

TEACHING THE ANALYSIS OF CIRCUITS CONTAINING OpAmps IN BACHELOR'S STUDY PROGRAMMES

VÝUKA ANALÝZY OBVODŮ S OPERAČNÍMI ZESILOVAČI V BAKALÁŘSKÝCH STUDIJNÍCH PROGRAMECH

Dalibor Biolek

Univerzita Obrany v Brně, K263, Kounicova 65, 612 00 Brno, dalibor.biolek@unob.cz

Abstract:

Some basic and simple techniques are described how to teach heuristic methods of the analysis of simple linear circuits containing OpAmp.

1. Úvod

Článek navazuje na úvahy v publikaci [1] o zásadách a metodách analýzy základních lineárních odporových obvodů, které se osvědčují v úvodních elektrotechnických předmětech bakalářských studijních programů. Tzv. heuristické přístupy se zde upřednostňují před algoritmickými [2]. Jinými slovy, student by se měl učit analyzovat obvod se znalostí a porozuměním jeho fungování, ne se znalostí algoritmického postupu k cíli analýzy. V této úvodní fázi studia elektrotechniky je jedním z nejdůležitějších cílů studentova snažení pochopit jednoduchost a sílu tří základních zákonů využívaných k analýze a několika užitečných pouček a metod z nich odvozených. K aktivnímu osvojení z toho vyplývajících postupů analýzy je zapotřebí rozvíjet schopnosti studentů tvůrčím způsobem řešit konkrétní problémy analýzy. Toto nelze realizovat jinak než řešením mnoha příkladů.

Operační zesilovač (OZ) je dnes často používanou součástí. Jeho specifické parametry mají za následek jeho specifické chování v aplikacích, což studentům zpočátku činí velké problémy. Proto by řešení obvodů s OZ mělo být vyučováno postupně od nejjednodušších lineárních aplikací. Zpočátku je vhodné omezit se na jednoduchý lineární model OZ a nezahlcovat studenty informacemi, které nejsou nezbytné pro pochopení fungování OZ v stejnosměrném ustáleném stavu.

V článku se nejprve zamyslíme nad nutnými prerekvizitami analýzy, tzn. co vše by mělo být odpřednášeno předtím, než přistoupíme k analýze základních lineárních obvodů s OZ. V další části se podělíme se čtenářem o naše zkušenosti, jak učit naprosté základy heuristické analýzy obvodů s operačními zesilovači.

2. Prerekvizity analýzy

Jestliže operační zesilovač představíme studentům jeho schématickou značkou s třemi vývody a vyjmenujeme jeho ideální vlastnosti – nekonečné zesílení, nekonečný vstupní odpor a nulový výstupní odpor, pak to není dobře, neboť studenti si tento obvodový prvek zafixují v paměti jako třísvorkové perpetuum mobile se zázračnými parametry, nikoliv jako reálnou součástku, běžně dostupnou v obchodě s elektronikou, která k tomu, aby fungovala, potřebuje kromě signálového buzení ještě i napájecí zdroje. Pro první představení OZ používáme například tento postup:

Nakreslíme značku OZ s pěti vývody a kromě signálových vývodů ošetříme i napájecí vývody symetrickým napájením ze dvou baterií. Můžeme nechat kolovat nebo promítneme, jak vypadá například dvojitý operační zesilovač 1458 (tzv. „dvojitá sedumset-

čtyřicetjednička“), a připojíme zapojení vývodů. Poté vysvětlíme, že uvnitř je složitá tranzistorová struktura, která se v konečném důsledku chová tak, že:

- výstupní napětí závisí na diferenčním vstupním napětí
- výstupní napětí je limitováno napětím napájecích zdrojů (saturace)
- zesílení obvodu je značné, takže již při relativně velmi malém diferenčním napětí dochází k uvedené limitaci.

Následuje náčrt statické převodní charakteristiky OZ s respektováním parametrů OZ typu 741. Pak se uvedou číselné hodnoty dalších základních parametrů zesilovače 741 (kromě stejnosměrného zesílení ještě vstupní a výstupní odpor) a limitním přechodem se dospěje k parametrům ideálního OZ. Jednoduše se vysvětlí, proč je výhodné požadovat nulový výstupní a nekonečný vstupní odpor.

Pak přistoupíme k dvojici pouček typu „nulové vstupní proudy“ a „nulové diferenční napětí“. První z nich není problém. Protože se v této fázi výuky nemůžeme opřít o znalosti partií o zpětné vazbě (ZV), nezbyvá než ukázat pomocí grafu převodní charakteristiky, že podaří-li se OZ udržet v lineárním režimu, tj. zabráníme-li saturaci, pak to automaticky znamená prakticky nulové diferenční napětí. Dále nezbyvá než konstatovat, že všechna možná zapojení OZ je možno rozdělit na zapojení bez ZV, s kladnou a zápornou ZV. U třetí skupiny obvodů působí záporná ZV autoregulačním způsobem tak, že OZ je udržován v lineárním režimu, na rozdíl oproti kladné ZV, jejímž důsledkem je přechod OZ do saturace. Prozatímni závěr – u obvodů se zápornou ZV lze použít pravidlo o nulovém diferenčním napětí. Pravidlo o nulových vstupních proudech lze použít vždy.

Následují ukázky invertující a neinvertující varianty zesilovačů s OZ a „laické“ vysvětlení, proč jde o zápornou ZV. Její regulační účinky je možné ilustrovat pomocí „teorie trpaslíka“.

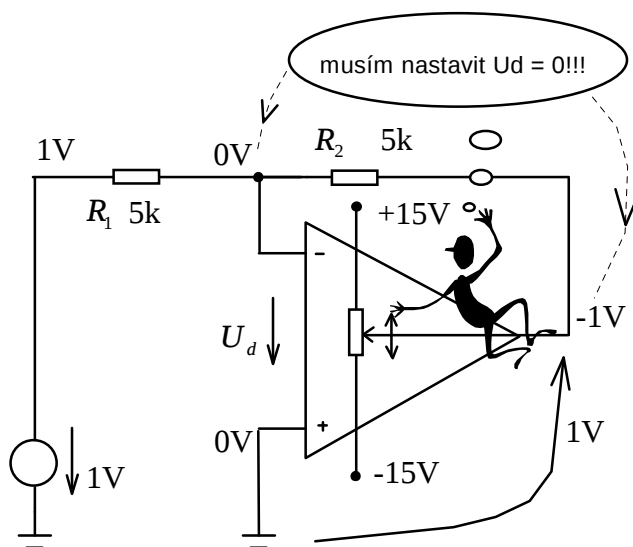
Pomocí postupů popsaných v části 4 je možné zahájit heuristickou analýzu těchto obvodů.

3. Teorie trpaslíka

Podle této teorie [2] je uvnitř každého operačního zesilovače, který je zapojen ve smyčce záporné ZV, trpaslík, který neustále sleduje diferenční napětí a reguluje výstupní napětí ideálního OZ tak, aby diferenční napětí bylo stále nulové. Pohledem na obr. 1 zjistíme, že trpaslík má jedinou možnost, jak dostavit diferenční napětí na nulu: Nastavením výstupního napětí na -1V.

Pokud se napětí v obvodu mění v čase, má to trpaslík s dostavováním nulového diferenčního napětí náročnější. Při rychlých změnách signálu již nestačí pružně reagovat. Operační zesilovač je v podstatě zesilovač nízkofrekvenční.

V [2] je ukázáno, že teorie trpaslíka může být snadno rozšířena i na operační zesilovače s proudovou zpětnou vazbou (CFA), kdy na nulu není doregulováno diferenční napětí, nýbrž proud invertujícího vstupu. Pak už zbývá jen krůček k pochopení toho, že mezi chováním ideálních operačních zesilovačů klasických (VFA) a CFA není žádný rozdíl (v obou případech je nulové diferenční napětí i nulové vstupní proudy), a tedy že všechny „lineární“ metody analýzy platné pro ideální VFA můžeme použít i pro obvody s ideálními CFA.



Obr. 1 K teorii trpaslíka.

4. Postupy analýzy

Praktický postup při řešení obvodů s ideálními operačními zesilovači je založen na tzv. **zlatém pravidlu**:

Vstupní proudy OZ jsou nulové.

Když

OZ pracuje v lineárním režimu

tak

diferenční napětí je nulové

jinak

takové zapojení zatím neumím řešit

Rozhodování o tom, zda „OZ pracuje v lineárním režimu“, se v okamžiku, kdy nejsou probrány partie o zpětné vazbě, musí zatím vyřešit vhodným kompromisním způsobem.

Ve schématu je vhodné nejprve vyznačit nulové diferenční napětí a nulové vstupní proudy. V druhé fázi nastupuje intuitivní řešení obvodu s těmito vyznačenými omezujícími podmínkami.

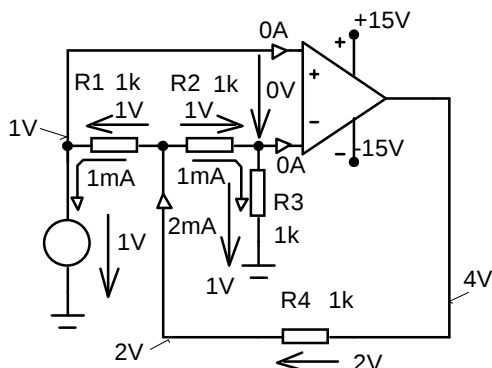
Všechny jednoduché lineární obvody s operačními zesilovači je možné rozdělit do dvou skupin: 1. obvody s „přímým“ řešením, 2. ostatní obvody. První skupinou se rozumí obvody, u nichž existují postupy, jak aplikací prvního a druhého Kirchhoffova zákona a Ohmova zákona přímo počítat krok za krokem napětí a proudy na jednotlivých dvojpólech obvodu a uzlová napětí, bez jakýchkoliv postranních mezivýpočtů. Jinými slovy, začne se ze znalosti vstupního napětí či proudu a do schématu se postupně doplňují jednotlivá napětí a proudy až po dosažení cíle analýzy. Zde je často výhodné používat pomocnou metodu potenciálů [1].

U složitějších obvodů skupiny 2 je „každá rada drahá“. Často si lze pomoci metodou „klíčové neznámé“ [1], metodou úměrných veličin [3], nebo jejich kombinací.

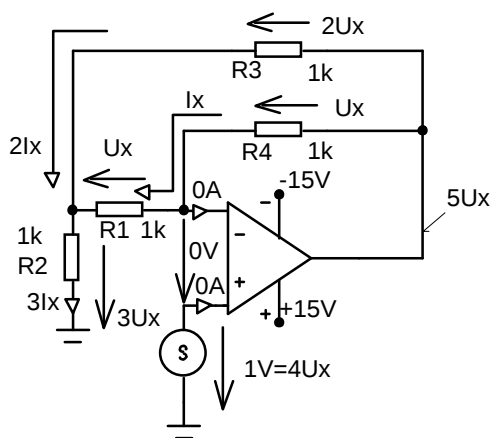
5. Ukázkové příklady

Na obr. 2 je ukázka obvodu, u něhož je možné uplatnit přímé řešení. Osvědčený postup je tento:

1. V obvodu vyznačíme nulové diferenční napětí a nulové vstupní proudy.
2. V důsledku nulového diferenčního napětí musí být na R_3 napětí 1V.
3. Proud R_3 musí být proto 1mA. Tento proud teče celý přes R_2 v důsledku nulového vstupního proudu.
4. Na R_2 vyvolá tento proud úbytek napětí 1V. V důsledku nulového diferenčního napětí je toto napětí i na R_1 s polaritou podle obr. 2.



Obr. 2 Obvod s „přímým“ řešením.



Obr. 3 Příklad obvodu s nepřímým řešením.

5. Proud R1 je tedy 1mA. Pro zajímavost – teče do vstupního zdroje tak, že tento se chová jako spotřebič.
6. Do obvodu doplníme k jednotlivým uzlům potenciály, tj. napětí mezi daným uzlem a zemí. Výstupní napětí pak vyjde 4V.

Na obr. 3 je obvod, který nelze řešit takto přímo. Níže je ukázka použití metody klíčové neznámé.

Rezistory R1 a R4 teče stejný proud. Označíme jej I_x . Úbytek napětí na R1 a R4 bude stejně velký, označíme jej U_x . U_x ve voltech se číselně rovná I_x v miliampérech. Na R3 musí být součet napětí na R1 a R4, tedy $2U_x$ a proud R3 bude $2I_x$. Proud R2 je dán součtem proudů rezistory R1 a R3, tedy $3I_x$. Napětí na R2 tedy bude $3U_x$. Napětí na vstupech IZ oproti zemi je rovno součtu napětí na R1 a R2, tedy $4U_x$. To je ale vstupní napětí 1V. Proto $U_x = 0,25V$. Napětí na výstupu OZ bude rovno součtu napětí na R4, R1 a R2, resp. součtu napětí na R4 a vstupního napětí, tedy $5U_x = 1,25V$.

Pro úplné začátečníky doporučujeme tyto příklady řešit nikoliv pomocí symbolů, ale číselně, metodou úměrných veličin. Zvolíme si libovolnou nenulovou hodnotu klíčové neznámé, např. $U_x = 1V$. Výše uvedeným postupem pak dospějeme k napětí 2V na R3 a 3V na R2. Z toho vyplyne velikost vstupního napětí 4V. Po konfrontaci se zadaným vstupním napětím 1V v druhém kroku čtyřikrát zmenšíme výchozí napětí U_x a všechny mezivýsledky.

6. Zkušenosti

Heuristické přístupy k analýze jednoduchých obvodů s operačními zesilovači byly využity zatím ve dvou semestrech v předmětu Analogové elektronické obvody pro bakalářské studium na Ústavu mikroelektroniky FEKT VUT v Brně. Tento předmět navazuje na dvousemestrální Elektrotechniku. Analyzované obvody byly vybrány tak, aby je všechny bylo možné řešit „přímou metodou“. Výuka v tomto předmětu je organizována do přednášek, na které navazují po řadě numerická, počítačová a laboratorní cvičení. Na počítačové učebně studenti simulovali v MicroCapu připravená zapojení, která navrhovali v numerických a nakonec ověřovali v laboratorních cvičeních. Sada různých lineárních obvodů s OZ je k dispozici na [4] přímo ve formě vícenásobného vstupního souboru pro MicroCap, takže studenti si mohou např. pomocí dynamické DC analýzy přímo ověřovat správnost svých výpočtů.

Výuka v obdobném stylu probíhala opakovaně ve dvou semestrech na UO v Brně v předmětu Elektronické obvody, který navazuje na předmět Základy elektrotechniky. Zde bylo dosaženo lepších znalostí studentů než na VUT, což si vysvětlujeme podstatně lepšími možnostmi ve využívání individuálního přístupu k studentům než v podmínkách masového vzdělávání na FEKT VUT.

Popsané postupy přímého řešení obvodů v kombinaci s metodou potenciálů a dalšími postupy z [1] patří k těm nejúčinnějším, které autor v průběhu své pedagogické praxe použil při výuce studentů v prvních ročnících studia.

Literatura

- [1] BIOLEK, D. Výuka analýzy základních elektrických obvodů v bakalářských studijních programech. Seminář teorie obvodů, STO9, UO Brno, 2005.
- [2] BIOLEK, D. Řešíme elektronické obvody aneb kniha o jejich analýze. BEN, technická literatura, 2004.
- [3] ČAJKA, J., KVASIL, J. Teorie lineárních obvodů. SNTL Praha, 1979.
- [4] <http://user.unob.cz/biolek/vyukaVUT/predmety/AEY/PRIKLADY1OZ.ZIP>