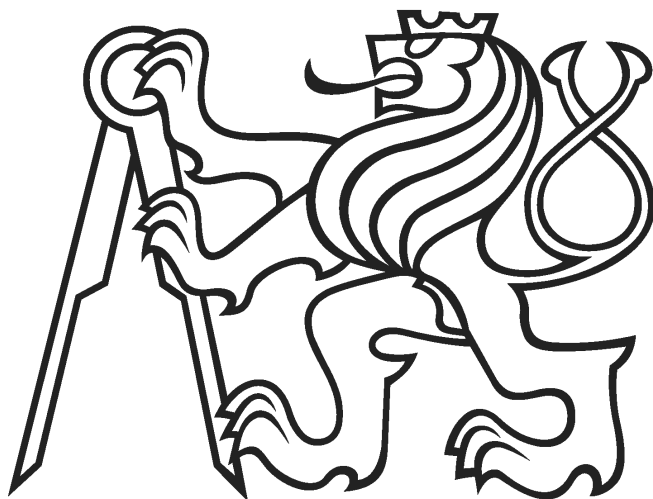


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra teorie obvodů

Ing. Lukáš Dolívka

**NÁVRH A OPTIMALIZACE DISKRÉTNĚ PRACUJÍCÍCH
ANALOGOVÝCH OBVODŮ S VYUŽITÍM
EVOLUČNÍCH ALGORITMŮ**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Teoretická elektrotechnika

Teze disertace k získání akademického titulu „doktor“, ve zkratce „Ph.D.“

Praha, leden 2012

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na katedře teorie obvodů Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Lukáš Dolívka
katedra teorie obvodů, Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel: Doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
katedra teorie obvodů, Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel-specialista: Ing. Jan Bičák, Ph.D.
katedra teorie obvodů, Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6

Oponenti:

.....

.....

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Teoretická elektrotechnika v zasedací místnosti č
Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Teoretická elektrotechnika
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

Obsah

1. Současný stav problematiky disertační práce	4
1.1. Evoluční algoritmy.....	4
1.1.1. Vlastnosti a popis evolučních algoritmů	4
1.1.2. Druhy evolučních algoritmů.....	5
1.2. Použití evolučních algoritmů pro elektrické obvody	5
1.2.1. Použití evolučních algoritmů pro analogové spojitě pracující obvody	6
1.2.2. Použití evolučních algoritmů pro analogové diskrétně pracující obvody	6
1.2.2.1. Použití evolučních algoritmů pro obvody se spínanými kapacitami.....	6
1.2.2.2. Použití evolučních algoritmů pro obvody se spínanými proudy	7
2. Cíle disertační práce	8
3. Metody zpracování	9
4. Výsledky disertační práce	10
4.1. Účelová funkce	10
4.2. Toleranční schéma.....	12
4.3. Vhodné algoritmy pro optimalizaci	12
4.4. Vhodné programy pro optimalizaci	14
4.4.1. Řídicí program.....	14
4.4.2. Analyzační program	14
4.5. Možnosti zrychlení optimalizace	15
4.6. Příklady optimalizace analogových diskrétně pracujících obvodů.....	16
5. Závěr	17
5.1. Shrnutí výsledů disertační práce a její přínos	17
5.1.1. Teoretický přínos.....	17
5.1.2. Praktický přínos.....	17
5.1.3. Celkový přínos	18
5.2. Vhodná témata další práce	18
6. Seznam autorových publikací a ohlasů na ně	19
6.1. Publikace vztahující se k tématu disertační práce.....	19
6.2. Publikace nevztahující se k tématu disertační práce	20
6.3. Ohlasy na autorovy publikace.....	20
7. Literatura	21
8. Summary	24

1. kapitola

Současný stav problematiky disertační práce

1.1. Evoluční algoritmy

1.1.1. Vlastnosti a popis evolučních algoritmů

Evoluční algoritmy (dále jen EA) lze stručně charakterizovat jako optimalizační metody spojující v sobě postupy z deterministických a stochastických algoritmů [4], [26], [43], [45]. Pojmeme *optimalizace* je míněno dosažení nějakého požadovaného stavu, jenž se vyznačuje nejvýhodnějšími, předem stanovenými parametry.

EA pro svoji činnost potřebují *účelovou funkci* (dále jen ÚF), která svojí hodnotou vyjadřuje výhodnost či nevýhodnost dosaženého stavu. Za nejvýhodnější stav je považováno, když ÚF má svoji nejnižší či nejvyšší hodnotu (globální minimum či maximum, obecně globální extrém) – podle konkrétního typu optimalizační úlohy. EA má tedy dosáhnout hodnoty ÚF rovné právě tomuto globálnímu extrému, a to prostřednictvím nalezení hodnot proměnných této funkce takových, že se při nich její hodnota nachází právě v globálním extrému.

EA se vyznačují následujícími výhodnými vlastnostmi [43]:

- Nekladou žádné podmínky na vlastnosti týkající se ÚF. Jediné, co jim postačuje, je samotná hodnota ÚF pro dané hodnoty jejích proměnných nacházející se v jejím definičním oboru (a toto musí být pochopitelně splněno u každé ÚF). Nevyžadují tedy ani spojitost ÚF, ani její diferencovatelnost (a tím ani spojitost derivací).
- Pokud má ÚF více globálních extrémů, EA je dokáží nalézt, tj. mohou poskytnout více než jedno řešení.
- Ze své podstaty se zaměřují na hledání globálního, a nikoliv lokálního extrému.
- Dokáží nalézt globální extrém(y) i ÚF s velkým počtem lokálních extrémů.
- Nepotřebují počáteční nastavení hodnot proměnných. Vhodné počáteční hodnoty jim pouze mohou pomoci rychleji dospět k optimálnímu řešení, nejsou ale podmínkou.
- Umožňují práci s proměnnými ÚF patřícími do různých číselných oborů, tj. nejen do množiny čísel reálných, ale i racionálních, celých, přirozených, diskretních apod. Pokud má ÚF více proměnných, mohou být číselné obory jednotlivých proměnných vzájemně odlišné. Navíc, rozsahy jednotlivých proměnných mohou být rozděleny na další intervaly, náležející do odlišných číselných oborů.

EA ale mají i nevýhody:

- Potřebují delší čas pro nalezení řešení. To je určitá daň za jejich robustnost.
- Při své činnosti využívají náhodnost, a proto dobu optimalizace nelze předpovídat. Může se proto stát, že pokud se nechá určitá úloha pomoci EA vyřešit několikrát, dospěje se k různým dobám potřebným pro získání výsledku.

Název *evoluční* je pro EA používán proto, že způsobem své činnosti napodobují evoluční (vývojové) děje v přírodě [26]. Stejně jako v přírodě probíhá vývoj jedinců v po sobě následujících generacích, je tomu tak i v EA. Pro pojem *generace* se užívá také termínů *populace*

nebo *cyklus*. V jedné generaci bývá určitý počet jedinců, označený N , který závisí na druhu EA a na dané optimalizační úloze. Jedinec je v přírodě vyjádřen pomocí hodnoty svých chromozomů, tento termín se užívá i v EA. Reprezentace jedince je v EA prakticky provedena tak, že je představován vektorem hodnot proměnných ÚF. Protože ÚF má obecně n proměnných, každý jedinec je vyjádřen jako n -prvkový vektor (v přírodní analogii to znamená, že jedinec má n -symbolový chromozom). Z hodnoty n se zpravidla určuje počet jedinců N , a to tak, že N bývá násobkem n [20].

EA probíhají v cyklech, v nichž se postupně získává lepší a lepší hodnota ÚF. Provádí se to tím způsobem, že se z jedinců v už hotové generaci vytvoří pomocí určitých operací skupina jedinců „mezigenerace“. Pro každého nového jedince je opět určena hodnota ÚF. Způsob výběru jedinců do další generace je u jednotlivých druhů EA různý, ale zjednodušeně lze říci, že se vybírá N nejlepších z poslední generace a z mezigenerace. Porovnávání jedinců se provádí právě podle hodnoty ÚF, lepší jedinec má svoji hodnotu ÚF blíže k hledanému optimu – globálnímu extrému ÚF – než jedinec horší. Tímto praktickým vyjádřením myšlenky, že přežít mohou jen ti nejlepší jedinci, se EA přibližují procesům v přírodě a inspirují se vývojem v ní probíhajícím.

1.1.2. Druhy evolučních algoritmů

Mezi EA jsou zařazeny tyto techniky:

- evoluční strategie (dále jen ES) [26], [30],
- genetické algoritmy (dále jen GA) [10], [11], [26], [27],
- evoluční programování (dále jen EP) [7], [26],
- genetické programování (dále jen GP) [18], [26],
- diferenciální evoluce (dále jen DE) [4], [12], [26], [29], [33], [40], [43],
- simplexová metoda (dále jen SM) [28],
- optimalizace pomocí mravenčí kolonie [26], [43],
- simulované žíhání [38],
- zakázané prohledávání [9],
- SOMA (Samo-Organizující se Migrační Algoritmus) [43], [44].

1.2. Použití evolučních algoritmů pro elektrické obvody

EA lze pro elektrické obvody použít dvojím způsobem: pro návrh a pro návrh kombinovaný s optimalizací. Při návrhu se EA používají např. pro nalezení hodnot součástí nebo koeficientů přenosové funkce v případech, kdy obvod má stanovené toleranční schéma požadované charakteristiky (modul přenosu, fáze přenosu, skupinové zpoždění apod.), které nelze splnit pomocí standardních aproximací a návrhových postupů.

Pokud se EA použijí pro návrh obvodu současně s optimalizací, cíl může být podobný jako v předchozím případě, avšak navíc je požadováno, aby obvod měl nějaké další vlastnosti. Těmi mohou být např. dosažení optimálních dynamických poměrů, respektování reálných vlastností použitých součástí, případně ještě rozptylu jejich hodnot a/nebo to, aby některá další charakteristika obvodu splňovala určité zadané toleranční schéma. Mají-li výsledné

vlastnosti zoptimalizovaného obvodu splňovat více požadavků, jedná se o tzv. *multikriteriální* optimalizaci [5].

1.2.1. Použití evolučních algoritmů pro analogové spojitě pracující obvody

Použití EA k optimalizaci analogových spojitě pracujících obvodů (dále jen ASP obvodů) bývá zaměřeno zejména na potlačení konečného činitele jakosti cívek u LC filtrů [40], neideálních vlastností operačních zesilovačů (dále jen OZ) u ARC filtrů [40], pro korekci skupinového zpoždění [42] či pro dosažení přijatelného rozptylu hodnot součástí [35] a/nebo optimálního dynamického rozsahu [36].

Z literatury je zřejmé, že pro návrh a/nebo optimalizaci ASP obvodů je využíváno několik druhů EA, jak dokazuje následující výčet několika příkladů aplikací EA pro tento účel. Pomocí GA je návrh ASP obvodu proveden v [19]. Článek [21] uvádí použití stejného algoritmu pro návrh integrovaných obvodů. GA doplněný o SM je využit pro návrh fázovacích článků v [46]. Co se týče DE, lze jmenovat publikace [24], [25], [35], [36] a [41]. Návrh aktivního filtru s korigovaným skupinovým zpožděním prostřednictvím algoritmu EDE (DE s upraveným způsobem výpočtu nového jedince doplněná o SM) popisuje [42]. Využití spojení DE a modifikovaného Remezova algoritmu při návrhu fázovacího článku ukazuje [47]. Při optimalizaci ASP obvodů se může uplatnit taktéž simulované žhání, viz [8]. V [34] je popsán návrh filtru s povrchovou akustickou vlnou využívající DE a GA.

1.2.2. Použití evolučních algoritmů pro analogové diskrétně pracující obvody

Analogové diskrétně pracující obvody (dále jen ADP obvody) se dělí na *obvody se spínanými kapacitami* (dále jen obvody SC) a *obvody se spínanými proudy* (dále jen obvody SI).

EA se v případě ADP obvodů, stejně jako v případě ASP obvodů, mohou využít jak pro jejich návrh, tak i pro návrh spojený optimalizací. Návrh a optimalizace ADP obvodů pomocí EA umožňuje zohlednit mj. i reálné vlastnosti v nich použitých součástí. To je shodné jako v případě ASP obvodů. Odlišností je ale to, že u ASP obvodů existují alespoň nějaké analytické metody pro jejich optimalizaci, kdežto u ADP obvodů takovéto metody prakticky nejsou, a pokud se tyto obvody mají optimalizovat, nezbyvá než použít nějakou neanalytickou metodu, např. právě EA.

1.2.2.1. Použití evolučních algoritmů pro obvody se spínanými kapacitami

Obvody SC se mohou skládat z těchto součástí [1], [23]: kapacitory, spínače, OZ a speciální funkční bloky, např. transkonduktanční zesilovače a proudové konvejeory.

V praxi se obvody SC běžně realizují v integrované podobě, přičemž spínače jsou vytvořeny pomocí tranzistorů, v dnešní době výhradně tranzistorů řízených elektrickým polem. Z této realizace jsou zřejmé zejména následující neideality spínačů:

- nenulový odpor v sepnutém stavu,
- nenulová vodivost v rozepnutém stavu,
- parazitní kapacity.

OZ se vyznačují těmito hlavními neidealitami:

- konečný tranzitní kmitočet,
- konečné stejnosměrné zesílení,
- konečná rychlost přeběhu,
- konečný vstupní odpor,
- nenulový výstupní odpor.

Výše uvedený seznam ukazuje, na jaké neideální vlastnosti by se měla optimalizace obvodů SC zaměřit. Zároveň s optimalizací těchto neidealit je vhodné zohlednit také ostatní vlastnosti obvodů SC, jejichž respektování přispěje k dalšímu zlepšení kvality jejich návrhu, a tím k jejich ještě výhodnějším charakteristikám. Mezi tyto vlastnosti patří např.:

- optimální dynamické poměry,
- rozptyl hodnot kapacit použitých kapacitorů.

V dostupné literatuře byly nalezeny jen dva články zabývající se optimalizací obvodů SC. Prvním je [39], v němž je provedena optimalizace obvodu složeného ze tří bikvadratických sekcí realizovaných technikou SC zapojených v kaskádě. Je použita DE, kterou se hledají hodnoty kapacitorů takové, aby se obvod vyznačoval zadanou přenosovou funkcí a zároveň dosahoval optimálního dynamického rozsahu a přijatelného rozptylu hodnot kapacitorů. Všechny součástky se ale uvažují ideální. Druhou publikací je [32].

1.2.2.2. Použití evolučních algoritmů pro obvody se spínanými proudy

Součástky využívané v obvody SI jsou tyto [23], [37]: kapacitory, spínače, tranzistory MOSFET a speciální funkční bloky, např. transkonduktanční zesilovače.

Z použitých součástek vyplývá, jaké neidealities se u obvodů SI mohou vyskytnout. U spínačů jsou tytéž jako v případě obvodů SC (viz předchozí podkapitola). Tranzistory MOSFET v obvodech SI realizují proudové zdroje a jako nejzávažnější neidealities lze u nich jmenovat konečný výstupní odpor a parazitní kapacity.

Jakožto další vlastnosti obvodů SI, jejichž optimalizací se dosáhne lepší realizovatelnosti těchto obvodů, lze jmenovat mj.:

- rozptyl hodnot transkonduktancí tranzistorů,
- součet hodnot transkonduktancí tranzistorů.

Optimalizaci obvodů SI je zřejmě doposud věnována jen velmi malá pozornost – v dostupné literatuře byla nalezena jen jedna publikace zabývající se optimalizací obvodů SI, a to [6].

Jak je patrné z velmi nízkého počtu publikací o optimalizaci ADP obvodů uvedených v této a předchozí podkapitole, je toto téma zatím velmi málo prozkoumané, a tudíž je záhodno se jím zabývat, což je cílem této disertační práce.

2. kapitola

Cíle disertační práce

Autor si stanovil pět následujících cílů své disertační práce:

- 1) Zdokonalit tvar ÚF běžně používaný pro optimalizaci ASP obvodů
Při optimalizaci ASP obvodů se využívá několika tvarů ÚF. Protože pro jednu optimalizační úlohu lze použít více zápisů ÚF, je možno upravením používaných tvarů ÚF docílit jejich výhodnějších vlastností. Autorova snaha bude zaměřena právě na vylepšení běžně používaných tvarů ÚF kvůli dosažení lepších výsledků při optimalizaci ADP obvodů.
- 2) Nalézt nevhodnější algoritmus pro optimalizaci ADP obvodů z existujících EA
V kap. 1.1.2 bylo uvedeno celkem deset optimalizačních technik patřících mezi EA. Různé druhy EA jsou vhodné pro různé optimalizační úlohy. Cílem autora je na základě zjištění z optimalizace ADP obvodů stanovit pro tuto činnost nevhodnější algoritmus.
- 3) Určit, které programy jsou nevhodnější pro optimalizaci ADP obvodů
V tomto bodě by chtěl autor ukázat, jak je možno provádět optimalizaci ADP obvodů s ohledem na dostupné programové prostředky. Týká se to jednak programu pro provádění výpočtů vlastního použitého EA a jednak programu pro analyzování optimalizovaného obvodu. Z vhodných variant by autor chtěl na základě vlastních poznatků určit nevhodnější spolu s jejich výhodami a nevýhodami.
- 4) Prozkoumat možnosti zrychlení optimalizace ADP obvodů
Co se týče snahy o vytvoření nové optimalizační techniky či zdokonalení nějaké už existující patřící do skupiny EA za účelem zrychlení optimalizace, jsou možnosti velmi omezené. Metody z oblasti EA jsou vytvářeny a vyvíjeny už více než pět desítek let, a proto lze prohlásit, že tato oblast je prozkoumána dosti podrobně.
Přesto zkrácení doby trvání optimalizace dosažitelné je, a to zrychlením činností vykonávaných mimo vlastní optimalizační algoritmus. V případě optimalizace ADP obvodů je z nich časově nejnáročnější analýza optimalizovaného obvodu. Autorova pozornost v tomto bodě bude tedy soustředěna hlavně na prozkoumání možností zrychlení analýzy.
Dále se lze zaměřit na další aspekty optimalizace přinášející její alespoň mírné zrychlení.
- 5) Aplikovat poznatky z předchozích bodů na optimalizace různých ADP obvodů pomocí EA
Ve výše uvedených bodech autor získá celou řadu zkušeností a znalostí, které hodlá využít při praktické optimalizaci reálných ADP obvodů. Vzhledem k tomu, že ADP obvody se užívají především pro kmitočtové filtry (tj. selektivní obvody), bude autorova pozornost upřena právě na tuto skupinu funkčních bloků. V úvahu připadají optimalizace s požadavkem na splnění jak jednoho hlediska, tak i více hledisek (multikriteriální optimalizace). Záměrem autora je dokumentovat použitelnost EA na řešení optimalizací konkrétních obvodů.

3. kapitola

Metody zpracování

Stanovené cíle disertační práce budou zpracovány těmito metodami (následující odstavce jsou očíslovány shodně s cíli v kap. 2, jejichž metody řešení popisují):

- 1) Autor zamýšlí vyjít z tvarů ÚF běžně používaných pro optimalizaci ASP obvodů a ty vhodně modifikovat tak, aby bylo dosaženo dokonalejších výsledků. Cíl by se dal nazvat i zobecněním některých používaných tvarů ÚF. Autorův tvar ÚF tak postihne více možností definice požadavků na výsledek optimalizace, zadávaných např. prostřednictvím tolerančního schématu. Taktéž umožní zohlednit větší množství cílů optimalizace v případě multi-kriteriálních optimalizací. Tento zdokonalený tvar ÚF bude detailně popsán v obecně podobě včetně všech s ním souvisejících skutečností, čímž bude umožněno snadno jej přizpůsobit na konkrétní zápis ÚF dané optimalizační úlohy.
- 2) Tento bod bude zpracován formou porovnání výkonnosti (rychlosti a robustnosti) několika vhodně zvolených optimalizačních algoritmů na vybraném ADP obvodu. Vzhledem k náhodnosti při běhu EA se může při vícenásobném provádění takové optimalizační úlohy dojít k (mírně) odlišným závěrům, proto výsledek bude průměrem několika optimalizací. Avšak v případě, že nějaký algoritmus dosahuje výsledků výrazně lepších než ostatní, zatímco jiný výrazně horších než ostatní, dá se oprávněně předpokládat, že tomu tak bude obecně, a nikoliv jen v několika optimalizacích.
- 3) Při zpracování tohoto bodu bude autor vycházet z vlastností a schopností nabízených jednotlivými použitelnými a dostupnými programy a také z vlastních zkušeností s nimi. Na základě těchto kritérií bude vybrán jak program pro provádění výpočtů vlastního použitého EA, tak program pro analyzování optimalizovaného obvodu. Hlavně v případě druhého programu bude dalším uvažovaným hlediskem rychlost, poněvadž analýza ADP obvodů tvoří podstatnou část doby trvání jejich optimalizace. Klíčové bude taktéž bezproblémové propojení těchto dvou programů při optimalizaci kvůli vzájemnému předávání dat mezi nimi.
- 4) Pro stanovení hodnoty ÚF je při optimalizaci ADP obvodů nutno provést jejich analýzu, která je dosti časově náročná. Autor bude tedy hledat způsob, jakým je možno ji alespoň mírně zrychlit. Jako možnost se nabízí použití vhodného tvaru ÚF. Pro dosažení co nejkratší doby trvání optimalizačního procesu je pochopitelně nutno použít co nejvýkonnější optimalizační algoritmus, ale tato problematika již byla probírána v bodě 2).
- 5) EA budou aplikovány na optimalizaci řady reálných ADP obvodů z praxe – jak obvodů SC, tak SI. Snahou autora je postihnout více zapojení obvodů. Rovněž počet zohledňovaných neidealit má být různý: od jedné až po několik. Optimalizační úlohy budou uvažovat i různý počet kritérií (cílů optimalizace). Autor plánuje jednak zjistit, zda jsou EA vůbec pro tento typ optimalizace použitelné, a jednak ukázat vlastní postup optimalizace a nastavení všech jejích parametrů. Samozřejmě má při řešení příkladů optimalizace v úmyslu zužitkovat poznatky nabyté v předchozích čtyřech bodech.

4. kapitola

Výsledky disertační práce

4.1. Účelová funkce

ÚF používaná autorem v sobě zahrnuje další funkci, dále označenou O – optimalizovanou. Průběh (tvar) této funkce má EA optimalizovat, tj. má jej změnit tak, aby vyhovoval stanoveným požadavkům. Při dosažení optimálního průběhu optimalizované funkce O má ÚF V optimální hodnotu.

Optimalizovaná funkce O má proměnné x_1 až x_n stejně jako ÚF V , navíc má ještě proměnnou x_0 , což je obvykle reálné číslo. Požadavek na výsledek optimalizace funkce O je ten, že její hodnota se při určitých hodnotách proměnné x_0 má nacházet v určitém intervalu. Ostatní proměnné x_1 až x_n optimalizované funkce O lze považovat za její parametry, pomocí jejichž vhodných hodnot se má jejího žádaného průběhu dosáhnout. Pro hodnoty funkce O je stanovena tato podmínka, která má být po optimalizaci splněna

$$O(w_i, x_1, x_2, \dots, x_n) \in \langle O_D(w_i), O_H(w_i) \rangle \quad \forall w_i, \quad (4.1)$$

kde $O(w_i, x_1, x_2, \dots, x_n)$ je hodnota optimalizované funkce, když se za proměnnou x_0 dosadí hodnota w_i . $O_D(w_i)$ a $O_H(w_i)$ jsou dolní a horní požadovaná mez intervalu hodnot optimalizované funkce pro hodnotu proměnné x_0 rovnu w_i . Touto podmínkou se tedy stanoví požadovaný (tj. optimální) průběh funkce O .

Obě meze $O_D(w_i)$ a $O_H(w_i)$ ale nemusejí být stanoveny pro všechny hodnoty w_i , pro některé z nich může být interval hodnot funkce O omezen jen z jedné strany. Pro tato w_i je tedy požadováno splnění jedné z následujících dvou nerovností

$$O(w_i, x_1, x_2, \dots, x_n) \leq O_H(w_i), \quad \text{pokud } O_D(w_i) = -\infty, \quad (4.2)$$

$$O(w_i, x_1, x_2, \dots, x_n) \geq O_D(w_i), \quad \text{pokud } O_H(w_i) = +\infty. \quad (4.3)$$

Také může být požadováno, aby hodnota funkce O při některých hodnotách w_i byla rovna jednomu konkrétnímu číslu. Tento požadavek je shodný s případem, kdy by platilo $O_D(w_i) = O_H(w_i) = O_K(w_i)$, podmínka (4.1) by pro tato w_i přešla na

$$O(w_i, x_1, x_2, \dots, x_n) = O_K(w_i). \quad (4.4)$$

ÚF používaná autorem má tento tvar

$$V(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^d V_{Di}(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^h V_{Hi}(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (4.5)$$

pro V_{Di} a V_{Hi} platí

$$V_{Di}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} \frac{O_D(w_i) - O(w_i, x_1, x_2, \dots, x_n)}{|O_D(w_i)|} & \text{pokud } O_D(w_i) > O(w_i, x_1, x_2, \dots, x_n), \\ 0 & \text{jinak,} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$V_{H_i}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} \frac{O(w_i, x_1, x_2, \dots, x_n) - O_H(w_i)}{|O_H(w_i)|} & \text{pokud } O_H(w_i) < O(w_i, x_1, x_2, \dots, x_n), \\ 0 & \text{jinak.} \end{cases} \quad (4.7)$$

Symbole d , resp. h označují počet hodnot w_i , pro které je stanovena dolní, resp. horní požadovaná mez.

Je zřejmé, že při dosažení průběhu optimalizované funkce, jenž byl požadován – tj. při splnění podmínky (4.1), má ÚF tvořená (4.5) až (4.7) nulovou hodnotu, což je v tomto případě zároveň její globální minimum.

Uvedená optimalizovaná funkce je optimalizovanou charakteristikou obvodu – např. modulem či fází přenosové funkce nebo skupinovým zpožděním. Tzn. má-li se u daného obvodu optimalizovat např. modul přenosu, je uvedená optimalizovaná funkce představována modulem jeho přenosové funkce.

Pokud se má zároveň optimalizovat více charakteristik obvodu, což je velmi výhodné pro řadu aplikací v praxi, je ÚF tvořena součtem více dílčích částí ve tvaru (4.5), přičemž v každé je použita jiná optimalizovaná funkce. ÚF tudíž může obsahovat i více než jednu optimalizovanou funkci. Je-li potřeba v optimalizaci zohlednit i další požadavky, lze zápis ÚF rozšířit ještě o další členy, které tyto požadavky matematicky vyjadřují. Při použití ÚF s více členy je podle zkušenosti autora vhodné přiřadit jednotlivým členům váhy (významnosti), jejichž vhodně nastavenými hodnotami lze podpořit úspěšnost optimalizace. Do ÚF může být včleněna rovněž i penalizační funkce, která se nemusí použít jen pro stanovení omezení hodnot proměnných, ale též pro vyjádření dalších žádaných vlastností výsledku optimalizace, např. požadavek na stabilitu zoptimalizovaného obvodu. Při nalezení optima celé ÚF se tak nalezne stav splňující všechny dílčí požadavky a všechny použité optimalizované funkce dosáhnou optimálního průběhu. U takovýchto multikriteriálních optimalizací (viz kap. 1.2) je ale nutno podotknout, že stanovení příliš mnoha požadavků na výsledné vlastnosti obvodu může vést k tomu, že se obvod stane neoptimalizovatelným, tj. není možno nalézt takové hodnoty proměnných ÚF, aby její hodnota dosáhla optima. Přitom dopředu nelze obecně říci, pro jak velkou skupinu požadavků může být daný obvod zoptimalizován.

Proměnné x_1 až x_n optimalizované funkce a ÚF mají význam parametrů optimalizovaného obvodu, nejčastěji hodnot jeho součástek nebo nul a pólů jeho přenosové funkce. Ve druhém případě jsou každý pól a každá nula vyjádřeny dvojicí hodnot – buďto reálnou a imaginární částí (což je ale spíše v případě ASP obvodů), nebo absolutní hodnotou a úhlem (případ ADP obvodů). Těmito proměnnými mohou být taktéž jiné parametry optimalizovaných obvodů, např. fyzické rozměry struktur na čipu integrovaného obvodu, mikropáskového vedení na plošném spoji apod. Na místo proměnné x_0 se většinou dosazuje kmitočet f , tj. množina hodnot w_i představuje skupinu kmitočtů f_i . Při optimalizaci jsou za proměnnou x_0 dosazovány hodnoty kmitočtů, čímž se získají hodnoty optimalizované funkce na těchto kmitočtech. Pro tyto hodnoty se poté zjišťuje, zdali jsou v mezích O_D až O_H pro tyto kmitočty stanovených. Meze O_D a O_H na daných kmitočtech lze tedy označit jako toleranční schéma modulu, fáze, skupinového zpoždění či jiné charakteristiky optimalizovaného obvodu, dané významem optimalizované funkce.

4.2. Toleranční schéma

Toleranční schéma pro optimalizaci elektrických obvodů většinou bezprostředně souvisí s ÚF, nejinak je tomu v případě autorova zápisu ÚF (4.5) až (4.7). V předchozí podkapitole už bylo zmíněno, že pro tento tvar ÚF toleranční schéma reprezentuje množina stanovených mezí O_D a O_H na daných kmitočtech f_i . Toto toleranční schéma může být definováno standardním způsobem, viz např. [23].

V případě ADP obvodů je ale jeden zásadní rozdíl oproti ASP obvodům. Tento rozdíl je důsledkem diskrétního charakteru jejich činnosti. Z něj vyplývá známý fakt, že jejich kmitočtová charakteristika je periodická s periodou rovnou spínacímu kmitočtu f_s .

Toleranční schéma by tedy stačilo definovat jen v intervalu kmitočtů 0 Hz až f_s . Avšak díky souměrnosti kmitočtové charakteristiky ADP obvodů v tomto intervalu podle kmitočtu $f_s/2$ zcela postačuje definování tolerančního schématu pouze v intervalu od 0 Hz do $f_s/2$.

4.3. Vhodné algoritmy pro optimalizaci

Autor na základě celé řady provedených optimalizací reálných ADP obvodů zjistil, že tento typ optimalizace představuje obecně poměrně značně složitou optimalizační úlohu. Je tedy potřeba zjistit, jaký algoritmus je nejvhodnější pro optimalizaci reálných ADP obvodů. Vhodný algoritmus byl hledán pochopitelně ve skupině EA. Nemusí to být ale nutně jen jeden samotný druh EA. Může jím totiž být i kombinace více algoritmů.

Aby bylo zřejmé, jaký algoritmus autor považoval za nejvhodnější pro optimalizaci reálných ADP obvodů, je dále uvedeno, jaké požadavky na takový algoritmus stanovil:

- 1) Robustnost – algoritmus neuvízne v lokálním extrému, ale nalezne globální extrém, nebo alespoň poskytne výsledek globálnímu extrému velmi blízký.
- 2) Rychlost – algoritmus vyžaduje pro dospění do globálního extrému, nebo alespoň získání výsledku velmi blízkého globálnímu extrému co nejméně generací.

Při výběru vhodných optimalizačních algoritmů se zohledňovaly jejich vlastnosti – některé EA jsou totiž již ze své podstaty pro optimalizaci ADP obvodů nevhodné. Mezi tyto EA patří např. EP a GP – jejich princip je předurčuje k jiným optimalizačním úlohám. ES také není příliš vhodná. Zato jako velmi vhodné se jeví GA a DE. Proto autor vybral právě tyto. V případě DE zvolil několik variant. Tyto metody navíc zkombinoval se SM, protože se domníval, že by mohla příznivě ovlivnit jejich výkonnost.

Jako vhodné byly vybrány následující algoritmy:

- a) DE, varianta DE/best/1/bin,
- b) DE, varianta DE/best/1/bin zkombinovaná se SM,
- c) DE, varianta DE/rand/1/bin,
- d) DE, varianta DE/rand/1/bin zkombinovaná se SM,
- e) DE, varianta DE/rand-to-best/1/bin,
- f) DE, varianta DE/rand-to-best/1/bin zkombinovaná se SM,
- g) DE, varianta EDE bez SM,
- h) DE, varianta EDE,

- i) GA,
j) GA zkombinovaný se SM.

Porovnání vybraných algoritmů bylo prováděno na optimalizaci filtru SC. V případě jejich použití na jinou optimalizační úlohu podobného charakteru – optimalizace reálného ADP obvodu – lze očekávat stejné vzájemné rozdíly mezi jednotlivými algoritmy, tzn. jejich výsledné pořadí výkonnosti by zůstalo zachováno.

ÚF použitá ve zvolené optimalizační úloze může nabývat jen nezáporných hodnot a její optimální hodnota je 0. Po optimalizačních algoritmech bylo požadováno, aby dosáhly hodnoty ÚF alespoň 10^{-10} , tj. při dosažení této nebo nižší hodnoty se optimalizace zastavila. Také byl stanoven nejvyšší počet generací, a to 2000.

Hodnoty parametrů použité pro jednotlivé optimalizační algoritmy:

- diferenciální evoluce: $CR = 0,9$, $F = 0,5$, λ – náhodné číslo z intervalu $(0,6, 0,99)$,
- genetický algoritmus: $m = 1$,
- simplexová metoda: $\alpha = 3$, $\beta = 2$, $\gamma = 0,5$.

Počet vektorů N v jedné generaci byl podle toho, zda je algoritmus se SM, nebo bez SM:

- bez SM: $N = 280$,
- se SM: $N = 84$, SM nahrazovala 30 vektorů s nejhorší hodnotou ÚF v dané generaci.

Tab. 4.1 obsahuje výsledky pro jednotlivé algoritmy: potřebný počet generací pro snížení hodnoty ÚF na alespoň 10^{-10} a hodnotu ÚF docílenou na konci optimalizace, tj. buď po zoptimalizování ÚF na hodnotu alespoň 10^{-10} , nebo po dosažení 2000. generace.

Výsledky zde prezentované byly získány jako průměr z několika optimalizací, aby se vyloučila náhodnost při jejich provádění.

Algoritmus	$G_{\text{Potř}}$	V_{Kon}
a) DE/best/1/bin	94	$8,6 \cdot 10^{-11}$
b) DE/best/1/bin + SM	60	$2,2 \cdot 10^{-11}$
c) DE/rand/1/bin	>2000	$1,4 \cdot 10^{-9}$
d) DE/rand/1/bin + SM	114	$4,0 \cdot 10^{-11}$
e) DE/rand-to-best/1/bin	179	$9,1 \cdot 10^{-11}$
f) DE/rand-to-best/1/bin + SM	72	$4,1 \cdot 10^{-11}$
g) EDE bez SM	173	$4,4 \cdot 10^{-11}$
h) EDE	61	$6,1 \cdot 10^{-11}$
i) GA	>2000	$3,9 \cdot 10^{-2}$
j) GA + SM	>2000	$7,3 \cdot 10^{-10}$

Tab. 4.1: Výsledky porovnání deseti různých optimalizačních algoritmů,
 $G_{\text{Potř}}$ potřebný počet generací pro dosažení hodnoty ÚF alespoň 10^{-10} ,
 V_{Kon} hodnota ÚF docílená na konci optimalizace.

Z výsledků je patrné, že GA, občas pro optimalizaci ASP obvodů používaný (viz kap. 1.2.1), není pro optimalizaci ADP obvodů vhodný, neboť není dostatečně robustní. Zkombi-

nje-li se se SM, dosahuje lepších vlastností, avšak stále horších než u ostatních algoritmů. Toto zlepšení vlastností (zvýšení rychlosti a robustnosti) přidáním SM se projevilo u všech zvolených algoritmů – potvrdil se tak autorův předpoklad. Nejlepším algoritmem se ukázala být DE, varianta DE/best/1/bin zkombinovaná se SM – algoritmus b), druhé místo obsadil algoritmus EDE. Vzhledem k velmi malému rozdílu mezi těmito dvěma algoritmy a kvůli náhodnosti v EA je lze považovat za stejně robustní a rychlé.

Získané výsledky ukazují rozdíl vůči srovnání výkonnosti algoritmu EDE s algoritmy DE při optimalizaci ASP obvodu, které je obsaženo v [40]. Tam algoritmus DE/best/1/bin dosahuje znatelně horších výsledků oproti algoritmu DE/rand-to-best/1/bin i oproti algoritmu EDE bez SM. Dále výše uvedené výsledky ukazují, že zkombinují-li se algoritmy DE/best/1/bin či DE/rand-to-best/1/bin se SM, dosahují při optimalizaci reálných ADP obvodů velmi obdobných výsledků jako metoda EDE – jinak řečeno: metoda EDE nepředstavuje nikterak zásadní zlepšení robustnosti a rychlosti optimalizace.

4.4. Vhodné programy pro optimalizaci

Pro provádění optimalizace ADP (i ASP) obvodů pomocí výpočetní techniky je potřeba jednak program pro vykonávání výpočtů vlastního optimalizačního procesu, dále označený jako řídicí, a jednak program pro analýzu optimalizovaného obvodu, dále nazvaný analyzační.

4.4.1. Řídicí program

Programy připadající v úvahu jako řídicí pro optimalizaci ADP obvodů jsou: Maple [14], [22], Matlab [16] a Mathematica [15]. Autor o vhodnosti programu rozhodoval na základě těchto svých požadavků:

- dostupnost programu na autorově pracovišti,
- autorova znalost funkcí a ovládání programu,
- možnost snadného propojení s analyzačním programem,
- schopnost programu provádět symbolické výpočty.

Tyto body lze označit za obecné požadavky na řídicí program, přičemž v různých podmínkách by je mohl splňovat různý program. V autorově případě všechny tyto požadavky splnil program Maple, a proto byl pro potřeby optimalizací vybrán. Na pracovišti, kde je uskutečňováno autorovo studium, již bylo jeho používání rozšířeno.

4.4.2. Analyzační program

Použitelné programy pro analýzu reálných ADP obvodů jsou např. Cadence [13], Mentor Graphics [17], WinSpice [31] a knihovna funkcí PraSCAn [2], [3] pro program Maple.

První tři autorovy požadavky na analyzační program jsou shodné s prvními třemi pro řídicí program. K těmto třem bodům byly přidány následující požadované vlastnosti:

- možnost analýzy reálných ADP obvodů,
- schopnost symbolické, nebo alespoň semisymbolické analýzy,

- možnost rychlého výpočtu kmitočtové charakteristiky.

Poněvadž všem stanoveným podmínkám vyhověla knihovna funkcí PraSCAN, autor ji vybral jako analyzační program pro své optimalizace. Tato knihovna představuje doplněk k programu Maple, vybranému autorem jakožto řídicí program, tudíž propojení řídicího a analyzačního programu je naprosto bezproblémové. Volba této knihovny pro optimalizaci se ukázala výhodná také z dalšího důvodu. Díky jejímu velmi intenzivnímu využití se jí totiž podařilo ve spolupráci s jejím autorem zdokonalit – zvýšit rychlost provádění analýz a odstranit několik jejich chyb.

Autor porovnával rychlost provádění analýzy prostřednictvím knihovny PraSCAN a ostatních výše uvedených programů použitelných pro analýzu reálných ADP obvodů. Zjistil tak, že tato knihovna dosahuje nejvyšší rychlosti (dokonce i když se neuvažuje čas potřebný pro výpočet DFT, kterou je nutno provést v případě ostatních programů). Tento poznatek rovněž opodstatňuje její využití při optimalizacích ADP obvodů.

4.5. Možnosti zrychlení optimalizace

Většina optimalizací ADP obvodů je vskutku složitá úloha, na jejíž vyřešení potřebuje běžný osobní počítač dlouhý čas. Autor však při provádění celé řady optimalizací našel jisté možnosti, jak je možno optimalizační proces alespoň mírně zrychlit.

- Použití symbolického či semisymbolického tvaru optimalizované funkce

Optimalizace, ve které jsou všechny optimalizované funkce v symbolickém tvaru, může trvat kratší čas než optimalizace s nejméně jednou optimalizovanou funkcí v semisymbolickém tvaru. Takovou optimalizovanou funkcí je totiž nutno během optimalizace opakovaně získávat pro každou kombinaci hodnot proměnných ÚF vzešlou z optimalizačního procesu.

Podle autorových zkušeností se skutečně u většiny optimalizací doba jejich běhu zkrátí, jestliže jsou všechny optimalizované funkce v symbolickém tvaru, avšak existují i případy optimalizací, kdy tomu tak není.

Je-li zápis symbolického tvaru optimalizované funkce extrémně složitý, trvá dosažení konkrétních hodnot proměnných ÚF do něj (aby se získal semisymbolický tvar) nezanedbatelný čas, zdatelně prodlužující dobu trvání optimalizace. Prodlužuje ji dokonce více, než pokud by se použila opakovaná analýza optimalizovaného obvodu, již by se semisymbolický tvar získal. V takovýchto případech je tedy skutečně lepší použít opakovanou analýzu optimalizovaného obvodu pro každou kombinaci hodnot proměnných ÚF, ačkoliv symbolický tvar optimalizované funkce existuje. Symbolický tvar optimalizované funkce je vždy lepší použít pro dosažení kratší doby trvání optimalizace, není-li příliš komplikovaný.

- Omezení intervalu hodnot proměnných ÚF

Jedním z opatření pro urychlení optimalizace může být omezení intervalů hodnot proměnných ÚF, tj. použití co nejužších intervalů. Podle zkušeností autora není vhodné používat rozsah hodnot proměnných vyšší než 2 až 3 řády, který používal ve svých optimalizacích. Pokud by bylo potřeba u velmi složitých optimalizací z důvodu jejich rychlejšího běhu dá-

le zúžit interval hodnot obvodových parametrů, lze provést např. citlivostní analýzu vlivu hodnot parametrů obvodu na jeho optimalizované vlastnosti: parametr, který má velký vliv na vlastnosti obvodu, nemusí mít tak široký interval hodnot jako parametr s nízkým vlivem.

- Kompilace celého programu s optimalizací

Vzhledem k poněkud větší výpočetní náročnosti EA by bylo výhodné použít pro zrychlení provádění optimalizace spustitelný soubor získaný kompilací souboru s programem optimalizace z programu Maple (program Maple je totiž interpret, a proto program v něm běží pomaleji, než kdyby byl nejdříve zkompilován).

Program Maple kompilaci souboru s programem umožňuje, avšak jen pro omezenou skupinu svých příkazů. Matematické operace použité v samotných EA jsou sice jednoduché a zkompilovat by je bylo možno, problém by ale představovalo získání hodnoty ÚF, a to jak při použití symbolického tvaru optimalizované funkce, tak bez něj. Vzhledem k problémům s kompilací autor od snahy zrychlit optimalizaci tímto způsobem upustil, i když si dobře uvědomuje její možný přínos.

4.6. Příklady optimalizace analogových diskrétně pracujících obvodů

Tato podkapitola ukazuje praktickou aplikaci autorových poznatků soustředěných v předcházejících podkapitolách této kapitoly při skutečných optimalizacích reálných ADP obvodů z praxe.

Jak už bylo uvedeno v kap. 1.2.2, ADP obvody se dělí na obvody SC a obvody SI. Toto dělení respektuje i tato podkapitola.

Autor se v několika popsaných příkladech optimalizace zaměřuje na selektivní obvody (kmitočtové filtry). V úvahu bere jejich různé neidealit, jejichž vliv na jejich vlastnosti optimalizací potlačuje, přičemž počet zohledněných kritérií je rovněž různý. Volba uvažovaných neidealit a kritérií vychází z jejich výčtu v kap. 1.2.2.1 (obvody SC) a 1.2.2.2 (obvody SI).

Neidealit a kritéria byla zvolena taková a v takovém počtu, aby optimalizace byly dostatečně názorné a vyhovujícím způsobem prakticky dokumentovaly skutečnosti popsané v kap. 4.1 až 4.5 na jedné straně a zároveň byly přijatelně složité na straně druhé. Autor si totiž uvědomuje, že by bylo možno stanovit ještě celou řadu dalších neidealit a kritérií, které by přispěly k lépe zoptimalizovaným obvodům. To by ale vedlo k daleko obtížnější optimalizaci s výrazně delší dobou trvání kvůli podstatně náročnější analýze optimalizovaného obvodu. Uvedené příklady optimalizací ale i přes svou omezenou složitost dávají postačující návod na to, jak takové komplikovanější optimalizace s vyšším počtem neidealit a kritérií prakticky provádět.

5. kapitola

Závěr

5.1. Shrnutí výsledů disertační práce a její přínos

5.1.1. Teoretický přínos

Teoretický přínos této práce spočívá v podrobném popsání tematiky provádění optimalizace reálných analogových diskrétně pracujících obvodů a zdokonalení řady jejích aspektů.

Autor zdokonalil tvar účelové funkce pro potřeby optimalizace analogových diskrétně pracujících obvodů (kap. 4.1). Též detailně objasnil všechny její souvislosti týkající se jak optimalizované funkce, která reprezentuje optimalizovanou charakteristiku daného obvodu a která je v účelové funkci zahrnuta, tak tolerančního schématu, s nímž účelová funkce v případě optimalizace analogových diskrétně pracujících obvodů bezprostředně souvisí. Poskytl také podrobný popis možností modifikace uvedeného obecného tvaru účelové funkce při požadavcích na zohlednění různorodých kritérií optimalizace, čímž je umožněno snadné sestavení konkrétního tvaru účelové funkce pro danou optimalizační úlohu podle cílů, jež mají být splněny. Autor taktéž podal vysvětlení vzájemného vztahu tvarů optimalizované a účelové funkce a jeho důsledků na způsob analýzy optimalizovaného obvodu. Rovněž ukázal, jak stanovit toleranční schéma pro optimalizaci analogových diskrétně pracujících obvodů, u něhož je možno využít periodicity jejich kmitočtové charakteristiky (kap. 4.2).

Podstatné je také autorovo určení nejlepšího optimalizačního algoritmu pro optimalizace reálných analogových diskrétně pracujících obvodů (kap. 4.3). Byl vybrán z celkem deseti různých evolučních algoritmů podle jejich rychlosti a robustnosti při této optimalizační úloze. Nejvhodnějším algoritmem byla shledána kombinace diferenciální evoluce a simplexové metody.

Autorova pozornost se zaměřila i na použitelné programy pro optimalizace analogových diskrétně pracujících obvodů na osobním počítači (kap. 4.4), a to jak pro vykonávání výpočtů vlastního optimalizačního algoritmu, tak pro analýzu optimalizovaného obvodu. Zde je důležité hlavně autorovo stanovení nejvhodnějšího analyzačního programu co do jeho rychlosti a praktičnosti podle řady provedených optimalizací.

Přínosná jsou i autorova zjištění možností zrychlení optimalizace analogových diskrétně pracujících obvodů, zejména volbou vhodného tvaru optimalizované funkce (kap. 4.5).

5.1.2. Praktický přínos

Jako praktický přínos této práce je možno označit několik prezentovaných příkladů optimalizace reálných analogových diskrétně pracujících obvodů z praxe (kap. 4.6).

Prostřednictvím těchto optimalizací autor splnil několik cílů. Jednak dokázal nejen použitelnost evolučních algoritmů pro jednodušší optimalizace těchto obvodů, ale navíc i jejich úspěšnost při náročných multikriteriálních optimalizacích majících několik cílů, jednak ukázal názorné uplatnění svých teoretických poznatků a zkušeností. Přínosná je též využitelnost

těchto příkladů pro ukázkou různých možností nastavení a způsobů provádění optimalizací, které vedou k různým výsledkům, jak co do rychlosti optimalizačního procesu, tak kvality a použitelnosti dosaženého řešení.

Přínosem těchto příkladů je rovněž to, že z nich lze snadno vycházet při řešení jiných optimalizací reálných analogových diskrétně pracujících obvodů. Názorně totiž ukazují, jak v takovýchto optimalizačních úlohách postupovat.

5.1.3. Celkový přínos

Záměrem této práce bylo podrobné prozkoumání oblasti optimalizace analogových diskrétně pracujících obvodů pomocí evolučních algoritmů jak z pohledu související teorie, tak i praktických příkladů. Na tuto oblast zatím nebyl v literatuře soustředěn velký zájem, což je zřejmě dáno větší obtížností spojenou s realizací této optimalizace.

Autor si pro tuto práci proto stanovil takové cíle, aby jejich vyřešení přineslo řadu cenných poznatků a nových skutečností a aby rozsah možností optimalizace analogových diskrétně pracujících obvodů nezaostával za ostatními druhy elektrických obvodů. Tyto získané výsledky svojí činností autor nejenže popsal v této práci, ale též publikoval v celé řadě svých článků, a to jak v knize, tak v recenzovaných časopisech a rovněž na konferencích. Z dosažených výsledků je zřejmé, že vytyčené cíle byly beze zbytku splněny.

Za celkový přínos této práce lze tak považovat právě to, že přináší celou řadu jak teoretických, tak praktických poznatků týkajících se aplikací evolučních algoritmů na tak významnou oblast elektrických obvodů, jakými analogové diskrétně pracující obvody bezesporu jsou.

5.2. Vhodná témata další práce

Přestože je tematika návrhu a optimalizace analogových diskrétně pracujících obvodů pomocí evolučních algoritmů v této práci popsána podrobně a obsírně, autor si uvědomuje, že by ji bylo možno rozšířit ještě o další hlediska. Těmi jsou hlavně další neidealita a parazitní vlastnosti zohledňované při optimalizaci, např.:

- napěťová závislost velikosti odporu spínačů, případně hodnot dalších součástek,
- šum a jeho vliv na parametry obvodů,
- citlivost charakteristik obvodů na hodnoty součástek,
- nábojová injekce,
- nelineární vlastnosti součástek, např. tranzistorů v obvodech se spínanými proudy.

Pokud by se měla některá (některé) z výše uvedených neidealit zahrnout mezi ty, které již autor ve svých optimalizacích uvažoval, je možno vycházet z popsaných příkladů, zejména z těch popisujících multikriteriální optimalizace. Též autorův popis účelové funkce dává dostatečně detailní návod na to, jak ji pro potřeby dalších požadavků na výsledek optimalizace upravit.

Dalším z možných námětů by mohla být snaha o zkrácení doby trvání optimalizace, např. cestou zefektivnění činnosti evolučních algoritmů a/nebo optimalizace jejich parametrů, a tím zvýšení jejich výkonnosti, či prostřednictvím zrychlení analýzy analogových diskrétně pracujících obvodů.

6. kapitola

Seznam autorových publikací a ohlasů na ně

6.1. Publikace vztahující se k tématu disertační práce

Publikace v impaktovaných časopisech, publikace v recenzovaných časopisech a patenty
Žádné

Publikace excerpované Web of Science

- [A1] Dolívka L., Hospodka J.: Elimination of Switch On-State Resistance Effect on a Switched-Capacitor Filter Characteristic. *Sborník konference PRIME 2006* (2nd Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics), str. 177 až 180. IEEE, 2006, ISBN 1-4244-0156-9. Podíl autora: 50 %.
- [A2] Dolívka L., Hospodka J.: Switched-Capacitor Filter Optimization with Respect to Switch On-State Resistance and Features of Real Operational Amplifiers. *Radioengineering*, ročník 16, č. 2, str. 34 až 39. Brno: VUT, 2007, ISSN 1210-2512. Podíl autora: 50 %.
- [A3] Dolívka L., Hospodka J.: Switched-Current Filter Optimization Based on Evolutionary Algorithms. *Sborník konference ECCTD'07* (2007 European Conference on Circuit Theory and Design) (na CD-ROM), str. 551 až 554. IEEE, 2007, ISBN 1-4244-1342-7. Podíl autora: 50 %.
- [A4] Dolívka L., Hospodka J.: Using the Differential Evolution Algorithm for the Multi-Objective Optimization of a Switched-Current Circuit. *Sborník konference CEC 2007* (2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation) (na CD-ROM), str. 1351 až 1358. IEEE, 2007, ISBN 1-4244-1340-0. Podíl autora: 50 %.
- [A5] Dolívka L., Hospodka J.: Ways to Optimize Analogue Switched Circuits. *Radioengineering*, ročník 17, č. 4, str. 48 až 54. Brno: VUT, 2008, ISSN 1210-2512. Podíl autora: 50 %.

Publikace ostatní

- [A6] Dolívka L., Hospodka J.: Optimization of a Switched-Capacitor Filter with Respect to Switch On-State Resistance. *Sborník konference NSSS VIII.* (Nové směry v spracování signálů VIII.), str. 75 až 80. Liptovský Mikuláš: Akadémia ozbrojených síl, 2006, ISBN 80-8040-294-9. Podíl autora: 50 %.
- [A7] Dolívka L., Hospodka J.: Characteristics of Evolutionary Algorithms and Their Applications in Electronics. *Sborník konference Digital Technologies 2007* (na CD-ROM). Žilina: Žilinská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2007, ISBN 978-80-8070-786-6. Podíl autora: 50 %.
- [A8] Dolívka L., Hospodka J.: Switched-Current Circuit Optimization. *Sborník konference Workshop 2008* (na CD-ROM), část A, str. 186 až 187. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008, ISBN 978-80-01-04016-4. Podíl autora: 50 %.

- [A9] Dolívka L., Hospodka J.: Using Various Evolutionary Algorithms for the Optimization of Analogue Switched Circuits. *Sborník konference NSSS IX.* (Nové směry v spracování signálův IX.) (na CD-ROM), str. 68 až 73. Liptovský Mikuláš: Akadémia ozbrojených síl, 2008, ISBN 978-80-8040-344-7. Podíl autora: 50 %.
- [A10] Dolívka L., Hospodka J., Barrera Avendano Y. M.: Possibilities of the Optimization of Switched-Current Circuits. *Sborník konference Digital Technologies 2008* (na CD-ROM). Žilina: Žilinská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2008, ISBN 978-80-8070-953-2. Podíl autora: 33 ⅓ %.
- [A11] Dolívka L., Hospodka J.: Using Evolutionary Algorithms for Optimization of Analogue Electronic Filters. Kapitola v knize: Kita E. (editor): *Evolutionary Algorithms*, str. 381 až 406. InTech, 2011, ISBN 978-953-307-171-8. Podíl autora: 50 %.

6.2. Publikace nevztahující se k tématu disertační práce

Publikace v impaktovaných časopisech, publikace excerповané Web of Science a patenty

Žádné

Publikace v recenzovaných časopisech

- [A12] Dolívka L., Hospodka J.: Návrh reproduktorových výhybek s uvažováním komplexní zátěže. *Akustické listy*, ročník 11, č. 4, str. 9 až 15. Praha: Česká akustická společnost, 2005, ISSN 1212-4702. Podíl autora: 50 %.

Publikace ostatní

- [A13] Dolívka L., Hospodka J.: A Design of Crossover Filters with Respect to a Complete Loudspeaker Equivalent Circuit. *Sborník konference Digital Technologies 2005*, str. 27 až 32. Žilina: EDIS – vydavatelství ŽU, 2005, ISBN 80-8070-486-4. Podíl autora: 50 %.
- [A14] Dolívka L., Bičák J.: Semi-Symbolic Determinant Calculation by Means of Polynomial Interpolation. *Sborník konference Digital Technologies 2006* (na CD-ROM). Žilina: Žilinská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2006, ISBN 80-8070-637-9. Podíl autora: 50 %.

6.3. Ohlasy na autorovy publikace

Autorova publikace [A2] je citována v článcích:

- Biolek D., Biolková V., Kolka Z.: AC Analysis of Idealized Switched-Capacitor Circuits in Spice-Compatible Programs. *Sborník 11th WSEAS International Conference on Circuits*, str. 222 až 226. Atény: WSEAS Press, 2007, ISBN 978-960-8457-89-8.
- Soares C. F. T., de Mesquita Filho A. C., Petraglia A.: Using a Genetic Algorithm to Optimize Capacitance Ratio Approximations in SC Filters. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, ročník 29, č. 4, str. 687 až 707. Springer, 2010, ISSN 0278-081X.

7. kapitola

Literatura

- [1] Ananda P. V. M., Ramachandran V., Swamy M. N. S.: *Switched Capacitor Filters – Theory, Analysis and Design*. Prentice Hall International, 1995, ISBN 0-13-879818-4.
- [2] Bičák J., Hospodka J.: PraSCAN – Maple Package for Analysis of Real Periodically Switched Circuits. *Sborník Maple Conference 2005*, str. 8 až 18. Waterloo Ontario: Maplesoft, a division of Waterloo Maple, Inc., 2005, ISBN 1-894511-85-9.
- [3] Bičák J., Hospodka J.: Symbolic Analysis of Periodically Switched Linear Circuits. *Sborník konference SMACD'06* (na CD-ROM). Florencie: Università degli Studi, 2006, ISBN 88-8453-509-3.
- [4] Corne D., Dorigo M., Glover F. (editoři): *New Ideas in Optimization*. Londýn: McGraw-Hill, 1999, ISBN 0-07-709506-5.
- [5] Deb K.: *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, 2009, ISBN 978-0-470-74361-4.
- [6] Erten I. G., Dundar G., Balkir S.: Optimization and Synthesis of Switched Current Filters with Nonideal MOS Transistors. *Sborník Third International Workshop on Design of Mixed-Mode Integrated Circuits and Applications 1999*, str. 13 až 17. 1999, ISBN 0-7803-5588-1.
- [7] Fogel L. J., Owens A. J., Walsh M. J.: *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*. New York: John Wiley, 1966, ISBN 0-471-26516-0.
- [8] Gielen G. G. E., Walscharts H. C. C., Sansen W. M. C.: Analog Circuit Design Optimization Based on Symbolic Simulation and Simulated Annealing. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, ročník 25, č. 3, str. 707 až 713. IEEE, 1990, ISSN 0018-9200.
- [9] Glover W. F., Laguna M.: *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, 1998, ISBN 0-7923-8187-4.
- [10] Goldberg D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co., 1989, ISBN 0-201-15767-5.
- [11] Holland J. H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, 1975, ISBN 0-472-08460-7.
- [12] Chakraborty U. K. (editor): *Advances in Differential Evolution (Studies in Computational Intelligence, sv. 143)*. Berlín: Springer-Verlag, 2010, ISBN 978-3-642-08839-1, ISSN 1860-949X.
- [13] Internetová stránka tvůrce programu Cadence, firmy Cadence Design Systems, Inc. (cit. 13. 12. 2011): <http://www.cadence.com>.
- [14] Internetová stránka tvůrce programu Maple, firmy Maplesoft, a division of Waterloo Maple, Inc. (cit. 13. 12. 2011): <http://www.maplesoft.com>.
- [15] Internetová stránka tvůrce programu Mathematica, firmy Wolfram Research, Inc. (cit. 13. 12. 2011): <http://www.wolfram.com>.

- [16] Internetová stránka tvůrce programu Matlab, firmy The MathWorks, Inc. (cit. 13. 12. 2011): <http://www.mathworks.com>.
- [17] Internetová stránka tvůrce programu Mentor Graphics, firmy Mentor Graphics Corporation (cit. 13. 12. 2011): <http://www.mentor.com>.
- [18] Koza J. R.: *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge: The Massachusetts Institute of Technology Press, 1992, ISBN 0-262-11170-5.
- [19] Kruiskamp M. W., Leenaerts D. M. W.: Darwin: Analogue Circuit Synthesis Based on Genetic Algorithms. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, ročník 23, str. 285 až 296. 1995, ISSN 0098-9886.
- [20] Lobo F. G., Lima C. F., Michalewicz Z. (editoři): *Parameter Setting in Evolutionary Algorithms (Studies in Computational Intelligence, sv. 54)*. Berlín: Springer-Verlag, 2010, ISBN 978-3-642-08892-6, ISSN 1860-949X.
- [21] Lourenço N., Vianello M., Guilherme J., Horta N.: LAYGEN – Automatic Layout Generation of Analog ICs from Hierarchical Template Descriptions. *Sborník konference PRIME 2006*, str. 213 až 216. IEEE, 2006, ISBN 1-4244-0156-9.
- [22] *Maple Learning Guide*. Maplesoft, a division of Waterloo Maple, Inc., 2003, ISBN 1-894511-42-5.
- [23] Martinek P., Boreš P., Hospodka J.: *Elektrické filtry*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003, ISBN 80-01-02765-1.
- [24] Martinek P., Maršík J.: Optimized Design of Analogue Circuits Using DE Algorithms. *Sborník konference EDS'05 IMAPS CS*, str. 385 až 389. Brno: VUT, 2005, ISBN 80-214-2990-9.
- [25] Martinek P., Tichá D.: Analog Filter Design Based on Evolutionary Algorithms. *Sborník konference AEE'05 (Fourth WSEAS International Conference)*, sv. 1, str. 111 až 115. Atény: WSEAS, 2005, ISBN 960-8457-13-0.
- [26] Mařík V., Štěpánková O., Lažanský J. a kol.: *Umělá inteligence, 1., 2., 3., 4. a 5. díl*. Praha: Academia, 1993, 1997, 2001, 2003 a 2007, ISBN 80-200-0496-3, 80-200-0504-8, 80-200-0472-6, 80-200-1044-0 a 80-200-1470-5.
- [27] Michalewicz Z.: *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer, 2011, ISBN 978-3-642-08233-7.
- [28] Nelder J. A., Mead R.: A Simplex Method for Function Minimization. *Computer Journal*, ročník 7, č. 4, str. 308 až 313. 1965.
- [29] Qing A.: *Differential Evolution: Fundamentals and Applications in Electrical Engineering*. John Wiley-IEEE Press, 2009, ISBN 978-0-470-82392-7.
- [30] Schwefel H.-P.: *Evolution and Optimum Seeking*. New York: Wiley Interscience, 1995, ISBN 0-471-57148-2.
- [31] Smith M.: *WinSpice User's Manual*. <http://www.winspice.com> (cit. 13. 12. 2011).
- [32] Storn R.: System Design by Constraint Adaptation and Differential Evolution. *Technical report TR-96-039*. ICSI, 1996.

- [33] Storn R., Price K.: Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, ročník 11, č. 4, str. 341 až 359. Kluwer Academic Publishers, 1997, ISSN 0925-5001.
- [34] Tagawa K.: Evolutionary Computation Techniques for the Optimum Design of Balanced Surface Acoustic Wave Filters. *Sborník konference CEC 2008*, str. 299 až 304. IEEE, 2008, ISBN 978-1-4244-1822-0.
- [35] Tichá D., Martinek P.: Narrow-Band-Pass Filter Design Using Evolutionary Algorithms. *Sborník konference Radioelektronika 2005*, str. 17 až 20. Brno: VUT, FEI, Ústav radioelektroniky, 2005, ISBN 80-214-2904-6.
- [36] Tichá D., Martinek P.: OTA-C Lowpass Design Using Evolutionary Algorithms. *Sborník konference ECCTD'05*, sv. 2, str. 197 až 200. Cork: University College Cork, 2005, ISBN 0-7803-9066-0.
- [37] Toumazou C., Hughes J. B., Battersby N. C.: *Switched-Currents: An Analogue Technique for Digital Technology*. Londýn: Peter Peregrinus Ltd., 1993, ISBN 0-86341-294-7.
- [38] Van Laarhoven M. J. P., Aarts L. H. E.: *Simulated Annealing: Theory and Applications*. Kluwer Academic Publishers, 1987, ISBN 90-277-2513-6.
- [39] Vestenický M., Vestenický P.: Evolutionary Algorithms in Design of Switched Capacitors Circuits. *Sborník konference Digital Technologies 2004*, str. 34 až 37. Žilina: EDIS – vydavateľstvo ŽU, 2004, ISBN 80-8070-334-5.
- [40] Vondraš J.: *Aplikace evolučních algoritmů při návrhu selektivních obvodů*. Disertační práce. Praha: ČVUT, FEL, katedra teorie obvodů, 2003.
- [41] Vondraš J., Martinek P.: Multi-Criterion Filter Design via Differential Evolution Method for Function Minimization. *Sborník konference ICCSC'02*, sv. 1, str. 106 až 109. Petrohrad: St. Petersburg State Technical University, 2002, ISBN 5-7422-0260-1.
- [42] Vondraš J., Martinek P.: Návrh aktivních filtrů s korigovaným skupinovým zpožděním pomocí EDE metody. *Sborník konference NSSS VI.*, sv. 1, str. 36 až 39. Liptovský Mikuláš: Vojenská akadémia, 2002, ISBN 80-8040-180-2.
- [43] Zelinka I.: *Umělá inteligence v problémech globální optimalizace*. Praha: BEN – technická literatura, 2002, ISBN 80-7300-069-5.
- [44] Zelinka I., Lampinen J.: SOMA – Self-Organizing Migrating Algorithm. *Sborník konference Mendel'00*, str. 177 až 187. Brno: 2000, ISBN 80-214-1609-2.
- [45] Zelinka I., Oplatková Z., Šeda M., Ošmera P., Včelář F.: *Evoluční výpočetní techniky: Principy a aplikace*. Praha: BEN – technická literatura, 2008, ISBN 80-7300-218-3.
- [46] Žiška P., Laipert M.: Novel Design Method of Analog All-Pass Filters. *Sborník konference ISSCS 2005*, sv. 1, str. 331 až 334. Iasi: Technical University, 2005, ISBN 0-7803-9029-6.
- [47] Žiška P., Vrbata J.: Method for Design of Analog Group Delay Equalizers. *Sborník konference ISCAS 2006*, str. 445 až 448. IEEE, 2006, ISBN 0-7803-9389-9.

8. kapitola

Summary

This dissertation thesis is focused on applying evolutionary algorithms to optimization of analogue discrete-working circuits. The main content of this thesis is created by its two parts, formed by two chapters. Several chapters are added to them.

The first main part of the thesis, placed into the second chapter, deals with an optimization task and the way of its solving both by classical – i.e., analytical – methods and by numerical methods, which are represented by evolutionary algorithms. The description of evolutionary algorithms follows: classification, features and the way of working. The way how to use evolutionary algorithms for optimization of electronic circuits is also presented together with many application examples from literature for analogue continuously-working circuits, analogue discrete-working circuits and digital circuits. Possible applications of evolutionary algorithms in branches other than electronics are mentioned briefly. The features of analogue discrete-working circuits are described as well. At the end of the first main part of the thesis there are two subchapters concerning programs usable for carrying out optimization and analysis of analogue discrete-working circuits and problems of the analysis.

The third chapter follows, where the topic of this thesis is substantiated based on a very low number of publications about optimization of analogue discrete-working circuits. According to this fact, a few aims are set. The methods how the author plans to process the aims are explained in the fourth chapter.

The second main part of the thesis, included in the fifth chapter, represents author's own results. In the first subchapter of this chapter, the results are divided into several following subchapters in accordance with the set aims. The subchapters are focused on an objective function, a tolerance mask specification, suitable algorithms and programs for optimization of analogue discrete-working circuits, and possibilities of speeding up the optimization. Four examples of optimization of switched-capacitor and switched-current circuits are at the end of the fifth chapter. Author's findings described in the previous subchapters of this chapter are applied during solving the examples.

The sixth chapter summarizes the content of the dissertation thesis and evaluates the results achieved by the author within the frame of his doctoral study in detail. The results are compared with the set aims. The theoretical, practical, and overall contribution of the thesis is presented too.

Author's publications are listed in the seventh chapter. Publications in a book, in reviewed journals and at conferences are among them. In addition, the chapter contains citations of the author's publications and a list of grants that the author solved.

At the end of the thesis, there is a chapter with literature dealing with analogue discrete-working circuits, evolutionary algorithms, their applications for optimizations, and related topics. This literature was used by the author while writing his thesis.