametrov zo skresleného signálu

Pre prípad nelineárneho rezistora s charakteristikou $u(i)$ za podmienky budenia harmonickým prúdovým zdrojom $i(t)=I_1 \cos \omega t$ určíme ekvivalentný odpor nasledujúcim postupom :

Prvá harmonická napätia je určená integrálom

$$U_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(I_1 \cos \alpha) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \quad (3.11)$$

Pomer prvej harmonickej výstupného napätia U_1 k amplitúde budiaceho prúdu I_1 určuje strednú hodnotu odporu

$$R_s = \frac{1}{\pi \cdot I_1} \int_0^{2\pi} u(I_1 \cos \alpha) \cos \alpha \cdot d\alpha \quad (3.12)$$

Príklad: Vypočítajme strednú hodnotu odporu pre nelineárny rezistor s charakteristikou

$$u(i) = a_1 i + a_3 i^3 \quad (3.13)$$

Jednotlivé harmonické zložky určíme priamo po umocnení budiaceho prúdu

$$i = I_1 \cos \omega \cdot t \quad (3.14)$$

Potom ekvivalentný stredný odpor z pomeru prvej harmonickej napätia U_1 k prúdu I_1 je

$$R_s(I_1) = a_1 + \frac{3}{4} a_3 I_1^2$$

II. Ekvivalencia prvkov na základe energetickej rovnováhy.

Podľa tohto princípu musí byť stredný výkon odovzdaný zdrojom do nelineárneho a ekvivalentného lineárneho rezistora rovnaký. Veličinou ktorá musí byť v náhradnom lineárnom rezistore ekvivalentnou k nelineárnemu prvku je energia. Pre prípad rezistora s charakteristikou $u(i)$ je stredný výkon spotrebovaný rezistorom

$$P_E = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i \cdot u(i) d\alpha = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_1 \cos \alpha \cdot u(I_1 \cos \alpha) d\alpha = \frac{1}{2} R_s \cdot I_1^2 \quad (3.15)$$

Ekvivalentný odpor R_s spotrebuje stredný výkon P_E určený tiež aj vzťahom (3.29)

$$R_s = \frac{1}{I_1 \pi} \int_0^{2\pi} u(I_1 \cos \alpha) \cos \alpha \cdot d\alpha \quad (3.16)$$

Klasickou úlohou využívajúcou princíp energetickej rovnováhy je určenie ekvivalentného zaťažovacieho odporu R_{ekv} pre sériový a paralelný usmerňovač s ideálnou diódou. obr.3.10a a 3.10b



Obr.3.8 Sériový a paralelný usmerňovač

Výkon spotrebovaný ideálnou diódou je vždy nulový. (Pri uzavretí je prúd diódou nulový $I_D=0$, pri otvorení je naopak napätie diody nulové $U_D=0$. Potom výkon $P_D=U_D I_D=0$). V prípade sériového usmerňovača výkon spotrebovaný záťažou je určený len činným výkonom záťaže R_2 . Výkon je určený vzťahom:

$$P_E = \frac{U_1^2}{R_2} \quad (3.17)$$

Výkon spotrebovaný ekvivalentným odporom musí byť zhodný

$$P_E = \frac{U_1^2}{2 \cdot R_{ekv}} \quad (3.18)$$

Porovnaním dostaneme hodnotu ekvivalentného odporu

$$R_{ekv} = \frac{R_2}{2} \quad (3.19)$$

V prípade paralelného zapojenia je stredný výkon spotrebovaný záťažou R_2 v obvode usmerňovača:

$$P_E = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \frac{[U_1(1 - \cos \omega \cdot t)]^2}{R_2} dt = \frac{3U_1^2}{2R_2} \quad (3.20)$$

Ekvivalentný odpor musí mať rovnakú spotrebu

$$P_E = \frac{U_1^2}{2R_{ekv}} \quad (3.21)$$

Porovnaním výkonov dostaneme hodnotu statického náhradného odporu paralelného usmerňovača

$$R_{ekv} = \frac{R_2}{3} \quad (3.22)$$

Princíp harmonickej rovnováhy možno použiť aj na ekvivalentnú linearizáciu nelineárnych akumulčných prvkov.

3.3 Numerické metódy

Pri analýze nelineárneho obvodu s akumulčnými prvkami najčastejšie vychádzame z opisu sústavy pomocou nelineárnych diferenciálnych rovníc 1.stupňa - stavových rovníc (3.1). Tieto môžeme rozpísať

$$\begin{aligned} \frac{ds_1}{dt} &= f_1(s_1, s_2, \dots, s_N, x_1, x_1, \dots, x_M) \\ \frac{ds_2}{dt} &= f_2(s_1, s_2, \dots, s_N, x_1, x_1, \dots, x_M) \\ &\dots \\ \frac{ds_N}{dt} &= f_N(s_1, s_2, \dots, s_N, x_1, x_1, \dots, x_M) \\ [z_j(t)] &= [F([s_i(t)], [x(t)])] \end{aligned} \quad (3.23)$$

Znamená to, že ak bude známy priebeh stavových veličín $[s_i(t)]$ zo sústavy zvyšné veličiny $[z_j(t)]$ vypočítame z sústavy nelineárnych algebraických rovníc.

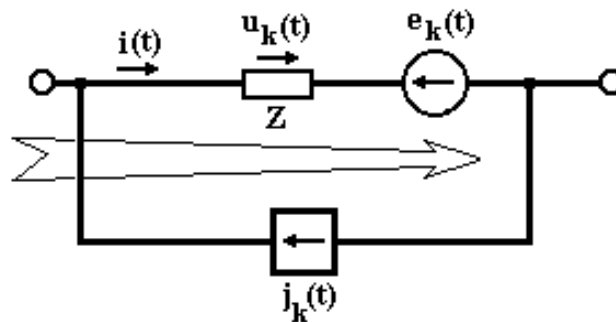
Riešenie sústavy diferenciálnych rovníc prvého stupňa je založené na numerickej integrácii. Najjednoduchším postupom je Adamsová metóda ,kedy zo znalosti derivácií $d[s_i(t)]/dt$ jednotlivých stavových veličín v časovom okamihu t_0 a časového kroku Δt sa vypočíta hodnota riešenia $[s_i(t_0 + \Delta t)]$. Hodnota derivácie sa získa z pravej strany sústavy $d[s_i(t)]/dt \Big|_{t_0} = [f_i([s_i(t_0)], [x(t_0)])]$. Hodnota riešenia v ďalšom kroku je $[s_i(t_0 + \Delta t)] = [s_i(t_0)] + (d[s_i(t)]/dt) \cdot \Delta t$. Vyššej presnosti sa dosiahne použitím iných algoritmov integrácie akými sú napr. metóda Runge-Kutt.

Stavové premenné $s_1, s_2 \dots s_N$ predstavujú súradnice tzv. zastupujúceho bodu v N rozmernom stavovom priestore. Každému bodu tohto priestoru odpovedá určitý stav obvodu charakterizovaný súhrnom okamžitých hodnôt obvodových veličín t.j. stavových premenných. Deje ktoré v obvode prebiehajú, možno chápať ako časovú postupnosť jednotlivých stavov a obrazom týchto dejov v stavovom priestore je potom stavová trajektória (t.j. krivka v N -rozmernom priestore).

Postup pri opise obvodu metódou stavových premenných.

Programy pre počítačovú analýzu elektronických obvodov na základe nákresu schémy v programovom prostredí CADENCE vytvoria jeho vnútorný opis pre potreby analýzy metódou stavej premennej. Tento prepis pozorstáva z týchto krokov

1. Transformácia schémy obvodu na orientovaný graf kde jednotlivé dvojpóly obvodu vytvoria vetve grafu. Za jednu štandardnú vetvu považujeme vetvu s orientáciou obr. 3.11.1. Budiaci zdroj signálu tvorí tiež jednu vetvu a on dodáva energiu do sústavy tak aby riešenie bolo nenulové.



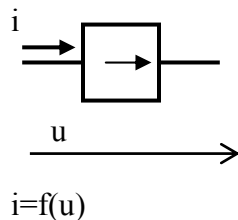
Obr. 3.9. Štandardná orientovaná vetva

2. Vytvoríme orientovaný graf obvodu. V ňom orientáciami sú smery štandardnej orientovanej vetvy. Graf pozostáva vetiev stromu a tetív. Podgraf vetiev stromu je tvorený takými vetvami ktoré sú vzájomne spojené a prepojujú všetky vrcholy (uzly) grafu bez toho aby tvorili slučku. Tým sa vyberie minimálny počet vetiev pre ktorých prúdy platí I. Kirchhoffov zákon. Zvyšné vetve grafu tvoria tetivy a určujú minimálny počet lineárne nezávislých vetví ktorých napätia sú určené II Kirchhoffovým zákonom.

Orientovaný graf sa očísľuje tak, aby boli splnené podmienky prednostného zaradenia kapacitorov do vetiev stromu a induktorov do tetív stromu. Táto podmienka sa dá pre všetky obvody splniť.

3. Nelineárne prvky sa charakterizujú ako funkčne závislé riadené zdroje signálu, ktorých chovanie je zaregistrované v knižnici prvkov alebo v užívateľom vytvorenom podprograme. Tak možno opísať nielen mnohopól ale aj dvojpól. V prípade dvojpólu ako riadeného prúdového zdroja je jeho činnosť riadená napätím na

ňom samotnom. (dióda $I_D = I_S \exp(U_{DQ}/kT)$). Tieto zdroje zaradíme medzi zdroje signálu budiace vyšetovaný obvod..



Obr.3.10 Napätím riadený nelineárny prúdový zdroj

4. Ďalšou požiadavkou ktorú zohľadňujeme pri vytváraní grafu je to, že nezávislé a riadené napät'ové zdroje zaradíme do tetív stromu a nezávislé a riadené prúdové zdroje do vetiev stromu. Ak túto podmienku nie je možné splniť automaticky musíme zdroje transfigurovať. Znamená to presunúť napät'ový zdroj za uzol a odstrániť prúdový zdroj z vetvy grafu.

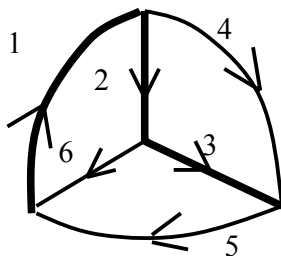
5. Na záver očísľujeme vetve grafu tak, že nižšími číslami v poradí očísľujeme vetve stromu a vyššími tetivy stromu.

6. Pomocou Kirchoffových zákonov určíme úplnú maticu obvodu. Úplná matica obvodu je tvorená rovnicami ktoré dostaneme štandardným postupom.

Pre každú vetvu stromu navrhne taký rez, aby tento bol vedený iba cez jednu, vyšetřovanú vetvu stromu a zvyšné tetivy (spojky) grafu. Zostavíme rovnice podľa prvého Kirchoffového zákona. Prúd vo vetve stromu bude určený ako lineárna kombinácia prúdov tetív grafu, medzi nimi aj stavovými veličinami predstavujúcimi prúd cievkou. Prúd na vyšetřovanej vetve stromu môže byť určený deriváciou stavovej veličiny-napätím kapacitára $i=Cdu/dt$.

Pre každú tetivu stromu navrhne takú slučku aby prechádzala jedinou, vyšetřovanou tetivou stromu a uzatvárala sa len po vetvách stromu. Napätie na tetive stromu je potom určené ako lineárna kombinácia napätí na vetvách stromu medzi nimi stavovými veličinami predstavujúcimi napätie kondenzátora. Napätie na vyšetřovanej tetive môže byť vyjadrené deriváciou stavovej veličiny – prúdom induktora $u=Ldi/dt$.

Tak sa získa opis obvodu minimálnou sústavou algebraických rovníc podľa I a II Kirchoffového zákona bez toho, že by medzi nimi boli rovnice lineárne závislé. Príkladom najčastejšieho je opis charakterizujúci chovanie veličín jednotlivých vetví grafu:



Obr.3.11 Orientovaný graf obvodu

$$\begin{aligned}
 i_1 &= i_6 + i_5 \\
 i_2 &= i_5 - i_4 \\
 i_3 &= i_6 + i_5 - i_4 \\
 u_4 &= u_2 + u_3 \\
 u_5 &= -u_1 - u_2 - u_3 \\
 u_6 &= -u_1 - u_3
 \end{aligned}
 \Rightarrow \text{maticovo}
 \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Matica na pravej strane má diagonálne podmatice nulové. Celková matica je označovaná ako incidenčná matica lebo opisuje orientácie vetiev.

Ak doplníme sústavu ešte šiestimi rovnicami opisujúcimi napätie resp. prúd na každej vetve od jeho prúdu resp. napätie na nej samotnej podľa Ohmovho zákona. Niektoré z týchto vzťahov môžu predstavovať nelineárne funkčné závislosti. Takto sa za získa 12 rovníc pre 12 neznámých. Zo sústavy 12 rovníc je možné vybrať podsústavu diferenciálnych rovníc prvého rádu len pre stavové veličiny. Zvyšné rovnice budú tvoriť sústavu algebraických rovníc určujúcich závislé veličiny ako funkcie stavových a budiaciach veličín.

Moderné programové balíky pre analýzu obvodu SPICE, Workbench, STAPRO využívajú tento princíp s tým, že užívateľ je odbremený od pracných a na chyby náchylných krokov 1 až 6. Programy samé zo schémy obvodu nakreslenej v programe .sch vygenerujú graf a všetky potrebné rovnice. Pre takto zapísaný obvod uskutočnia riešenie rovníc príslušným algoritmom. Pre podrobnejšie štúdium metód analýzy obvodov pomocou orientovaných grafova slúžia čitateľovi pramene [4],[24].

Podrobnosti o programovacom prostredí OrCAD najde čitateľ v manuáloch dostupných na <http://www.cadence.com/orcad/> alebo v učebnici “ Experimenty v simulačnom prostredí PSpice” dostupnej poslucháčom Fakulty elektrotechniky a informatiky Technickej Univerzity v Košiciach

http://www.kemt.feit.tuke.sk/Predmety/KEMT201_ZE/_materialy/