

ÚVOD

V současné době se použití spínaných (dále SC) obvodů rozšířilo do mnoha oblastí zpracování signálů, včetně výkonové elektroniky. Mnozí výrobci integrovaných obvodů mají tyto typy ve své nabídce, např. [1], [2]. Běžnými jsou tzv. nefiltrové aplikace (regulátory, převodníky, modulátory apod.). SC obvody pronikají i do oblasti moderních elektronických funkčních bloků (transimpedanční zesilovače, konveyory). Obvody SC mají své sekce na významných světových a evropských konferencích v daném oboru (např. IEEE, URSI, ECCTD, ISCAS, AMSE aj.) a výsledky jejich teoretického výzkumu i aplikací jsou bohatě publikovány v mnoha odborných časopisech a monografiích, viz přehled literatury.

S rostoucím významem SC obvodů vznikala postupně řada metod jejich analýzy.

Z hlediska algoritmizace a počítačového řešení lze tyto metody rozdělit do těchto skupin [3]:

1. *Metody založené na stavovém popisu*
2. *Metody využívající metody uzlových napětí*
3. *Ostatní metody*

Některé metody využívají kombinace výše uvedených druhů metod, např. [4].

Pro analýzu SC obvodů se dnes používá takřka výhradně modifikovaná metoda uzlových napětí. Na jejím principu pracuje mnoho počítačových programů, např. [4], [5], [6], [7], [8]. V některých publikacích jsou výchozí rovnice pro analýzu sestaveny jako diferenciální, v jiných je uvedeno ekvivalentní vyjádření v oblasti s (Laplaceův operátorový počet). Také díky tomu jsou publikovány rozdílné metody počítačového řešení (přímá integrace diferenciálních rovnic, integrace za účelem získání originálu k Laplaceovým obrazům časových průběhů aj.).

Modifikovaná metoda uzlových napětí však může vést obecně na mnohem větší počet rovnic, než např. metoda stavových rovnic. Proto je vhodné zavést *redukci počtu rovnic*, kterou popisuje a využívá řada autorů [7], [8]. Aplikacemi této metody jsou programy pro symbolickou analýzu obvodů SC [6], [9], [10], [11], využití grafů signálových toků [11] aj. Metodu lze použít k analýze jak idealizovaných obvodů, tak i obvodů, v jejichž popisu jsou uvažovány některé význačné reálné vlastnosti (často označované termínem *reálné spínané obvody*).

Počítačové programy, používané v současné době k simulaci SC obvodů, nejsou v mnoha případech určeny pro běžně dostupné počítače typu IBM PC a kompatibilní typy, jsou z různých důvodů nedostupné (finanční hledisko aj.), případně používají méně vhodné metody analýzy. Navíc běžně používané programy pro analýzu obvodů jako např. *PSPICE*, *MC4* apod. neumožňují analyzovat SC obvody v kmitočtové oblasti a časová analýza může být zatížena značnými chybami.

Dále uvedený algoritmus byl vyvinut v rámci grantového projektu. Je určen pro analýzu idealizovaných i reálných spínaných obvodů na počítačích typu IBM PC/AT. Po jeho dokončení a implementaci do již existujícího programu pro analýzu SC obvodů ve frekvenční oblasti bude k dispozici kompletní software pro počítačovou simulaci SC obvodů.

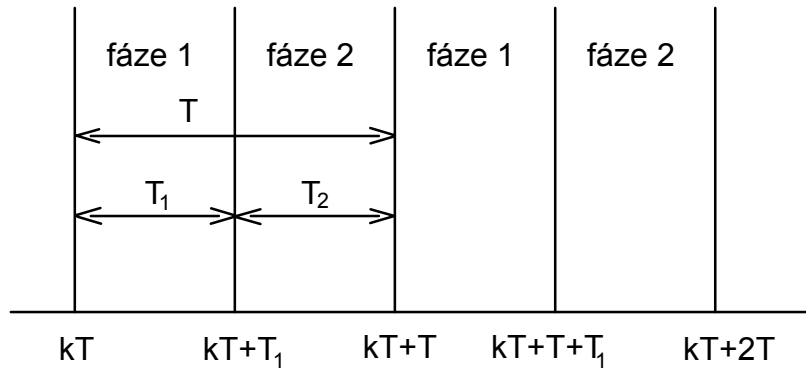
1. PODSTATY ALGORITMU ČASOVÉ ANALÝZY SC OBVODŮ

1.1. Teoretický úvod

Jakýkoliv lineární spínaný obvod může být popsán soustavou rovnic podle modifikované metody uzlových napětí [3]. Např. pro obvody s dvoufázovým spínáním, pro které můžeme nakreslit tzv. *spínací diagram*, viz obr. 1.1., platí:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_1^M \mathbf{v}_1(t) + \mathbf{C}_1^M \frac{d}{dt} \mathbf{v}_1(t) &= \mathbf{D}_1 \mathbf{w}_1(t), t \in \langle kT, kT + T_1 \rangle \text{ ve fázi 1,} \\ \mathbf{G}_2^M \mathbf{v}_2(t) + \mathbf{C}_2^M \frac{d}{dt} \mathbf{v}_2(t) &= \mathbf{D}_2 \mathbf{w}_2(t), t \in \langle kT + T_1, kT + T \rangle \text{ ve fázi 2,} \end{aligned} \quad (1.1)$$

kde $\mathbf{G}_1^M$, resp. $\mathbf{G}_2^M$ je modifikovaná matice vodivostí rozměru $(n_1 \times n_1)$, resp. $(n_2 \times n_2)$, $\mathbf{C}_1^M$, resp. $\mathbf{C}_2^M$ je modifikovaná matice reaktancí rozměru $(n_1 \times n_1)$, resp. $(n_2 \times n_2)$, $\mathbf{D}_1$, resp. $\mathbf{D}_2$ jsou jisté incidenční vektory rozměru $(n_1 \times 1)$, resp. $(n_2 \times 1)$, $\mathbf{w}_1$, resp. $\mathbf{w}_2$ jsou budicí signály v 1., resp. 2. fázi.



Obr. 1.1. Spínací diagram SC obvodů s dvoufázovým spínáním.

Podrobíme-li soustavu (1.1) Laplaceově transformaci, obdržíme soustavu:

$$\begin{aligned} (\mathbf{G}_1^M + s\mathbf{C}_1^M) \mathbf{V}_1 &= \mathbf{D}_1 \mathbf{W}_1 + \mathbf{C}_1^M \mathbf{v}_1(kT^+), \\ (\mathbf{G}_2^M + s\mathbf{C}_2^M) \mathbf{V}_2 &= \mathbf{D}_2 \mathbf{W}_2 + \mathbf{C}_2^M \mathbf{v}_2(kT + T_1^+), \end{aligned} \quad (1.2)$$

kde symbol $^+$ označuje limitu zprava.

Mimo soustavu (1.2) je však třeba uvažovat ještě soustavu rovnic (1.3), která transformuje počáteční podmínky z konce předchozí fáze na začátek fáze následující. Tato transformace je jednoznačná a způsobuje nespojitosti časového průběhu obvodových veličin vlivem spínání:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1(kT^+) &= \mathbf{S}_{21} \mathbf{v}_2(kT^-), \\ \mathbf{v}_2(kT + T_1^+) &= \mathbf{S}_{21} \mathbf{v}_1(kT + T_1^-), \end{aligned} \quad (1.3)$$

kde $\mathbf{S}_{12}$, resp. $\mathbf{S}_{21}$ jsou transformační matice rozměru $(n_1 \times n_2)$, resp. $(n_2 \times n_1)$, pro které platí:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{12} &= \mathbf{C}_{12}^M (\mathbf{C}_1^M)^{-1} \\ \mathbf{S}_{21} &= \mathbf{C}_{21}^M (\mathbf{C}_2^M)^{-1}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Rovnice (1.2) a (1.3) jsou základem pro počítačovou analýzu, lze je sestavit pro jakýkoliv reálný lineární spínaný obvod.

1.2. Hledání soustavy nezávislých obvodových rovnic

Modifikovaná metoda uzlových napětí vede na poměrně velký počet rovnic, protože k rovnicím podle 1. Kirchhoffova zákona pro nezávislé uzly přibudou další rovnice, které zachycují lineární transformace obvodových veličin spínači a neregulárními prvky. Proto je nezbytné, s ohledem na výpočtové časy a paměť počítače, sestavovat takovou soustavu obvodových rovnic, ve které budou figurovat pouze nezávislé obvodové veličiny. Předpokladem k tomu je provedení transformace a redukce proměnných ještě před sestavením výchozích rovnic pro analýzu. Zmíněné transformace a redukce jsou provedeny formou *napětových a proudových koeficientů*, tedy čísel, která jsou přiřazena ke každému uzlu obvodu. Podrobný popis včetně algoritmizace tohoto procesu je popsán v [3].

V našem programu se algoritmus hledání nezávislých obvodových veličin skládá z těchto částí:

- a) transformace vlivem působení spínačů
- b) transformace vlivem nepřipojených uzlů
- c) transformace vlivem neregulárních prvků
- d) vzestupné přečíslování koeficientů.

1.3. Numerické řešení obvodových rovnic

Algoritmus tvorby obvodových matic

Obvodové matice $\mathbf{Y}_1^M, \mathbf{D}_1, \mathbf{Y}_2^M, \mathbf{D}_2, \mathbf{C}_{12}^M$ a $\mathbf{C}_{21}^M$ z rovnice (1.2), kde $\mathbf{Y}_1^M = \mathbf{G}_1^M + s\mathbf{C}_1^M$ a $\mathbf{Y}_2^M = \mathbf{G}_2^M + s\mathbf{C}_2^M$, se tvoří v několika etapách:

1. Nulování všech matic.
2. Zápis submatic pasivních prvků typu C a R (včetně nenulových odporů sepnutých spínačů).
3. Zápis submatic vlastních a vzájemných indukčností.
4. Zápis submatic reálných operačních zesilovačů a transimpedančních operačních zesilovačů.

Modifikace obvodových rovnic působením budicího zdroje

Připojení budicího zdroje mezi uzel i a referenční uzel 0 umožňuje nahradit rovnice 1. Kirchhoffova zákona pro i -tý uzel v obou fázích jednoduchou napětovou rovnicí:

$$U_{vst} = 1 \cdot U_i, \quad (1.6)$$

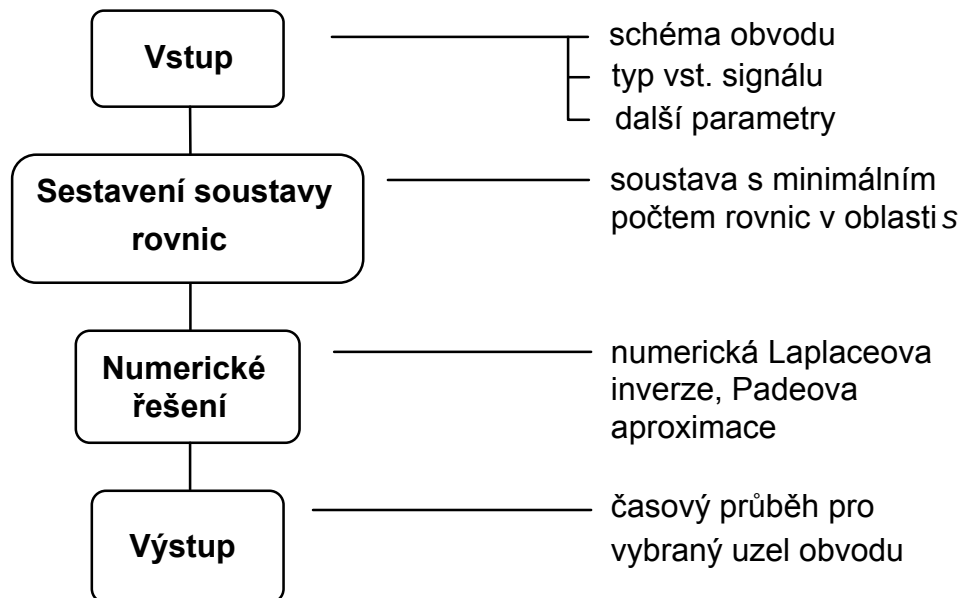
kde U_{vst} je Laplaceův obraz budicího napětí u_{vst} .

Vlastní algoritmus řešení obvodových rovnic

Pro výpočet časových průběhů signálů, neboli pro výpočet originálů jejich Laplaceových obrazů, je použit algoritmus numerické inverzní Laplaceovy transformace, který je popsán v dílčí výzkumné zprávě „Metody numerické inverze Laplaceova obrazu a jejich aplikace“ [12].

Blokové schéma algoritmu časové analýzy SC obvodů

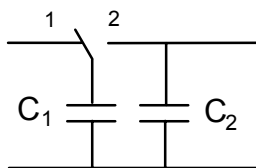
Na obr. 1.2. je ukázáno jednoduché blokové schéma algoritmu pro počítačovou simulaci SC obvodů v časové oblasti. Uživatel si může zvolit schéma obvodu, typ vstupního signálu (je již vytvořena banka vstupních signálů), průběh aproximace vstupního signálu během trvání jedné fáze [13], poměr f_{vst} / f_{vzork} , maximální výpočtový čas nebo počet aproximačních bodů uvnitř jedné fáze.



Obr. 1.2. Blokové schéma algoritmu.

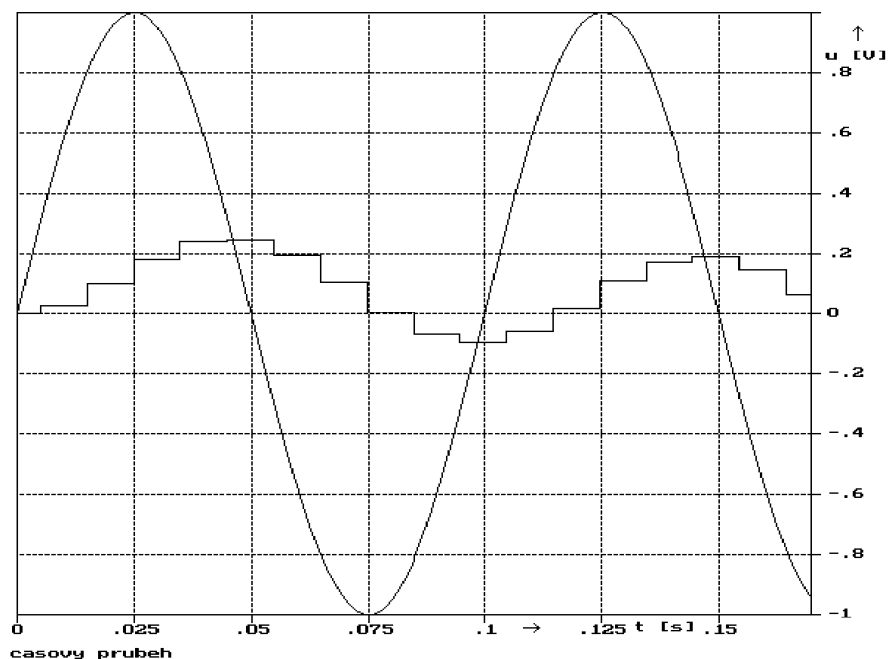
1.4. Výsledky počítačové simulace

V současné době jsou již k dispozici některé výsledky simulací. Simulované obvody jsou prozatím idealizované, mimo jiné proto, že pro tyto obvody máme možnost srovnání s již existujícím programem SCC [4]. Na obr. 1.3. je příklad analyzovaného obvodu.



Obr. 1.3. Příklad analyzovaného obvodu.

Na obr. 1.4. je ukázán příklad odezvy obvodu z obr. 1.3. na harmonické buzení.



Obr. 1.4. Odezva obvodu na harmonický vstupní signál
 $(f_{vst} / f_{vzork} = 1/10, T_{vst} = 0.1\text{s}, t_{\max} = 0.17\text{s})$.

Při simulaci byly testovány odezvy na různé typy vstupních signálů a pro různé parametry nastavení. Po srovnání s výsledky simulace pomocí programu SCC [15] se ukazuje velmi dobrá shoda.