

Simulacija in optimizacija analognih električnih vezij s pomočjo ravnotežne harmonske analize

Borut Wagner, Janez Puhan, Árpád Bűrmen, Iztok Fajfar in Tadej Tuma
Fakulteta za elektrotehniko
Univerza v Ljubljani
Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
borut.wagner@fe.uni-lj.si

Simulation and Optimization of Analog Circuits Using Harmonic Balance Analysis

This paper presents Harmonic Balance analysis simulation technique of nonlinear analog circuits [1, 2, 3]. It is used for circuits where steady-state response is required. The method has many advantages for circuits which require considerable time to reach the steady-state (resonant circuits, oscillators...). Algorithm is coded in Nutmeg (interpreter designed as a user interface for SPICE [4], but it has all properties of a programming language). Transient analysis is performed in SPICE OPUS [5], nonlinear analog circuit simulator. Harmonic balance analysis is demonstrated on a simple circuit. Results are compared with transient analysis. This method can be used for optimization of nonlinear analog circuits [6, 7].

1. Uvod

Simulacija analognih elektronskih vezij je računsko dokaj zahteven postopek. Pri določenih vezjih nas pogosto zanima, kakšen je odziv vezja v stacionarnem stanju, ko prehodni pojavi izzvenijo. Zato moramo simulirati delovanje vezja včasih tudi preko nekaj 100 ali celo 1000 period, da prehodni pojav popolnoma izzveni. Če želimo tako vezje optimizirati, t.j. poiskati vrednosti določenih parametrov tako, da bo najbolje izpolnjevalo načrtovalske zahteve, moramo vezje simulirati velikokrat z različnimi vrednostmi optimizacijskih parametrov, kar občutno upočasni celoten računski postopek. Da dobimo rezultate v doglednem času, bi morali uporabiti zmogljiv računalnik ali uporabiti paralelno procesiranje [8].

Za nelinearna elektronska vezja, za katera nas ne zanima prehodni pojav, ki jih vzbujamo s periodičnim signalom in od katerih pričakujemo periodični odziv, lahko za izračun odziva v stacionarnem stanju uporabimo metodo ravnotežne harmonske analize [1]. Metoda izkazuje prednosti pred tranzientno analizo predvsem za vezja, ki imajo veliko kvaliteto Q . Da bi izračunali stacionarni odziv teh vezij, bi morali simulirati vezje preko 100 ali celo nekaj 1000 period, da bi prehodni pojav izzvenel, za kar bi porabili dosti časa. Pri ravnotežni harmonski analizi dobimo odziv vezja v stacionarnem stanju dosti prej, kar pomeni, da bo tudi morebitni postopek optimizacije, ki ga bomo izvajali na tem vezju, precej hitrejši.

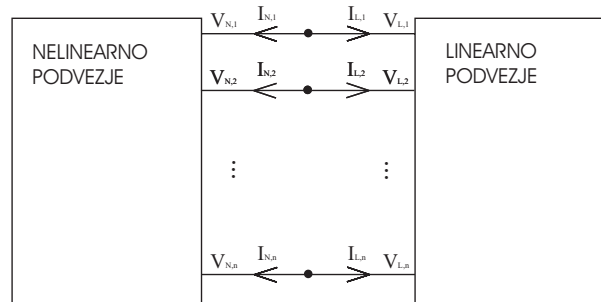
Pri metodi ravnotežne harmonske analize vezje razdelimo na nelinearen in linearen del. Linearni del vezja rešujemo v

frekvenčnem prostoru, nelinearni pa v časovnem, tako da simuliramo nekaj osnovnih period signala odziva. S pomočjo Fourierjeve transformacije dobimo frekvenčne komponente napetosti in tokov na vozliščih med nelinearnim in linearnim delom vezja. Na teh vozliščih uporabimo napetostni in tokovni Kirchhoffov zakon in s pomočjo iteracijske metode dosežemo, da so tokovi posameznih frekvenčnih komponent iz enega dela vezja v drug del enaki (od tod ime ravnotežna harmonska analiza).

2. Ravnotežna harmonska analiza

Pogosto nas za določena vezja zanima stacionarni odziv, ko prehodni pojavi popolnoma izzvenijo. Za vezja, ki jih vzbujamo s harmoničnimi signali, lahko s pomočjo ravnotežne harmonske analize do tega rezultata pridemo hitreje, kot če bi vezje simulirali s tranzientno analizo. Da bi prehodni pojav izzvenel, bi morali vezje simulirati preko nekaj 100 ali 1000 period, za kar bi porabili precej časa.

Nelinearno analogno vezje razdelimo na nelinearno in linearno podvezje, ki sta med seboj spojeni v n vozliščih (slika 1).



Slika 1: Razdelitev vezja na nelinearni in linearni del.

Signale, ki so prisotni v vezju, predstavimo v obliki Fourierjeve vrste (1)

$$x(t) = \sum_{\omega_k \in \Omega} A_k \cos(\omega_k t) + B_k \sin(\omega_k t), \quad (1)$$

pri čemer so koeficienti A_k in B_k Fourierjevi koeficienti, ki pripadajo frekvencam ω_k . Ω je množica frekvenc, ki jih vsebujejo signali v vezju.

Vezje vzbujamo s harmoničnimi viri. Zaradi nelinearnosti je odziv vezja v splošnem linearna kombinacija vseh večkratnikov vseh harmoničnih nihanj, s katerimi vezje vzbujamo. Tako dobimo množico frekvenc Ω , ki nastopajo v odzivu vezja. Pri določanju odziva na podlagi ravnotežne harmonske analize je v množici Ω končno število frekvenc. Ker bi morala ta množica vsebovati neskončno mnogo frekvenc, naredimo pri izračunu napako, kar pomeni, da enačba (5) v nadaljevanju ni popolnoma izpolnjena.

Za izbiro množice Ω na podlagi signala vzbujanja lahko uporabimo različne načine izbire frekvenc, ki jih upoštevamo pri določevanju odziva vezja [1].

Linearni del vezja analiziramo v frekvenčnem prostoru. Iz vozliščnih napetosti \mathbf{V}_L (slika 1) s pomočjo topologije vezja in lastnosti elementov izračunamo tokove \mathbf{I}_L , ki tečejo v linearni del vezja [9].

Napetosti na vozliščih nelinearnega podvezja \mathbf{V}_N najprej s pomočjo inverzne Fourierjeve transformacije pretvorimo v časovni prostor

$$\mathbf{v}_N(t) = F^{-1}\{\mathbf{V}_N\} . \quad (2)$$

Potem s tranzientno analizo na podlagi vzbujanja $\mathbf{v}_N(t)$ izračunamo tokove v nelinearni del vezja $\mathbf{i}_N(t)$, ki jih potem s Fourierjevo transformacijo pretvorimo nazaj v frekvenčni prostor

$$\mathbf{I}_N = F\{\mathbf{i}_N(t)\} . \quad (3)$$

Na vozliščih med nelinearnim in linearnim delom najprej uporabimo napetostni Kirchhoffov zakon

$$\mathbf{V}_L = \mathbf{V}_N . \quad (4)$$

Cilj metode harmoničnega ravnovesja je poiskati napetosti med nelinearnim in linearnim delom vezja, pri katerih bodo tokovi, ki tečejo in enega dela v drug del vezja, enaki (5) (tokovni Kirchhoffov zakon). Glej sliko 1.

$$\mathbf{I}_L = -\mathbf{I}_N \quad (5)$$

Definirajmo funkcijo napake, ki je enaka vsoti tokov, ki za posamezno vozlišče tečejo v nelinearni in linearni del vezja:

$$\mathbf{E} = \mathbf{I}_L + \mathbf{I}_N . \quad (6)$$

Funkcijo napake \mathbf{E} je treba z iteracijskim algoritmom minimizirati, t.j. doseči, da bo $\mathbf{E}=\mathbf{0}$. Tedaj bo zaradi (5) izpolnjen še tokovni Kirchhoffov zakon in vezje bo v ravnovesju.

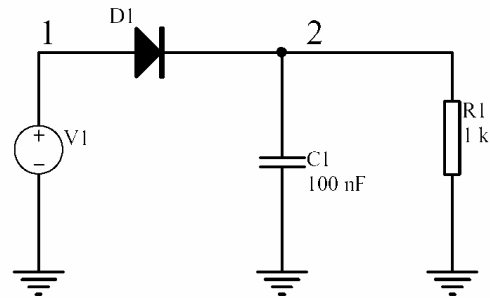
Funkcijo napake lahko minimiziramo z Newtonovo iteracijsko metodo

$$\mathbf{V}^{(i+1)} = \mathbf{V}^{(i)} - [\mathbf{J}^{(i)}]^{-1} \mathbf{E}^{(i)} , \quad (7)$$

pri čemer predstavlja indeks i zaporedno iteracijo. Matrika \mathbf{J} je Jacobijeva matrika $\mathbf{J} = \partial \mathbf{E} / \partial \mathbf{U}$.

3. Testno vezje

Za demonstracijo delovanja ravnotežne harmonske analize smo izbrali enostavno vezje (slika 2).



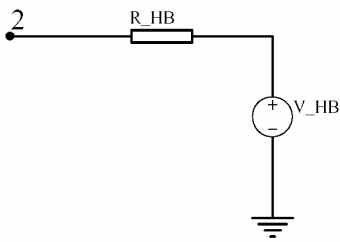
Slika 2: Testno vezje.

Vezje smo simulirali v časovnem prostoru s programskim orodjem za simulacijo analognih elektronskih vezij SPICE OPUS [5].

Metodo harmoničnega ravnovesja smo implementirali v programskem jeziku Nutmeg, ki je del programa SPICE OPUS. Na sliki 6 je prikazan odziv vezja na podlagi tranzientne analize in s pomočjo ravnotežne harmonske analize.

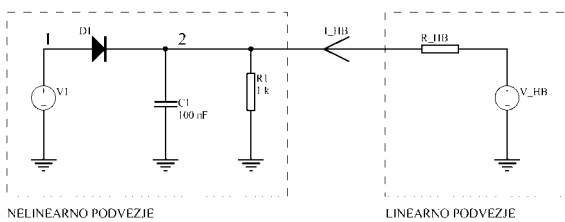
Vezje na sliki 2 vzbujamo v vozlišču 1 z napetostnim virom $v_1(t) = 1V + 1V \sin(2\pi \cdot 1MHz \cdot t)$. Za vezje želimo izračunati odziv v vozlišču 2, torej $v_2(t)$. Odločimo se, da bomo opazovali enosmerno komponento, osnovno frekvenčno komponento in osem višje harmonskih komponent, torej bo množica Ω v enačbi (1) podana v obliki $\Omega = \{2\pi k \cdot 1MHz; 0 \leq k \leq 9\}$. Ker smo vzeli končno število frekvenčnih komponent, funkcija napake \mathbf{E} (6) nikoli ne more biti enaka $\mathbf{0}$. Zato smo z iteracijo (7) končali, ko je bila izpolnjena neenačba $\|\mathbf{E}\| < 10^{-4}$.

V večini vezij, ki jih simuliramo, so skoraj vsi elementi nelinearni. Zato smo tudi za to testno vezje modificirali metodo ravnotežne harmonske analize. Celotno vezje, ki ga simuliramo (slika 2), smo proglasili za nelinearno podvezje, v vozlišču 2, v katerem želimo izračunati odziv, pa dodamo linearno podvezje, ki je prikazano na sliki 3. Če bi imelo vezje na sliki 2 več vozlišč, v katerih bi želeli izračunati odziv, bi morali v vsako vozlišče dodati tako linearno vezje.



Slika 3: Linearno podvezje.

Celotno vezje, ki ga uporabimo za simulacijo po metodi ravnotežne harmonske analize, je prikazano na sliki 4.



Slika 4: Vezje za simulacijo po metodi ravnotežne harmonske analize.

Ker smo metodo ravnotežne harmonske analize modificirali na zgoraj opisan način, je sedaj funkcija napake (6) enaka $\mathbf{E} = \mathbf{I}_{HB}$ na sliki 4. Ko bo tok \mathbf{I}_{HB} , ki je posledica dodajanja vezja iz slike 3, enak $\mathbf{0}$, bo vezje v ravnovesju. Takrat bo napetost v vozlišču 2 $v_2(t)$ enaka napetosti generatorja $v_{HB}(t)$.

Na začetku nastavimo vrednost napetostnega vira \mathbf{V}_{HB} na $\mathbf{0}$ in upornost $R_{HB} = 1 \text{ k}\Omega$. Celotno vezje s slike 4 simuliram v časovnem prostoru. S tem dobimo odziv vezja ($v_2(t)$ in $i_{HB}(t)$). V vsaki iteraciji na podlagi toka i_{HB} z enačbo (3) izračunamo \mathbf{I}_{HB} in z uporabo (7) ter znanega upora R_{HB} izračunamo novo vrednost napetostnih virov \mathbf{V}_{HB} . Če je tok \mathbf{I}_{HB} že dovolj majhen, lahko ustrezno spremenimo vrednost upornosti R_{HB} .

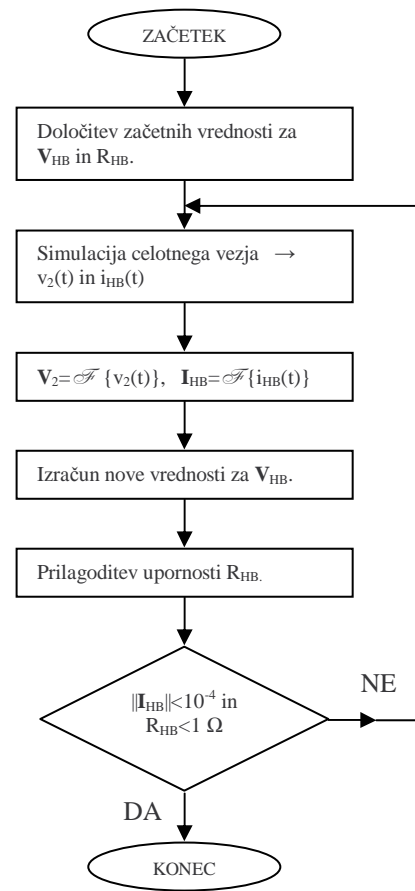
Iteracijski postopek določevanja $v_2(t)$ ponavljamo toliko časa, dokler ni izpolnjena neenačba $\|\mathbf{E}\| < 10^{-4}$ oz.

$\|\mathbf{I}_{HB}\| < 10^{-4}$ in da ima upornost R_{HB} dovolj majhno vrednost.

Celoten iteracijski postopek prikazuje slika 5.

Odziv vezja na sliki 2 $v_2(t)$ na podlagi metode ravnotežne harmonske analize ter s pomočjo tranzientne analize (po daljšem času, ko prehodni podaj izzveni) je prikazan na sliki 6. Razlika med obema odzivoma je neopazna (10^{-5}), zato je na sliki 7 prikazana še razlika obeh odzivov.

Na sliki 7 opazimo, da v napaki, ki je enaka razliki odzivov po metodi ravnotežne harmonske analize in tranzientni analizi, prevladuje frekvenčna komponenta 10 MHz. Ta ugotovitev se ujema z izbiro množice Ω , saj smo predpostavili, da odziv vezja vsebuje enosmerno, osnovno in 8 višje harmonskih komponent (frekvence do 9 MHz).



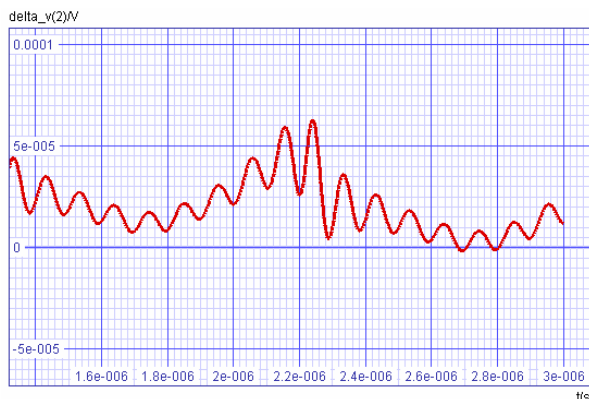
Slika 5: Iteracijski postopek za določevanje odziva vezja po metodi ravnotežne harmonske analize.



Slika 6: Odziv testnega vezja, dobljen z ravnotežno harmonsko analizo in s tranzientno analizo (razlika je neopazna).

Za analizo testnega vezja je bilo potrebno 36 iteracij (slika 5). V vsaki iteraciji je potrebno vezje simulirati časovni interval vsaj ene periode osnovne frekvence 1 MHz. Dosti časa porabimo za računanje Fourierjeve transformacije (SPICE računa s pomočjo DFT in ne FFT), tako da ima opisana metoda prednost pred tranzientno analizo, če bi bilo treba vezje simulirati preko vsaj 100 period, da bi dobili stacionarni odziv. Vezje, ki je bilo predstavljeno v tem članku, je namenjeno zgolj

za prikaz delovanja metode ravnotežne harmonske analize, saj dobimo stacionarni odziv že po nekaj 10 periodah.



Slika 7: Razlika odzivov vezja, dobljenih z ravnotežno harmonsko analizo in s tranzientno analizo.

4. Optimizacija analognih elektronskih vezij

Opisano metodo lahko uporabimo pri optimizaciji analognih elektronskih vezij [7, 8], kjer moramo vezje, ki ga želimo optimizirati, velikokrat simulirati. Tako lahko celoten postopek optimizacije traja tudi več dni. V vsaki simulaciji spreminjamo določene parametre vezja (vrednosti elementov vezja...), dokler vezje ne izpolnjuje zahtev načrtovalca. Z uporabo metode ravnotežne harmonske analize se lahko optimizacija vezja občutno skrajša.

5. Izbira inačice ravnotežne harmonske analize

Zaradi enostavne implementacije v Nutmegu je bila uporabljena osnovna metoda ravnotežne harmonske analize [1, 2, 3, 11]. Iteracijski postopek (7) je bil izveden s pomočjo blokovne Newtonove metode [12] (iteracija za vsako frekvenčno komponento posebej).

Druge različice metode ravnotežne harmonske analize se razlikujejo po tem, na kakšen način izvedemo pretvorbo iz časovnega v frekvenčni prostor [13, 14], na kakšen način predstavimo nelinearnost nelinearnih elementov [15, 16].

Izbira ustrezne različice je odvisna od tega, ali želimo metodo ravnotežne harmonske analize vgraditi v obstoječi simulator. Pri tem moramo upoštevati njegove lastnosti in način delovanja, saj vse različice niso enako ugodne za implementacijo. Drugače je, če načrtujemo nov simulator vezij, v katerega bomo vgradili metodo ravnotežne harmonske analize. V tem primeru bomo simulator v osnovi načrtovali tako, da bomo lahko implementirali različico, ki je najbolj učinkovita.

Za implementacijo v SPICE OPUS je ugodna tudi uporaba t.i. shooting metode v kombinaciji ekstrapolacijsko metodo [1, 10].

6. Zaključek

V članku smo predstavili ravnotežno harmonsko analizo, ki smo jo uporabili kot metodo za analizo analognih električnih vezij. Metoda je uporabna, če nas zanima odziv vezja v stacionarnem stanju. Ravnotežna harmonska analiza ima prednosti pred tranzientno analizo za vezja, katera bi morali

simulirati dolgo časa, da bi prišla v stacionarno stanje (rezonančna vezja, oscilatorji...). Prikazali smo delovanje metode na enostavnem vezju, primerjali odziv s tranzientno analizo in preučili možnost uporabe te metode pri optimizaciji.

7. Viri

- [1] Kenneth S. Kundert, Jacob K. White and Alberto Sangiovanni-Vincentelli, *Steady-state methods for simulating analog and microwave circuits*, Kluwer Academic Publishers, 1990
- [2] Michael S. Nakhla and Jiri Vlach, *A Piecewise Harmonic Balance Technique for Determination of Periodic Response of Nonlinear Systems*, IEEE Transactions on Circuit and Systems, Vol. CAS-23, No. 2, February 1976, pp. 85-91
- [3] Vittorio Rizzoli and Andrea Neri, *State of the Art and Present Trends in Nonlinear Microwave CAD Techniques*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 36, No. 2, February 1988, pp. 343-365
- [4] T. Quarles, A. R. Newton, D. O. Pederson, A. Sangiovanni-Vincentelli, *SPICE3 Version 3f4 User's Manual*, University of California, Berkeley, California, 1989
- [5] <http://www.fe.uni-lj.si/spice/>
- [6] J. Puhani, T. Tuma, *Optimization of analog circuits with SPICE 3f4*, Proceedings of the ECCTD'97, vol. 1, pp. 177-180, 1997
- [7] J. Puhani, T. Tuma, I. Fajfar, *Optimization Methods in SPICE, a Comparison*, Proceedings of the ECCTD'99, vol. 1, pp. 1279-1282, 1999
- [8] Arpad Bürmen, Iztok Fajfar, Janez Puhani, Andrej Nussdorfer, Tadej Tuma, *Optimizacija elektronskih vezij z vzporednim omejenim simpleksnim postopkom*, Elektrotehniški vestnik 69(1): 7-12, Ljubljana, 2002
- [9] T. Tuma and F. Bratkovič, *A General Approach to Circuit Equations*, The International Journal of Circuit Theory and Applications, Vol. 22, pp. 431-445, 1994
- [10] Stig Skelboe, *Computation of the Periodic Steady-State Response of Nonlinear Network by Extrapolation Methods*, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. CAS-27, No. 3, March 1980, pp. 161-175
- [11] Vittorio Rizzoli, Claudio Cechetti, Alessandro Lipparini and Franco Mastroianni, *General-Purpose Harmonic Balance Analysis of Nonlinear Microwave Circuits Under Multitone Excitation*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 36, No. 12, December 1988, pp. 1650-1660
- [12] Chao-Ren Chang, Patrick L. Heron and Michael B. Steer, *Harmonic Balance and Frequency-Domain Simulation of Nonlinear Microwave Circuits Using the Block Newton Method*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 38, No. 4, April 1990, pp. 431-434
- [13] Patrick L. Heron and Michael B. Steer, *Jacobian Calculation Using the Multidimensional Fast Fourier Transformation in the Harmonic Balance Analysis of Nonlinear Circuits*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 38, No. 4, April 1990, pp. 429-431
- [14] Akio Ushida and Leon O. Chua, *Frequency-Domain Analysis on Nonlinear Circuits Driven by Multi-Tone Signals*, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. CAS-31, No. 9, September 1984
- [15] George W. Rhyne, Michael B. Steer and Bevan D. Bates, *Frequency-Domain Nonlinear Circuit Analysis Using Generalized Power Series*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 36, No. 2, February 1988, pp. 379-387
- [16] Janne Roos, *Frequency-domain analysis of nonlinear circuits using Chebyshev polynomials*, Master's Thesis, Helsinki University of Technology, February 22, 1994

8. Zahvala

Raziskave je sofinanciralo Ministrstvo za šolstvo znanost in šport (MŠZŠ) Republike Slovenije v okviru programa P2-0246 - Algoritmi in optimizacijski postopki v telekomunikacijah.