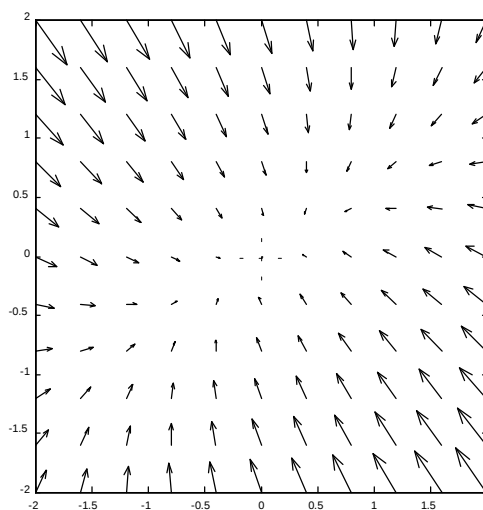


Souvislosti DC - obecná stabilita

Z definice DC stability plyne, že DC stabilní bod může být destabilizován přidáním vnějších reaktančních součástí, DC nestabilní bod zase nemůže být žádným takovým rozšířením stabilizován. V tomto pojednání jsme uvažovali o způsobech, jak postihnout právě DC nestabilitu.

Na obr.8 je pomocí vektorů znázorněno rychlostní pole, které vrací pracovní bod vychýlený fluktuací zpět do rovnovážného stavu. Z obrázku je vidět, že čím více se blížíme ke klidovému stavu, tím více se rychlostní pole zeslabuje. Je to vlastně pohled do disipační potenciálové jámy „shora“. Tento obrázek však platí jen pro fluktuace, které vychylují systém z klidového stavu nekonečně pomalým způsobem. Jen v takovém případě je korektní zkratovat induktory, rozpojit kapacitory a nedělat si starosti s parazitními reaktancemi. Reálné fluktuace jsou však širokopásmové a pro rychlé změny se může systém z disipační jámy snadno dostat pryč a stát se nestabilním.



Obr. 8. Znázornění rychlostního pole kolem pracovního bodu.

Podstatou metody vlastních čísel je vyhledávání takových zpětných vazeb, které se projeví při velmi *pomalých* změnách testovacího signálu výskytem záporných diferenciálních odporů. Vlastní čísla jsou pak dominantní odpory nebo vodivosti, do kterých testovací zdroje pracují. Reálné fluktuace však pracují do impedancí či admitancí, které jsou závislé na celém kmitočtovém spektru. Není problém dosadit do virtuálních rovnic frekvenčně závislé prvky (např. h -parametry tranzistorů, impedance místo odporů apod.) a získat frekvenčně závislá vlastní čísla. Dá se z nich usoudit na stabilitu pracovního bodu?

Otázka zní vlastně takto: Dá se z průběhu $X(j\omega)$, $\omega \in \langle 0, \infty \rangle$ imitance, do které pracuje odpovídající napěťový nebo proudový zdroj, zjistit stabilitu takového uspořádání?

Dříve než se pokusíme o odpověď, uvedeme jeden způsob založený na Laplaceově obrazu imitance:

Rovnovážný bod je stabilní právě tehdy, platí-li

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\text{Laplace}^{-1} \{X(p)\}] = 0.$$

Je nutno použít zpětné Laplaceovy transformace, neboť Fourierovy obrazy existují pouze u funkcí, které vyhovují podmínce absolutní integrovatelnosti, což právě u impulsních odezev nestabilních systémů není splněno.

Nyní uvedeme bez důkazu odpověď na otázku, jak lze z průběhu hodografu $X(j\omega)$ zjistit stabilitu:

Nechť $X(p)$ je imitance, do které pracuje zdroj fluktuace. Rovnovážný stav bude vzhledem k této fluktuaci stabilní, pokud budou současně splněny dvě podmínky:

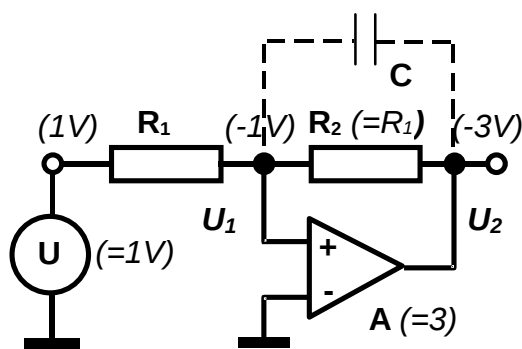
- $\lim_{\omega \rightarrow 0} \operatorname{Re}\{X(j\omega)\} > 0$,
- hodograf funkce $X(j\omega)$ pro $\omega \in (-\infty, \infty)$ obkrouží počátek komplexní roviny ve směru hodinových ručiček právě N - krát, kde
 $N =$ počet nulových bodů imitance $X(p)$ v pravé polorovině.

Uvedené kritérium je obdobou Nyquistova kritéria pro imitance. Musí se použít tak, aby se při buzení napěťovou fluktuací vyšetřoval hodograf admitance a při buzení proudovým zdrojem hodograf impedance.

Nemá-li imitance žádné nulové body (což je v praxi nejběžnější případ), zredukuje se výše uvedené kritérium na poučku, že trajektorie imitance se nesmí dostat na zápornou reálnou osu komplexní roviny.

Kritérium má zajímavý fyzikální význam a v budoucnost mu bude věnována pozornost.

Uvažujme nyní o zapojení napěťového zesilovače podle obr.9. Uvedený pracovní bod spočítaný simulátorem je samozřejmě DC nestabilní a nic na tom nezmění ani kapacitor C . Pokud „zanedbáme“ konečnou šířku pásma napěťového zesilovače, dostaneme se do zdánlivě neřešitelných problémů.



Obr. 9. DC nestabilní rovnovážný stav.

Obvod bez zesilovače se řídí diferenciální rovnicí

$$\tau \cdot \dot{u}_1(t) + u_1(t) = \tau \cdot \dot{u}_2(t) + k \cdot u_2(t),$$

kde

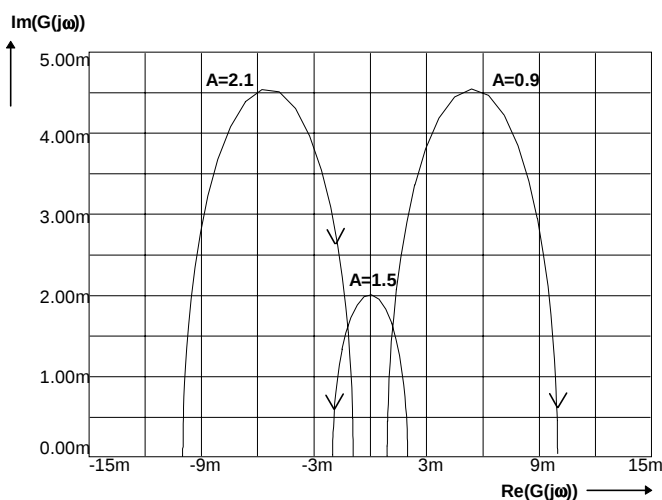
$$\tau = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot C, k = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Protože zesilovač vnáší do obvodu vazební podmínku $u_2(t) = A \cdot u_1(t)$, dostaneme výslednou rovnici

$$\tau \frac{1-A}{1-kA} \cdot \dot{u}_1(t) + u_1(t) = 0.$$

Tato rovnice ovšem dává nesmyslné výsledky např. pro velká kladná zesílení A , pro která vychází celý systém stabilní, ač tomu tak evidentně není. Obvod však má záporné vlastní číslo a tím je DC nestabilita potvrzena.

Obr.10 ukazuje hodografy vlastního čísla pro různá zesílení a frekvence $\omega \in \langle 0, \infty \rangle$. Rezistory mají odpor $1\text{k}\Omega$ a kapacitor kapacitu 1nF .



Obr. 10. Hodografy virtuální admitance.

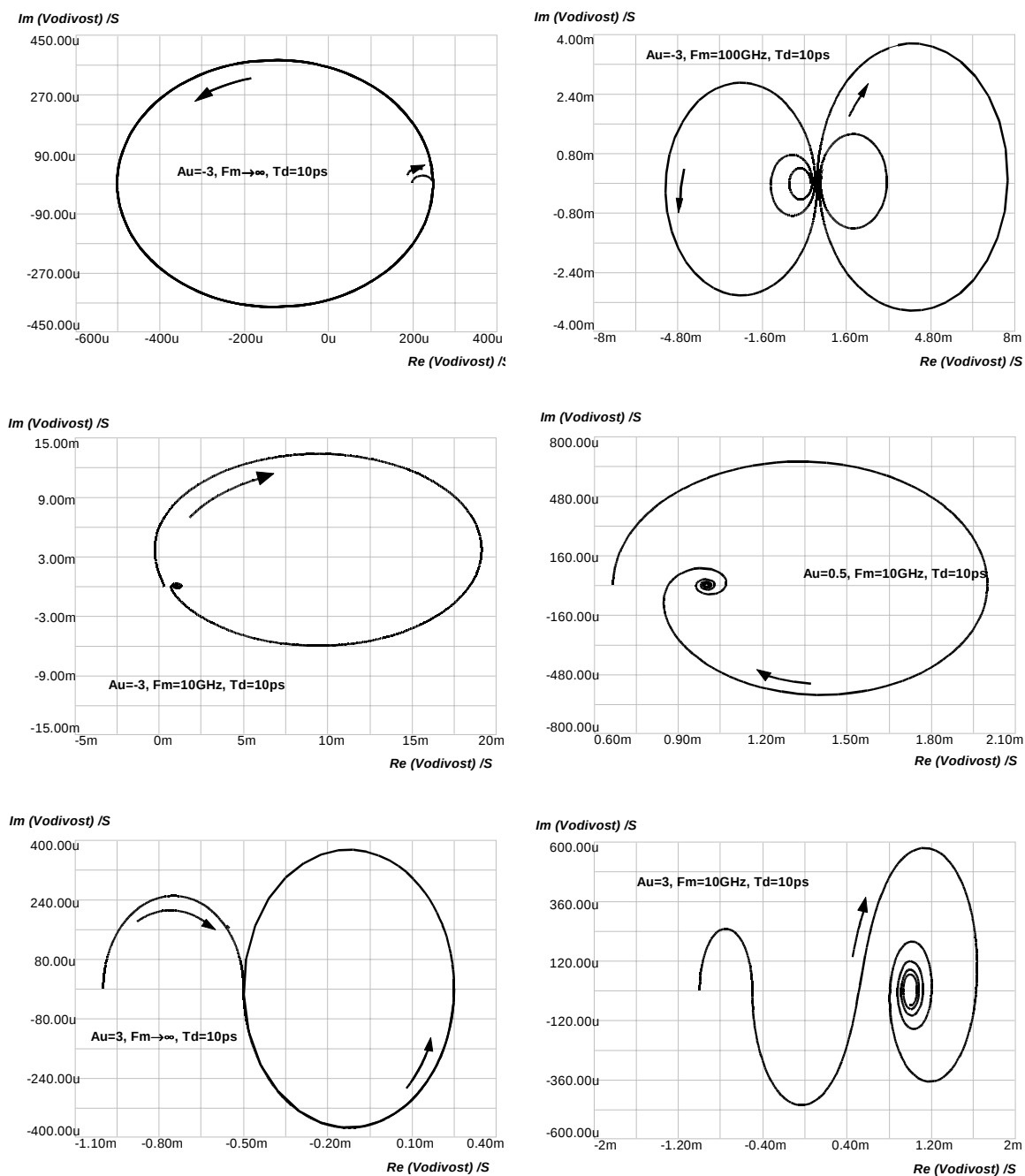
Při zesílení $A=0.9$ je obvod stabilní a admitance má záporný reálný pól. Šipky znamenají směr zvyšující se frekvence v rozsahu od 0 do ∞ . Při zesílení $A=1.5$ je již obvod nestabilní, pól je kladný a trajektorie končí na záporné reálné ose. Pro zesílení $A=2.1$ vychází pól opět záporný, avšak trajektorie začíná na záporné reálné ose a obvod by měl být nestabilní. Zapojení při tomto zesílení skutečně kmitá.

Konvenční kritéria stability selhala proto, že jsme „zanedbali“ dynamiku napěťového zesilovače a neomezili jsme jeho šířku pásma. Teorii vlastních čísel to nevádí. Uvedeme ještě jeden problém, který si v budoucnosti zaslouží také pozornost. Předpokládejme, že zesilovač má nenulové dopravní zpoždění mezi vstupem a výstupem, které označíme jako T_d . Zvolíme velmi malé zpoždění 10ps . Výsledné trajektorie vlastní admitance pro různá zesílení a různé šířky pásma zesilovače jsou vykresleny na obr.11. Je velmi zajímavé, že stabilita pro zesílení $A \in (-\infty, -1)$ je zajištěna omezenou šířkou pásma, nikoliv tím, že v obvodu existuje „záporná zpětná vazba“.

Závěr

Další výzkum je třeba zaměřit do těchto oblastí:

- algoritmizace dosud získaných výsledků pro počítačové zpracování,
- ověření na problémech z praxe (ověřování DC stability nově navrhovaných struktur, problémových zapojení apod.),
- konkretizace získaných metod pro obvody s perspektivními prvky (konvejory apod.),



Obr. 11. Trajektorie fluktuální vodivosti.

- výzkum vlivu dopravního zpoždění na DC stabilitu,
- precizní důkaz hypotézy, že o stabilitě rozhoduje konstanta úměrnosti mezi Lagrangeovým multiplikátorem a mikroskopickou chybou vazby (podstatně by se zjednodušil algoritmus testu DC stability pro obvody s vazbami),
- vysledovat důležité vazby mezi virtuální dynamikou DC obvodů a klasickou dynamikou, což bude znamenat
 - formulaci a důkaz obdoby Nyquistova kritéria pro DC obvody,
 - formulaci a důkaz obdoby Ljapunovova kritéria pro DC obvody,
 - formulaci a důkaz obdoby Lurjeho metody pro DC obvody,
 - přikročit k budování teorie, která sjednotí pohled na DC a klasickou stabilitu.

Literatura

- [1] GREEN, M.M.-WILLSON, A.N.: How to Identify Unstable dc Operating Points. IEEE Transactions on Circuit and Systems, Vol.39, No.10, October 1992.
- [2] GREEN, M.M.: (Almost) Half of Any Circuit's Operating Points are Unstable. IEEE Trans. on Circuit and Systems, Vol. 41, No.4, April 1994, pp. 286-293.
- [3] JIANG, L.-NISHIO, Y.-USHIDA, A.: Stability of Characteristic Curves of Nonlinear Resistive Circuits. IEEE Trans. on Circuit and Systems, Vol. 45, No.6, June 1998, pp. 634-642.
- [4] OGATA, M.-NISHI, T.: A Topological Criterion for the Instability of Equilibrium Points of a Non-Reciprocal Circuit Containing some VCCSs. 1998 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA'98), Crans-Montana, Switzerland, Sept. 14-17, 1998, pp. 255-258.
- [5] FOX, R.M.: A General Operating-Point Instability Test Based on Feedback Analysis. ISCAS'98 Monterey, CA, USA, 1998.
- [6] VALSA, J.: Stability of DC Operating Points. Radioengineering, Vol. 6, No. 4, 1997, pp. 21-26.
- [7] BIOLEK, Z.: Využití variačních metod v analýze elektrických obvodů. STO-5, VA Brno, 1994, s. 92-96.
- [8] BIOLEK, Z.-BIOLEK, D.: Stability Testing of DC Circuits using Variational Methods. XVIII Seminarium, SPETO'95, Gliwice-Ustroń, Poland, Tom 2, pp. 43-48.
- [9] BIOLEK, Z.-BIOLEK, D.: Stability of DC Operating Points in the Networks with Controlled Sources. SYS'95, AMSE, July 3-5, 1995, Brno, Vol.4, pp. 26-30.
- [10] BIOLEK, D.-BIOLEK, Z.: Stability Paradox in the Circuits with Controlled Sources. Radioelektronika'96, Brno, 1996, Vol.1, pp.22-25.
- [11] BIOLEK, D.-BIOLEK, Z.: Virtual Trajectories of DC Circuits. CSS'96, Vol. 2, pp. 391-394, Brno, 1996.
- [12] BIOLEK, D.-BIOLEK, Z.: Potential Stability of DC Operating Points in the Circuits with Controlled Sources. ICECS'96, Rodos, Greece, Vol. I, pp. 101-104.
- [13] BIOLEK, D.-BIOLEK, Z.: Virtual Dynamics of DC Circuits. MWSCAS'96, Ames, Iowa, USA. To be printed.
- [14] BIOLEK, Z.-BIOLEK, D.-MIŠUREC, J.: Stability Testing of the DC Operating Points. Workshop '97, Praha.
- [15] BIOLEK, D.-BIOLEK, Z.: The Lambda Stability Criterion For Circuits With Controlled Sources. ECCTD'97 Budapest, Vol. 3, p. late 3.
- [16] BIOLEK, D.-BIOLEK, Z.: The Principle of Minimum Entropy Production for Stability Testing of DC Operating Points. AMTEE'97, Plzeň, pp. 207-212.
- [17] BIOLEK, D.-BIOLEK, Z.: Stability Of Dc Operating Points And Corresponding Dynamical Systems. AMSE, MS'97, Melbourne, pp. 236-240.
- [18] BIOLEK, D.: Identification of Unstable DC Operating Points. ICECS'98 Lisabon, Portugalsko, pp. 489-492. ISBN 0-7803-5008-1.
- [19] BIOLEK, D.-BIOLEK, Z.-BIOLKOVÁ, V.: New Stability Algorithm for Circuits with Controlled Sources. SSCC'98 Durban, Jižní Afrika, Vol. III, pp. 459 - 462.
- [20] BIOLEK, Z.-BIOLEK, D.-BIOLKOVÁ, V.: Power Concept of the Stability. CSC'98 Piraeus, Greece, Vol. 1, pp. 286-288. ISBN 960-8485-05-3.