

Elektrotechnika 1 - laboratorní cvičení

Garant předmětu:

Doc. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

Autoři textu:

Doc. Ing. Jiří Sedláček, CSc.

Ing. Miloslav Steinbauer

Ing. Martin Zlomek

Obsah

ÚVOD	8
ZAŘAZENÍ PŘEDMĚTU VE STUDIJNÍM PROGRAMU	8
ÚVOD DO PŘEDMĚTU	8
OBECNÉ POKYNY PRO LABORATORNÍ CVIČENÍ.....	8
DOMÁCÍ PŘÍPRAVA NA CVIČENÍ	8
PRÁCE V LABORATOŘI	8
ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	9
<i>Skutečné schéma zapojení.....</i>	<i>9</i>
<i>Seznam použitých přístrojů.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabulky naměřených a vypočtených hodnot</i>	<i>10</i>
<i>Grafické zpracování.....</i>	<i>10</i>
<i>Závěr</i>	<i>11</i>
OVLÁDÁNÍ PŘÍSTROJE UNIMA KS	12
<i>Ovládací program Unima.....</i>	<i>12</i>
<i>Měření AV charakteristik (CharDiode).....</i>	<i>12</i>
<i>Tisk grafů.....</i>	<i>12</i>
OVLÁDÁNÍ GENERÁTORU AGILENT (HP) 33120A.....	13
PROGRAM LINROV	14
POŽADAVKY	14
1 STANOVENÍ PARAMETRŮ REÁLNÉHO ZDROJE.....	15
1.1 CÍL ÚLOHY.....	15
1.2 ÚKOL.....	15
1.3 TEORETICKÝ ÚVOD.....	15
1.3.1 <i>Vlastnosti zdroje napětí</i>	<i>15</i>
1.3.2 <i>Vlastnosti zdroje proudu.....</i>	<i>16</i>
1.3.3 <i>Ekvivalentní zdroje</i>	<i>17</i>
1.4 PRACOVNÍ POSTUP.....	17
1.5 ZPRACOVÁNÍ	18
1.6 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A PŘÍPRAVKY	19
1.7 ZÁVĚR	19
1.8 KONTROLNÍ PŘÍKLADY A OTÁZKY	19
1.8.1 <i>Kontrolní příklad 1.1</i>	<i>19</i>
1.8.2 <i>Kontrolní příklad 1.2</i>	<i>19</i>
1.8.3 <i>Kontrolní otázka 1</i>	<i>19</i>
1.9 SHRNUTÍ.....	19
2 KIRCHHOFFOVY ZÁKONY A METODA ÚMĚRNÝCH VELIČIN.....	20
2.1 CÍL ÚLOHY.....	20
2.2 ÚKOL.....	20
2.3 TEORETICKÝ ÚVOD.....	20
2.3.1 <i>Kirchhoffovy zákony</i>	<i>20</i>
2.3.2 <i>Metoda úměrných veličin.....</i>	<i>21</i>
2.4 PRACOVNÍ POSTUP	21

2.5	ZPRACOVÁNÍ	22
2.6	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A PŘÍPRAVKY	22
2.7	ZÁVĚR	22
2.8	KONTROLNÍ PŘÍKLADY A OTÁZKY	22
2.8.1	<i>Kontrolní příklad 2.1</i>	22
2.8.2	<i>Kontrolní otázka 2</i>	23
2.9	SHRNUTÍ	23
3	METODA NÁHRADNÍHO ZDROJE	24
3.1	CÍL ÚLOHY	24
3.2	ÚKOL	24
3.3	TEORETICKÝ ÚVOD	24
3.4	PRACOVNÍ POSTUP	25
3.5	ZPRACOVÁNÍ	26
3.6	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A PŘÍPRAVKY	27
3.7	ZÁVĚR	27
3.8	KONTROLNÍ PŘÍKLADY A OTÁZKY	27
3.8.1	<i>Kontrolní příklad 3.1</i>	27
3.8.2	<i>Kontrolní příklad 3.2</i>	27
3.8.3	<i>Kontrolní otázka 3</i>	27
3.9	SHRNUTÍ	27
4	METODA UZLOVÝCH NAPĚTÍ	28
4.1	CÍL ÚLOHY	28
4.2	ÚKOL	28
4.3	TEORETICKÝ ÚVOD	28
4.3.1	<i>Obecný postup při analýze obvodu metodou uzlových napětí</i>	28
4.3.2	<i>Sestavení maticové rovnice</i>	29
	<i>Příklad 29</i>	
4.4	PRACOVNÍ POSTUP	30
4.5	ZPRACOVÁNÍ	30
4.6	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A PŘÍPRAVKY	31
4.7	ZÁVĚR	31
4.8	KONTROLNÍ PŘÍKLADY A OTÁZKY	31
4.8.1	<i>Kontrolní příklad 4.1</i>	31
4.8.2	<i>Kontrolní příklad 4.2</i>	31
4.8.3	<i>Kontrolní otázka 4</i>	31
4.9	SHRNUTÍ	31
5	METODA SMYČKOVÝCH PROUDŮ	32
5.1	CÍL ÚLOHY	32
5.2	ÚKOL	32
5.3	TEORETICKÝ ÚVOD	32
5.3.1	<i>Obecný postup při analýze obvodu metodou smyčkových proudů</i>	32
5.3.2	<i>Sestavení maticové rovnice</i>	33
	<i>Příklad 33</i>	
5.4	PRACOVNÍ POSTUP	34
5.5	ZPRACOVÁNÍ	34
5.6	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A PŘÍPRAVKY	35
5.7	ZÁVĚR	35
5.8	KONTROLNÍ PŘÍKLADY A OTÁZKY	35

5.8.1	<i>Kontrolní příklad 5.1</i>	35
5.8.2	<i>Kontrolní příklad 5.2</i>	35
5.8.3	<i>Kontrolní otázka 5</i>	35
5.9	SHRNUTÍ	36
6	PRINCIP SUPERPOZICE	37
6.1	CÍL ÚLOHY	37
6.2	ÚKOL	37
6.3	TEORETICKÝ ÚVOD	37
6.4	PRACOVNÍ POSTUP	38
6.5	ZPRACOVÁNÍ	38
6.5.1	<i>Simulace</i>	38
6.6	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A PŘÍPRAVKY	40
6.7	ZÁVĚR	40
6.8	KONTROLNÍ PŘÍKLADY A OTÁZKY	40
6.8.1	<i>Kontrolní příklad 6.1</i>	40
6.8.2	<i>Kontrolní příklad 6.2</i>	40
6.8.3	<i>Kontrolní otázka 6</i>	40
6.9	SHRNUTÍ	40
7	VLASTNOSTI LINEÁRNÍCH A NELINEÁRNÍCH OBVODOVÝCH PRVKŮ	41
7.1	CÍL ÚLOHY	41
7.2	ÚKOL	41
7.3	TEORETICKÝ ÚVOD	41
7.4	PRACOVNÍ POSTUP	43
7.5	ZPRACOVÁNÍ	44
7.6	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A PŘÍPRAVKY	44
7.7	ZÁVĚR	44
7.8	KONTROLNÍ PŘÍKLADY A OTÁZKY	44
7.8.1	<i>Kontrolní příklad 7.1</i>	44
7.8.2	<i>Kontrolní otázka 7</i>	44
7.9	SHRNUTÍ	44
8	PŘENOS VÝKONU	45
8.1	CÍL ÚLOHY	45
8.2	ÚKOL	45
8.3	TEORETICKÝ ÚVOD	45
8.3.1	<i>Výkon v elektrickém obvodu</i>	45
8.4	PRACOVNÍ POSTUP	46
8.5	ZPRACOVÁNÍ	47
8.6	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A PŘÍPRAVKY	47
8.7	ZÁVĚR	47
8.8	KONTROLNÍ PŘÍKLADY A OTÁZKY	47
8.8.1	<i>Kontrolní příklad 8.1</i>	47
8.9	SHRNUTÍ	47
9	MAGNETICKÉ POLE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE	48
9.1	CÍL ÚLOHY	48
9.2	ÚKOL	48
9.3	TEORETICKÝ ÚVOD	48
9.4	PRACOVNÍ POSTUP	51

9.5	ZPRACOVÁNÍ	52
9.6	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A PŘÍPRAVKY	53
9.7	ZÁVĚR	53
9.8	KONTROLNÍ PŘÍKLADY A OTÁZKY	53
9.8.1	<i>Kontrolní příklad 9.1</i>	53
9.8.2	<i>Kontrolní otázka 9</i>	53
9.9	SHRNUTÍ	53
10	MĚŘENÍ NAPĚTÍ NEHARMONICKÝCH PRŮBĚHŮ	54
10.1	CÍL ÚLOHY	54
10.2	ÚKOL	54
10.3	TEORETICKÝ ÚVOD	54
10.4	POSTUP MĚŘENÍ	57
10.5	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	57
10.6	ZÁVĚR	58
10.7	SHRNUTÍ	58
11	DODATKY	59
11.1	VÝSLEDKY TESTŮ	59
ÚLOHA 1		59
	<i>Kontrolní příklad 1.1:</i>	59
	<i>Kontrolní příklad 1.2:</i>	59
	<i>Kontrolní otázka 1:</i>	59
ÚLOHA 2		59
	<i>Kontrolní příklad 2.1:</i>	59
	<i>Kontrolní otázka 2:</i>	59
ÚLOHA 3		60
	<i>Kontrolní příklad 3.1:</i>	60
	<i>Kontrolní příklad 3.2:</i>	60
	<i>Kontrolní otázka 3:</i>	60
ÚLOHA 4		60
	<i>Kontrolní příklad 4.1:</i>	60
	<i>Kontrolní příklad 4.2:</i>	60
	<i>Kontrolní otázka 4:</i>	61
ÚLOHA 5		61
	<i>Kontrolní příklad 5.1:</i>	61
	<i>Kontrolní příklad 5.2:</i>	61
	<i>Kontrolní otázka 5:</i>	62
ÚLOHA 6		62
	<i>Kontrolní příklad 6.1:</i>	62
	<i>Kontrolní příklad 6.2:</i>	62
	<i>Kontrolní otázka 6:</i>	63
ÚLOHA 7		63
	<i>Kontrolní příklad 7.1:</i>	63
	<i>Kontrolní otázka 7:</i>	63
ÚLOHA 8		63
	<i>Kontrolní příklad 8.1:</i>	63
ÚLOHA 9		64
	<i>Kontrolní příklad 9.1:</i>	64
	<i>Kontrolní otázka 9:</i>	64

Seznam obrázků

OBR. A1.1: UMÍSTĚNÍ DŮLEŽITÝCH ÚDAJŮ NA STUPNICI ANALOGOVÉHO PŘÍSTROJE	10
OBR. A1.2 VZHLED ČELNÍHO PANELU PŘÍSTROJE UNIMA KS3	12
OBR. A1.3 VZHLED ČELNÍHO PANELU GENERÁTORU 33120A	13
OBR. 1.1 PARAMETRY ZDROJE NAPĚTÍ A JEHO ZATĚŽOVACÍ (VA) CHARAKTERISTIKY.....	15
OBR. 1.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA ZDROJE PROUDU A JEHO ZATĚŽOVACÍ (VA) CHARAKTERISTIKY	16
OBR. 1.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA REÁLNÉHO ZDROJE NAPĚTÍ A PROUDU S PARAMETRY, DUALITA ZDROJŮ	17
OBR. 1.4 SCHÉMATA ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY ZDROJE	17
OBR. 2.1 OBVOD PRO OVĚŘENÍ K. Z. A METODY ÚMĚRNÝCH VELIČIN	20
OBR. 2.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ ÚLOHY	21
OBR. 3.1 K METODĚ NÁHRADNÍHO ZDROJE: A) PŮVODNÍ OBVOD SE ZÁTĚŽÍ, B) NÁHRADA OBVODU NAPĚŤOVÝM ZDROJEM	24
OBR. 3.2 OBVOD A NÁHRADA JEHO ČÁSTI EKVIVALENTNÍM ZDROJEM NAPĚTÍ.....	25
OBR. 3.3 POSTUP PŘI STANOVENÍ PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO OBVODU: A) VNITŘNÍ NAPĚTÍ B) VNITŘNÍ ODPOR	25
OBR. 4.1 K PRINCIPU METODY UZLOVÝCH NAPĚTÍ	28
OBR. 4.2 PŘÍKLAD K SESTAVENÍ UZLOVÝCH ROVNIC V MATICOVÉM TVARU	29
OBR. 4.3 SCHÉMA ZAPOJENÍ PRACOVNÍSTĚ K OVĚŘENÍ METODY UZLOVÝCH NAPĚTÍ	30
OBR. 5.1 K PRINCIPU METODY SMYČKOVÝCH PROUDŮ	32
OBR. 5.2 PŘÍKLAD K SESTAVENÍ SMYČKOVÝCH ROVNIC V MATICOVÉM TVARU.....	33
OBR. 5.3 ZAPOJENÍ ÚLOHY K OVĚŘENÍ METODY SMYČKOVÝCH PROUDŮ.....	34
OBR. 6.1 K OVĚŘENÍ PLATNOSTI PRINCIPU SUPERPOZICE V LINEÁRNÍCH OBVODECH.....	37
OBR. 6.2 POSTUP PŘI POUŽITÍ PRINCIPU SUPERPOZICE	37
OBR. 6.3 SCHÉMA ZAPOJENÍ ÚLOHY PRO OVĚŘENÍ PRINCIPU SUPERPOZICE.....	38
OBR. 6.4 SCHÉMATA LINEÁRNÍHO A NELINEÁRNÍHO OBVODU SIMULOVANÉHO V MICROCAPU	39
OBR. 7.1 AMPÉRVOLTOVÁ CHARAKTERISTIKA NELINEÁRNÍHO PRVKU A JEJÍ MĚŘENÍ.....	42
OBR. 7.2 GRAFICKÁ KONSTRUKCE AV-CHARAKTERISTIKY SÉRIOVĚ ZAPOJENÝCH PRVKŮ	42
OBR. 7.3 GRAFICKÁ KONSTRUKCE AV-CHARAKTERISTIKY PARALELNĚ ZAPOJENÝCH PRVKŮ..	42
OBR. 7.4 LINEARIZOVANÝ MODEL NELINEÁRNÍHO PRVKU PLATNÝ PRO OKOLÍ PRACOVNÍHO BODU P	43
OBR. 7.5 K MĚŘENÍ AV-CHARAKTERISTIKY PRVKŮ	43
OBR. 8.1 K PŘENOSU VÝKONU: A) SCHÉMA OBVODU, B) VÝKON NA ZÁTĚŽI A ÚČINNOST PŘENOSU JAKO FUNKCE HODNOTY RZ	45
OBR. 8.2 MĚŘENÍ PŘENÁŠENÉHO VÝKONU NEPŘÍMOU METODOU	46
OBR. 9.1 MAGNETICKÝ OBVOD A) A JEMU EKVIVALENTNÍ MODEL B)	49
OBR. 9.2 PŘÍKLAD KE GRAFICKÉMU ŘEŠENÍ NELINEÁRNÍCH MAGNETICKÝCH OBVODŮ, ZDE PRO FERIT FONOX N05.....	50
OBR. 9.3 ZAPOJENÍ ÚLOHY PRO MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE MAGNETICKÉHO OBVODU	51
OBR. 9.4 FEROMAGNETICKÉ JÁDRO PŘÍPRAVKU: A) GEOMETRIE A ROZMĚRY V MM, B) UMÍSTĚNÍ MĚŘICÍ SONDY	52
OBR. 10.2 SOUMĚRNÝ TROJÚHELNÍKOVÝ A OBDÉLNÍKOVÝ PRŮBĚH.....	55
OBR. 10.3 ZAPOJENÍ PRACOVNÍSTĚ PRO MĚŘENÍ NAPĚTÍ RŮZNÝCH PRŮBĚHŮ	57

Seznam tabulek

TAB. 1.1	REÁLNÝ ZDROJ S R_{11} - ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA	18
TAB. 1.2	REÁLNÝ ZDROJ S R_{12} - ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA	18
TAB. 1.3	REÁLNÝ ZDROJ S R_{13} - ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA	18
TAB. 1.4	PARAMETRY MODELŮ REÁLNÝCH ZDROJŮ	18
TAB. 2.1	METODA ÚMĚRNÝCH VELIČIN A K.Z. - NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY	22
TAB. 3.1	METODA NÁHRADNÍHO ZDROJE – NAPĚTÍ, PROUDY A CHYBY MĚŘENÍ	26
TAB. 3.2	METODA NÁHRADNÍHO ZDROJE – PARAMETRY NÁHRADNÍHO OBVODU	26
TAB. 4.1	MUN - MĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY	30
TAB. 5.1	MSP - MĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY	35
TAB. 6.1	PRINCIP SUPERPOZICE V LINEÁRNÍM OBVODU	39
TAB. 6.2	PRINCIP SUPERPOZICE V NELINEÁRNÍM OBVODU	39
TAB. 7.1	STATICKÝ A DYNAMICKÝ ODPOR MĚŘENÝCH PRVKŮ	44
TAB. 8.1	PŘENOS VÝKONU A CHYBY MĚŘENÍ PRO ZAPOJENÍ VA	47
TAB. 9.1	ZÁVISLOST MAGNETICKÉ INDUKCE NA BUDICÍM PROUDU	52
TAB. 9.2	ZÁVISLOST MAGNETICKÉ INDUKCE NA POLOZE SONDY	53
TAB. 10.1	ČINITELÉ TVARU A VÝKYVU ZÁKLADNÍCH ČASOVÝCH PRŮBĚHŮ	56
TAB. 10.2	MĚŘENÍ NAPĚTÍ RŮZNÝCH PRŮBĚHŮ	58
TAB. 10.3	MĚŘENÍ HARMONICKÉHO NAPĚTÍ S NENULOVOU STEJNOSMĚRNOU SLOŽKOU	58

ÚVOD

Skriptum je určeno studentům Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií pro laboratorní cvičení z předmětu **Elektrotechnika 1**. Náplň jednotlivých úloh laboratorních cvičení je volena tak, aby si studenti prakticky ověřili poznatky získané na přednáškách, naučili se samostatně experimentální práci a získali tak průpravu pro práci jak ve vyšších ročnících studia, tak pro budoucí praxi.

ZAŘAZENÍ PŘEDMĚTU VE STUDIJNÍM PROGRAMU

Předmět Elektrotechnika 1 (BEL1) je zařazen do prvního semestru bakalářského studijního programu všech oborů studia na FEKT VUT v Brně. Předmět sestává z přednášek, laboratorních cvičení a počítačových cvičení.

Úvod do předmětu

Koncepce jednotlivých úloh by měla vést studenty k osvojení formální stránky práce v laboratoři, získání správných návyků, stanovení cíle experimentu, vyhotovení záznamu o jeho průběhu a zhodnocení vlastních výsledků s ohledem na zadání.

OBECNÉ POKYNY PRO LABORATORNÍ CVIČENÍ

Laboratorní cvičení sestává z těchto částí:

- domácí příprava,
- práce v laboratoři,
- zpracování výsledků měření.

Pro laboratorní cvičení je nutné vést záznamy (pro tento účel slouží druhá část pracovního sešitu Bezpečnost v elektrotechnice, Elektrotechnika 1), do kterého se zapisují přípravy i zpracování naměřených hodnot. Příprava i zpracování musí být ručně psaná!

Domácí příprava na cvičení

Příprava sestává ze zpracování teoretických poznatků, týkajících se daného cvičení a je nutné její písemné vypracování do pracovního sešitu. Základem pro domácí přípravu je „Teoretický úvod“, který je součástí každé úlohy v tomto skriptu. Do přípravy uveďte základy teorie včetně matematických vztahů. Dále zakreslete skutečné schéma zapojení.

Příprava má být stručná a výstižná, neopisujte celý teoretický úvod. Rovněž není účelné opisovat „Postup měření“; k tomu účelu slouží skriptum. Účelem domácí přípravy je pochopení podstaty dané úlohy, které je nutné ke správnému provedení vlastního měření. Teoretickou znalost příslušné problematiky je třeba prokázat během cvičení. Bez znalosti teorie a bez písemné přípravy nebude posluchači umožněno cvičení absolvovat.

Práce v laboratoři

Pracoviště v laboratoři jsou pro přehlednost označena čísla a názvy úloh. Na pracovišti jsou připraveny všechny potřebné přístroje a příslušenství. Při zapojování postupujte podle schémat skutečného zapojení. Během zapojování postupujte systematicky, abyste se vyvarovali chyb a zapojení bylo přehledné. Dokončené zapojení si nechte zkontrolovat učitelem, který připojí úlohu ke zdrojům. Během práce v laboratoři dodržujte zásady bezpečnosti práce. Jakékoliv změny v zapojení provádějte pouze při odpojených zdrojích.

Důležitou součástí práce v laboratoři je zřetelné a čitelné zaznamenání naměřených hodnot tak, aby bylo možné spolehlivě pokračovat ve zpracování úlohy. Ze stejného důvodu je třeba pořídit si seznam použitých přístrojů, který obsahuje kromě typů přístrojů i jejich výrobní čísla a u měřicích přístrojů také údaje o jejich přesnosti.

Po skončení vlastního měření zkontrolujte vyhodnocením alespoň několika hodnot správnost měření. Teprve po této kontrole můžete úlohu případně rozpojit a pracoviště uklidit. Před rozpojením zásadně nejprve nastavte výstupní veličiny zdrojů na nulové hodnoty a odpojte od nich vodiče!

Výsledky si dejte ověřit učitelem. Ve zbývajícím čase můžete začít zpracovávat naměřené hodnoty.

Zpracování výsledků

Písemné zpracování má mít formu technické zprávy a musí obsahovat:

- název a číslo úlohy, datum měření,
- zadání (viz „Úkol“ u každé úlohy),
- teoretický úvod (viz výše, „Domácí příprava na cvičení“),
- skutečné schéma zapojení,
- tabulky naměřených a vypočtených hodnot, příklad výpočtu,
- grafické zpracování,
- seznam použitých přístrojů,
- závěr.

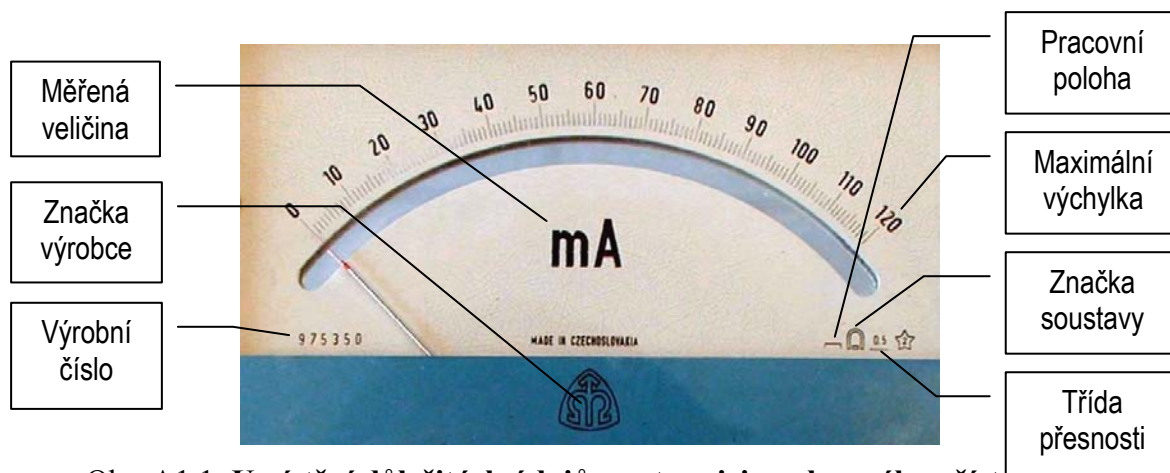
Skutečné schéma zapojení

Do schématu zapojení si dopište typy skutečně použitých přístrojů a ostatních obvodových prvků. Přitom jednotlivé přístroje označte shodně jako v seznamu použitých přístrojů.

Seznam použitých přístrojů

slouží k tomu, aby bylo možné měření reprodukovat za stejných podmínek. Musí tedy obsahovat soupis všech použitých přístrojů a zařízení, i pomocných. U většiny zařízení se uvádí pouze typ. U měřicích přístrojů pak následující údaje:

- druh a typ přístroje,
- výrobce a výrobní číslo,
- princip - značku soustavy (u analogových měřicích přístrojů),
- údaje o přesnosti přístroje (třída přesnosti u analogových, chyba u digitálních).
- rozsahy,



Obr. A1.1: Umístění důležitých údajů na stupnici analogového přístroje

U analogových přístrojů se měřená hodnota X_M stanoví pomocí výchylky ručky α a konstanty přístroje k .

$$X_M = \alpha \cdot k, \quad k = \frac{X_R}{\alpha_{\max}}, \quad (\text{A.1.1})$$

kde je α ručkou indikovaná výchylka, (dílků)

k konstanta přístroje

.....(veličina/dílek)

X_R hodnota rozsahu měřicího přístroje, (A, V, ...)

$\alpha_{\max}$ maximální výchylka (počet dílků stupnice) přístroje. (dílků)

Konstanta přístroje se zapisuje v nezkráceném tvaru, například 2,4/120 pro V-metr s nastaveným rozsahem 2,4 V a maximální výchylkou 120 dílků. Z takového zápisu lze později zjistit použitý rozsah přístroje.

Digitální přístroje indikují přímo měřenou hodnotu, která se zapisuje nezaokrouhleně, tedy s plným počtem platných míst, např. 152,0 mA. Přitom je třeba dbát na násobky indikované veličiny, tedy zda přístroj ukazuje hodnotu např. ve V nebo mV.

Tabulky naměřených a vypočtených hodnot

Tabulky je třeba uspořádat čitelně a přehledně, aby z nich bylo možné vyčíst všechny požadované hodnoty. Veličiny a jednotky uvádějte podle ustálených zvyklostí v SI soustavě (ČSN 01 1300). Za tabulku vypočtených hodnot vždy uveďte obecný vztah a příklad výpočtu (výpočet hodnot jednoho řádku tabulky). Vzory tabulek jsou uvedeny v tomto skriptu v části "Zpracování". Pro přehlednost jsou buňky tabulek, které se neměří, ale počítají, podbarveny šedě. V tabulkách jsou rovněž odkazy na čísla vztahů, které se mají při výpočtech použít.

V některých tabulkách se provádí porovnání naměřených $X_{\text{měř.}}$ a teoretických $X_{\text{teor.}}$ hodnot na základě jejich relativní odchylky δ_X

$$\delta_X = 100 \cdot \frac{X_{\text{měř.}} - X_{\text{teor.}}}{X_{\text{teor.}}}. \quad (\%) \quad (\text{A.1.2})$$

Grafické zpracování

je důležitou částí zpracování úlohy, neboť dává fyzikální náhled na daný problém. Grafy lze vypracovat buď na milimetrový papír, nebo pomocí počítače (Excel, Quattro atd.) a následně vlepít do sešitu. U některých úloh používajících počítače se grafy tisknou již během

měření. V každém případě je třeba vhodně zvolit typ grafu, měřítko os a způsob proložení zobrazených bodů.

Osy grafu musí být řádně označeny, aby bylo zřejmé, jakou veličinu vyjadřují. Součástí grafu je i jeho nadpis. Pokud je v jednom grafu zakresleno více křivek, musí být zřetelně označeny a odlišeny.

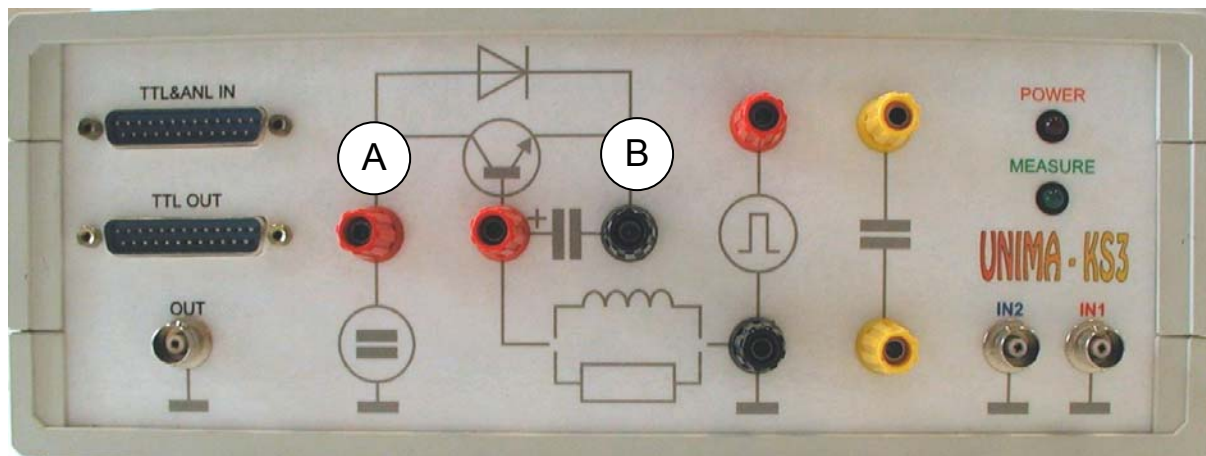
Závěr

má obsahovat stručný, ale výstižný rozbor naměřených a vypočtených hodnot. Musí korespondovat se zadáním úlohy. Nemá být kvalifikační podmínkou měření, ale zhodnocením naměřených parametrů a jejich teoretickým zdůvodněním. Pokud je výsledkem měření jen málo hodnot, je vhodné je do závěru zopakovat. V případě, že jde o rozsáhlé výsledky (tabulky, grafy), stačí na ně uvést odkaz.

Součástí závěru by měla být i úvaha o přesnosti provedeného měření s uvedením možných zdrojů chyb, tedy zhodnocení věrohodnosti získaných výsledků.

OVLÁDÁNÍ PŘÍSTROJE UNIMA KS

Unima je univerzální měřicí přístroj, který je vzhledem ke svým parametrům vhodný pro použití ve školních laboratořích. V laboratorních cvičeních se s Unimou setkáte u několika úloh. Tato kapitola slouží jako popis základních vlastností přístrojů Unima typu KS3 (s malými odchylkami i pro typ KS2) pro měření AV charakteristik.



Obr. A1.2 Vzhled čelního panelu přístroje UNIMA KS3

Ovládací program Unima

Před spuštěním programu je třeba zapnout přístroj, neboť program při svém startu provádí inicializaci hardware. Není-li přístroj inicializován, nesmí se k němu připojovat žádné součástky, mohlo by dojít k jejich poškození.

Ovládání programu je standardní, pomocí **F1** nebo tlačítka Help se vyvolá nápověda, která obsahuje náčrt připojení přístroje podle zvolené funkce.

Měření AV charakteristik (CharDiode)

Měřený dvojpól se připojuje ke zdírkám **A**, **B** označeným značkou diody.

Rozsahy obou os grafu lze volit nezávisle pro kladnou i zápornou část, pomocí tlačítek + a -. Měřicí cyklus se spouští tlačítkem **Start** (kresba grafu) nebo **More** (kresba další křivky do již vykresleného grafu). Souřadnice bodů zobrazených křivek lze zjišťovat pomocí kurzoru. Při stisku levého tlačítka myši kurzor při pohybu sleduje nejbližší křivku.

Tisk grafů

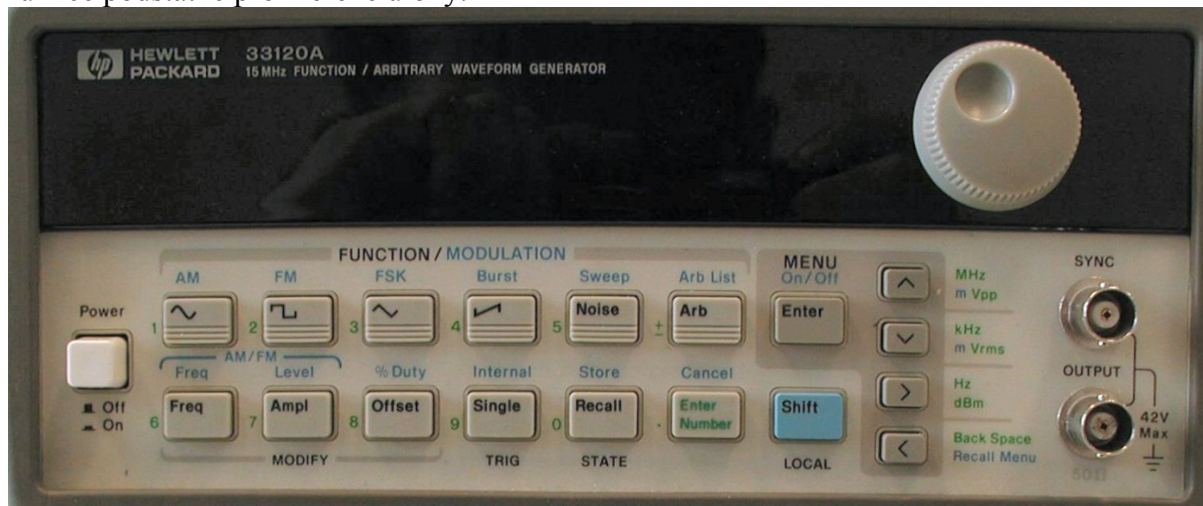
Pomocí klávesy **F5** lze vkládat do grafů textové popisky, před tiskem tak mohou být jednotlivé křivky popsány.

Dialogové okno tisku se vyvolá klávesou **F10** nebo tlačítkem Print. Pak lze volit velikost (**Large/Small copy**) a typ vytištěného obrázku (**Only Char/Window**). Není-li zadáno jinak, volte **Small copy** a **Only Char**. Nezapomeňte do vytištěných grafů popsat osy a zapsat jejich měřítka!

Alternativně lze pomocí klávesy Print Screen uložit obrázek do schránky a vytisknout jej nepřímo např. pomocí programu Malování či PaintBrush.

OVLÁDÁNÍ GENERÁTORU AGILENT (HP) 33120A

Generátor 33120A je programovatelný laboratorní generátor periodického signálu libovolného průběhu s kmitočtovým rozsahem do 15 MHz. Popis přístroje omezíme na funkce podstatné pro měřené úlohy.



Obr. A1.3 Vzhled čelního panelu generátoru 33120A

Volba tvaru výstupního signálu se provádí stiskem tlačítek v horní řadě - **Function**. Důležitá jsou první tři – harmonický (~), obdélníkový a trojúhelníkový signál. U obdélníkového signálu je možné změnit činitel plnění pomocí volby **Shift** a **% Duty**.

Frekvence generovaného signálu se nastavuje po stisku tlačítka **Freq**, amplituda pak po stisku tlačítka **Ampl**. Stejnoseměrnou složku signálu lze nastavit pomocí tlačítka **Offset**. V zásadě je možné tyto hodnoty měnit dvěma způsoby:

- otočným ovladačem můžete měnit hodnotu oběma směry, změna se provádí na tom řádkovém místě, které problikává. Měněné řádkové místo lze změnit tlačítky **<**, **>**;
- pro rychlé nastavení frekvence nebo amplitudy lze přímo zadat požadovanou hodnotu takto: stiskněte **Enter Number** a poté zadejte číselnou hodnotu (platí zelená čísla u tlačítek); pak stiskněte jedno z tlačítek určující řád zadané hodnoty **^** (MHz, Vpp), **v** (kHz, Vrms) či **>** (Hz, dBm). Pokud stisknete předem ještě **Shift**, je vložena namísto V hodnota mV. Poznámka: Vpp je napětí špička-špička (tedy dvojnásobek amplitudy U_m), Vrms je efektivní hodnota napětí (U).

Nastavovaná veličina je zobrazena na displeji včetně jednotky. Desetinná místa jsou oddělena tečkou, zatímco zobrazené čárky pouze oddělují trojice čísel kvůli lepší čitelnosti.

Výstup generátoru je označen **Output**, pozor na záměnu se synchronizačním výstupem **Sync**. Výstupní impedance generátoru je 50 Ω .

PROGRAM LINROV

Program LinRov je jednoduchý program (makro Visual Basic pro Excel) k řešení soustav lineárních rovnic 1. až 4. řádu Gaussovou eliminací.

Požadavky

MS EXCEL 2000 a vyšší

musí být instalovány doplňky *Analytické nástroje* a *Analytické nástroje - VBA* (menu *Nástroje/Doplňky...*)

povolit spuštění makra

Po spuštění programu se objeví obrazovka „kalkulátor“ představující maticový zápis soustavy rovnic:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{Y}$$

kde $\mathbf{K}$ je matice koeficientů, $\mathbf{X}$ je vektor hledaných neznámých a $\mathbf{Y}$ je vektor pravých stran, tj. budících veličin. Kalkulátor lze spustit tlačítkem **Spustit makro**.

Vlastní výpočet soustavy lineárních rovnic zahájíme volbou řádu označením příslušného **řádu** soustavy (1, 2, 3 nebo 4).

Zadávaní prvků matice je možné výběrem příslušného prvku (kliknutím myši nebo sekvenčně klávesou Tab.)

- Výsledky $\mathbf{X}$ se zobrazují zaokrouhlené na 4 platné číslice, podle potřeby ve vědeckém tvaru s exponentem.
- Při zadávání čísel se akceptuje desetinná čárka i tečka, je možné vkládat čísla i ve vědeckém tvaru (např. 1.6625E-5).

Obvykle se bude zadávat diagonálně symetrická matice $\mathbf{K}$. Pak stačí zadat hodnoty prvků horního trojúhelníku matice a tlačítkem **Kopíruj** zkopírovat hodnoty do dolního trojúhelníku.

Výpočet se provede stiskem tlačítka **Výpočet**. Celou rovnici je možno smazat tlačítkem **Vymaž**. Program hlídá singularitu matice soustavy a případně upozorní na nutnost opravy.

1 Stanovení parametrů reálného zdroje

1.1 Cíl úlohy

Experimentálně ověřit základní vlastnosti reálných zdrojů napětí a proudu.

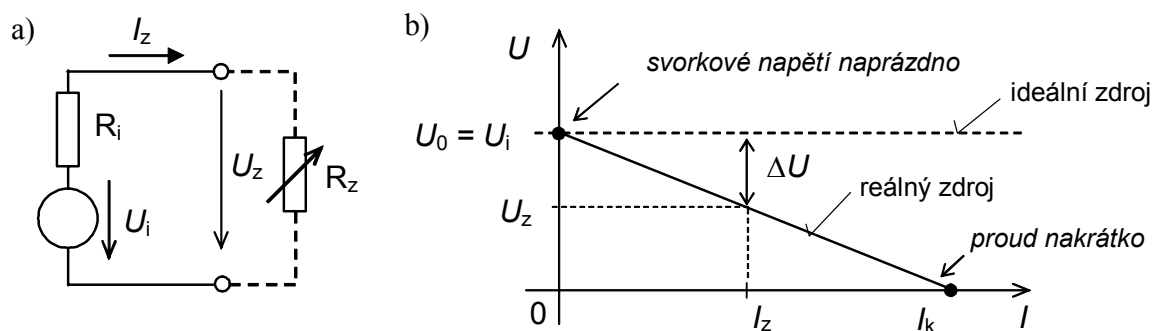
1.2 Úkol

- Změřte voltampérovou (zatěžovací) charakteristiku zadaných zdrojů napětí. Naměřené závislosti vyneste do grafu.
- Na základě měření stanovte svorkové napětí naprázdno a vnitřní odpor zdrojů, nakreslete náhradní schéma zdrojů.
- Vypočítejte parametry ekvivalentních zdrojů proudu, tj. proud nakrátko a vnitřní vodivost, nakreslete náhradní schéma.

1.3 Teoretický úvod

1.3.1 Vlastnosti zdroje napětí

Na Obr. 1.1a) je uvedeno *náhradní schéma* reálného zdroje stejnosměrného napětí. Jeho parametry jsou vnitřní napětí U_i a vnitřní odpor R_i . Dále je zde znázorněno napětí U_z na svorkách zdroje při zatížení zdroje libovolným zatěžovacím proudem I_z , toto napětí se nazývá *svorkové*.



Obr. 1.1 Parametry zdroje napětí a jeho zatěžovací (VA) charakteristiky

Zatěžovací proud I_z je dán velikostí zátěže, kterou zde představuje rezistor o odporu R_z . Při nezatíženém zdroji je $R_z \rightarrow \infty$ a $I_z = 0$, zdroj pracuje *naprázdno*. Naopak je-li $R_z = 0$, hovoříme o stavu *nakrátko* a zatěžovací proud nabývá maximální hodnoty $I_z = I_k$.

Vnitřní napětí U_i je základním parametrem modelu reálného zdroje, toto napětí je rovno svorkovému napětí naprázdno

$$U_i = U_0. \quad (\text{V}) \quad (1.1)$$

Vnitřní elektrický odpor R_i představuje druhý základní parametr modelu zdroje

$$R_i = \frac{U_i}{I_k}. \quad (\Omega) \quad (1.2)$$

Vlastnosti zdroje napětí v elektrickém obvodu jsou dány jeho zatěžovací charakteristikou. *Zatěžovací charakteristika zdroje* je závislost svorkového napětí U_z na zatěžovacím proudu I_z . Její průběh pro uvedený model reálného zdroje je nakreslen na Obr. 1.1b). Tato závislost je lineární (R_i je konstantní), protíná osu napětí v bodě napětí naprázdno $U_i = U_0$, osu proudu v bodě proudu nakrátko $I_k = I_{\max}$.

Svorkové napětí U_z je

$$U_z = U_i - \Delta U. \quad (\text{V}) \quad (1.3)$$

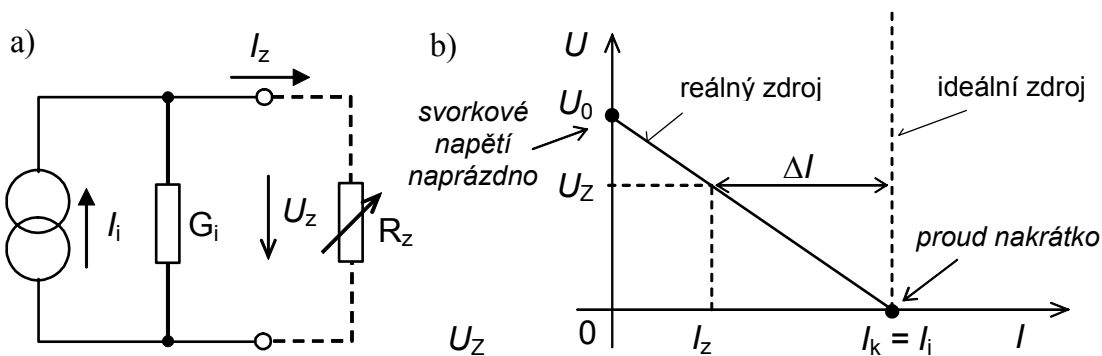
kde ΔU představuje úbytek napětí, o který klesne U_i při zatížení nenulovým proudem I_z

$$\Delta U = R_i \cdot I_z. \quad (\text{V}) \quad (1.4)$$

Je zřejmé, že čím bude velikost R_i menší, tím méně bude U_z záviset na zatěžovacím proudu I_z . Jestliže je vnitřní odpor $R_i = 0$, je svorkové napětí na velikosti I_z nezávislé a jde o *ideální zdroj napětí*. Jeho zatěžovací charakteristika je uvedena rovněž na Obr. 1.1b).

1.3.2 Vlastnosti zdroje proudu

Na Obr. 1.2a) je uvedeno *náhradní schéma* reálného zdroje proudu. Jeho parametry jsou vnitřní proud zdroje I_i a vnitřní elektrická vodivost G_i . Dále je zde znázorněno svorkové napětí U_z , zatěžovací proud I_z a zatěžovací rezistor o odporu R_z .



Obr. 1.2 Náhradní schéma zdroje proudu a jeho zatěžovací (VA) charakteristiky

Proud zdroje I_i je roven proudu svorkami nakrátko

$$I_i = I_k. \quad (\text{A}) \quad (1.5)$$

Vnitřní elektrická vodivost G_i (konduktance) modeluje základní parametr zdroje a je dána

$$G_i = \frac{I_k}{U_0}. \quad (\text{S}) \quad (1.6)$$

Vlastnosti zdroje proudu v elektrickém obvodu popisuje jeho *zatěžovací charakteristika*. Její průběh pro uvedený model reálného zdroje je nakreslen na Obr. 1.2b). Tato závislost je lineární (G_i je konstantní), protíná osu napětí v bodě napětí naprázdno $U_z = U_0$, osu proudu v bodě proudu nakrátko $I_k = I_i$.

Proud zátěží I_z je

$$I_z = I_i - \Delta I. \quad (\text{A}) \quad (1.7)$$

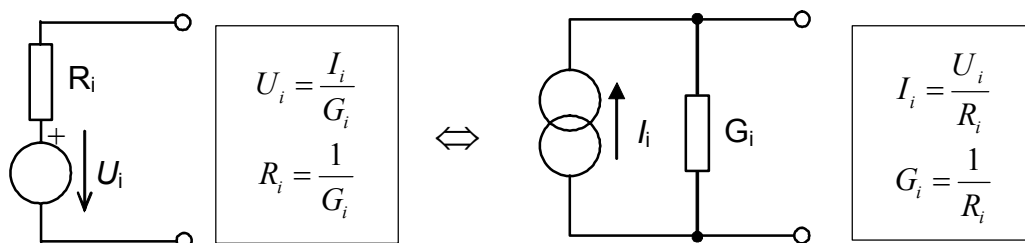
Zde ΔI představuje proud, který teče vnitřní vodivostí G_i při nenulovém napětí U_z

$$\Delta I = G_i \cdot U_z. \quad (\text{A}) \quad (1.8)$$

Je zřejmé, že čím bude velikost vnitřní vodivosti zdroje G_i menší, tím méně bude I_z záviset na napětí U_z . Pro $G_i = 0$ nezávisí proud I_z na velikosti U_z a jde o *ideální zdroj proudu*. Jeho zatěžovací charakteristika je uvedena rovněž na Obr. 1.2b).

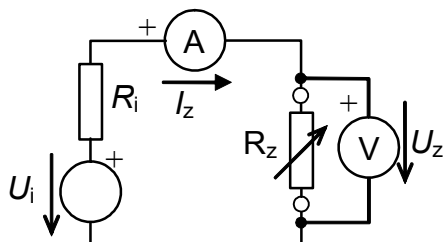
1.3.3 Ekvivalentní zdroje

Z Obr. 1.1b) a Obr. 1.2b) je zřejmé, že zatěžovací charakteristika modelu reálného zdroje napětí odpovídá tvarem charakteristice reálného zdroje proudu. Proto je možné např. při analýze obvodu modely reálných zdrojů napětí a proudu vzájemně zaměňovat, jak je uvedeno na obr. 1.3.



Obr. 1.3 Náhradní schéma reálného zdroje napětí a proudu s parametry, dualita zdrojů

1.4 Pracovní postup



Obr. 1.4 Schémata zapojení pro měření zatěžovací charakteristiky zdroje

- Pro měření použijte panel, který obsahuje dva rezistory s různou hodnotou R_i a rezistor s proměnným odporem R_z . Každé zapojení nechte před připojením zdroje napětí do sítě zkontrolovat! Veškeré změny v zapojení provádějte pouze tehdy, je-li zdroj napětí odpojen. Měřené hodnoty zapisujte do příslušné tabulky.
Sestavte zapojení pro měření naprázdno. Do obvodu podle schématu na Obr. 1.4 zapojte první rezistor R_i , připojte zdroj napětí a voltmetr. Zatěžovací odpor R_z nezapojujte. Změřte napětí naprázdno U_0 a zapište do příslušné tabulky.
Poznámka: Zásady měření s analogovými přístroji najdete v úvodu těchto skript.
- Připojte rezistor R_z a postupně nastavujte jeho odpor tak, aby měřený proud I_z měl hodnotu zadanou v tabulce (tabulku volte podle označení R_{i1} , R_{i2} nebo R_{i3} na zadaném panelu) a změřte odpovídající napětí U_z .
- Zatěžovací rezistor nahraďte zkratovací spojkou a změřte proud nakrátko I_k .
- Do obvodu zapojte druhý rezistor R_i a postup podle bodů a) až c) opakujte. Měří se varianty R_{i1} a R_{i3} nebo R_{i2} a R_{i3} , podle použitého přípravku.

Tab. 1.1 Reálný zdroj s R_{i1} - zatěžovací charakteristika

U_z	α_V							
	k_V							
	V							0
I_z	α_A							
	k_A							
	mA	0	15	30	45	60	75	

Tab. 1.2 Reálný zdroj s R_{i2} - zatěžovací charakteristika

U_z	α_V							
	k_V							
	V							0
I_z	α_A							
	k_A							
	mA	0	10	20	30	40	50	

Tab. 1.3 Reálný zdroj s R_{i3} - zatěžovací charakteristika

U_z	α_V							
	k_V							
	V							0
I_z	α_A							
	k_A							
	mA	0	5	10	15	20	25	

1.5 Zpracování

Tab. 1.4 Parametry modelů reálných zdrojů

Zdroj	Napěťový model		Proudový model	
	U_i	R_i	I_i	G_i
	V	Ω	mA	mS
	(1.1)	(1.2)	(1.5)	(1.6)
R_{i1}				
R_{i2}				
R_{i3}				

Pro oba změřené zdroje stanovte parametry ekvivalentního napětového (U_i , R_i) i proudového (I_i , G_i) modelu zdroje a doplňte tyto hodnoty do Tab. 1.4.

1.6 Použité přístroje a přípravky

- Zdroj napětí typ:
- Analogový voltmetr typ:, v.č.:, TP:
- Analogový miliampérmetr typ:, v.č.:, TP:
- Panel s prvky R_{i1} , R_{i3} , proměnný R_z nebo R_{i2} , R_{i3} , proměnný R_z

1.7 Závěr

Pro oba reálné zdroje vyneste naměřenou VA-charakteristiku do grafu. Nakreslete náhradní schémata s napětovým i proudovým zdrojem podle vzoru na Obr. 1.3.

1.8 Kontrolní příklady a otázky

1.8.1 Kontrolní příklad 1.1

Reálný zdroj napětí má svorkové napětí $U_0 = 25$ V a vnitřní odpor $R_i = 2 \Omega$. Určete parametry ekvivalentního zdroje proudu. [Řešení](#)

1.8.2 Kontrolní příklad 1.2

Reálný zdroj proudu má parametry: $I_i = 0,25$ A, $G_i = 0,001$ S. Určete parametry ekvivalentního zdroje napětí. [Řešení](#)

1.8.3 Kontrolní otázka 1

Jak se liší náhradní schéma reálného zdroje napětí a proudu? Co znamená dualita zdrojů? [Řešení](#)

1.9 Shrnutí

Základními parametry reálného zdroje napětí jsou vnitřní napětí U_i a vnitřní odpor R_i . Náhradní schéma reálného zdroje napětí představuje sériové spojení ideálního zdroje napětí U_i a rezistoru R_i . Zatěžovací charakteristika (závislost svorkového napětí U_z na zatěžovacím proudu I_z) je lineární, přímka protíná osu napětí v bodě napětí naprázdno $U_i = U_0$, osu proudu v bodě proudu nakrátko $I_k = U_i/R_i$.

Náhradní schéma reálného zdroje proudu představuje paralelní spojení ideálního zdroje proudu I_i a vnitřní vodivosti G_i . Zatěžovací charakteristika je lineární, přímka protíná osu proudu v bodě proudu nakrátko $I_k = I_i$, osu napětí v bodě napětí naprázdno $U_z = U_0$.

Zdroj napětí a proudu jsou navzájem ekvivalentní, platí – li: $I_i = \frac{U_i}{R_i}$, $G_i = \frac{1}{R_i}$.

2 Kirchhoffovy zákony a metoda úměrných veličin

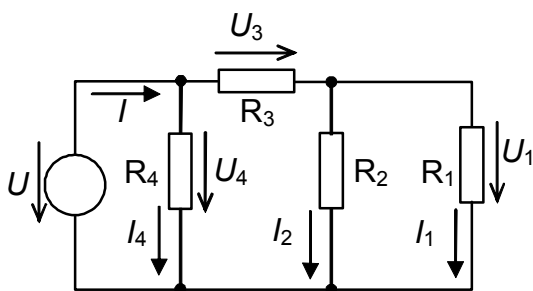
2.1 Cíl úlohy

U zadaného lineárního obvodu ověřit experimentálně platnost Kirchhoffových zákonů a platnost metody úměrných veličin.

2.2 Úkol

- V zadaném lineárním obvodu podle Obr. 2.1 změřte proudy I , I_1 , I_2 , I_4 a napětí U_1 , U_3 při zadaném napětí zdroje U .
- Na základě naměřených hodnot ukažte, že pro měřený obvod platí Kirchhoffovy zákony.
- Pro zadané napětí zdroje U' , změřte proudy I' , I'_1 , I'_2 , I'_4 a napětí U'_1 , U'_3 . Ukažte platnost metody úměrných veličin u lineárního obvodu.

2.3 Teoretický úvod



Obr. 2.1 Obvod pro ověření K. z. a metody úměrných veličin

2.3.1 Kirchhoffovy zákony

Kirchhoffovy zákony (K. z.) patří spolu s Ohmovým zákonem mezi základní zákony elektrotechniky.

První K. z. (proudový) vychází z fyzikálního principu zachování náboje. Podle tohoto zákona platí pro každý uzel elektrického obvodu

$$\sum_k I_k = 0. \quad (\text{A}) \quad (2.1)$$

Součet všech proudů vtékajících a vytékajících z uzlu je roven nule; přitom proudy vtékající značíme záporným znaménkem, proudy vytékající pak znaménkem kladným.

Druhý K. z. (napětový) vychází ze zákona zachování energie. Za předpokladu nepřítomnosti vnějšího časově proměnného magnetického pole platí, že součet napětí na všech obvodových prvcích v libovolné uzavřené smyčce je nulový

$$\sum_k U_k = 0. \quad (\text{V}) \quad (2.2)$$

2.3.2 Metoda úměrných veličin

Metoda úměrných veličin se používá při analýze lineárních obvodů, ve kterých je pouze jediný nezávislý zdroj napětí nebo proudu. V lineárních obvodech platí přímá úměrnost mezi napětími a proudy u každého obvodového prvku a obvodu jako celku; velikosti všech napětí a proudů v obvodu jsou tedy přímo úměrné napětí napěťového zdroje nebo proudu proudového zdroje. To znamená, že zvýšíme-li např. v obvodu podle Obr. 2.1a) napětí zdroje U na dvojnásobek, zvýší se na dvojnásobek všechna napětí a proudy v celém obvodu.

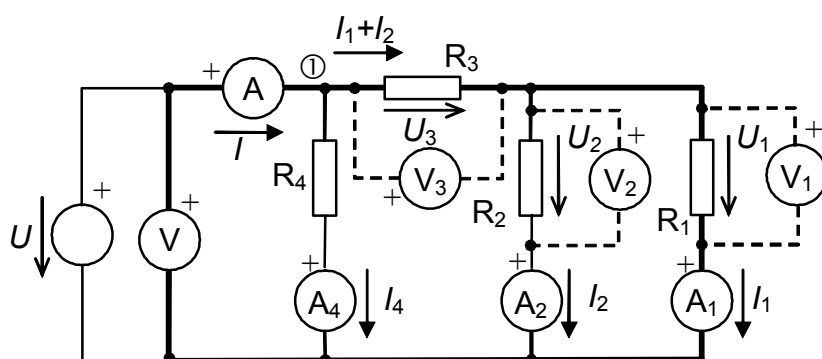
Postup při analýze obvodu metodou úměrných veličin je následující:

- Ve vhodném místě obvodu odhadneme nebo zvolíme velikost napětí (resp. proudu) některé větve.
- Postupně určíme *fiktivní* napětí (resp. proudy) v celém obvodu; postupujeme přitom směrem ke zdroji.
- Vypočítáme potřebnou velikost *fiktivního* napětí (respektive proudu) napájecího zdroje a zjistíme poměr

$$k = \frac{\text{skutečná hodnota parametru zdroje}}{\text{fiktivní hodnota parametru zdroje}} \quad (2.3)$$

- Skutečné velikosti všech obvodových veličin dostaneme vynásobením jejich fiktivních hodnot poměrem k .

2.4 Pracovní postup



Obr. 2.2 Schéma zapojení úlohy

- Sestavte zapojení podle schématu na Obr. 2.2, do obvodu zapojte miliampérmetry pro měření proudů větvemi s rezistory, připojte zdroj napětí a voltmetr. Zapojení nechte zkontrolovat vyučujícím.
- Po zapnutí napájecího zdroje nastavte podle voltmetru napětí zdroje $U = 12 \text{ V}$. Změřte proudy I , I_1 , I_2 , I_4 , poté postupně přepojováním voltmetru (značeno čárkovaně) napětí U_1 , U_2 , U_3 a hodnoty zapište do řádku X Tab. 2.1.
- Napětí zdroje nastavte na hodnotu U' zadanou vyučujícím (v rozsahu $U' = 3$ až 15 V), změřte I' , I'_1 , I'_2 , I'_4 , U'_1 , U'_2 , U'_3 a hodnoty zapište do řádku X' Tab. 2.1.

Tab. 2.1 Metoda úměrných veličin a K.z. - naměřené a vypočtené hodnoty

		U	I	I_1	I_2	I_4	U_1	U_2	U_3
		V	mA	mA	mA	mA	V	V	V
X	-	12							
X'	-								
$k = X/X'$	(2.3)								

2.5 Zpracování

- Dosazením naměřených hodnot příslušných proudů do vztahu (2.1) dokažte platnost 1. K. z. pro uzel označený ① ve schématu na Obr. 2.2. Uvažujte proudy I , I_1 , I_2 a I_4 .
- Dosazením naměřených hodnot příslušných napětí do vztahu (2.2) dokažte platnost 2. K. z. pro uzavřenou smyčku, která je ve schématu na Obr. 2.2 vyznačena tučnou čarou. Uvažujte napětí U , U_1 , U_3 .

Poznámka: protože při měření zanedbáváme úbytek napětí na ampérmetrech, vzniká při výpočtu (2.2) chyba.

- Pro všechny dvojice naměřených hodnot v Tab. 2.1 vypočtete poměr k . Ukažte, že k je pro všechny měřené obvodové veličiny konstantní.

2.6 Použité přístroje a přípravky

- Zdroj stabilizovaného napětí typ:
- Voltmetr typ:, v.č.:
- Miliampérmetr A typ:, v.č.:
- Miliampérmetr A_1 typ:, v.č.:
- Miliampérmetr A_2 typ:, v.č.:
- Miliampérmetr A_4 typ:, v.č.:
- panely s rezistory $R_1 = 100 \Omega$, $R_2 = 220 \Omega$, $R_3 = 150 \Omega$, $R_4 = 330 \Omega$.

2.7 Závěr

Uveďte výsledky ověření platnosti obou Kirchhoffových zákonů; vysvětlete případnou malou odchylku výsledku vztahů (2.1) a (2.2) od nuly.

Vyjádřete se o platnosti metody úměrných veličin na základě zjištěných hodnot poměru k v Tab. 2.1.

2.8 Kontrolní příklady a otázky

2.8.1 Kontrolní příklad 2.1

V Obr. 2.2 jsou zadány hodnoty prvků : $U = 40 \text{ V}$, $R_1 = R_2 = R_4 = 10 \Omega$. $R_3 = 5 \Omega$. (Vnitřní odpory ampérmetrů předpokládáme nulové). Metodou úměrných veličin vypočítejte napětí a proudy v obvodu. [Řešení](#)

2.8.2 Kontrolní otázka 2

V jakých obvodech je možné použít pro analýzu metodu úměrných veličin a kdy je ji vhodné aplikovat? [Řešení](#)

2.9 Shrnutí

Při analýze obvodů využíváme Ohmův zákon a Kirchhoffovy zákony: 1. K.Z. (proudový) - součet proudů vtékajících a vytékajících z uzlu je roven nule, 2. K.Z. (napětový) - součet napětí na prvcích uzavřené obvodové smyčky je roven nule.

V lineárních obvodech platí přímá úměrnost mezi napětími a proudy u každého obvodového prvku a obvodu jako celku; velikosti všech napětí a proudů jsou přímo úměrné napětí napětového zdroje nebo proudu proudového zdroje. V lineárních obvodech je možno proto využít pro analýzu metodu úměrných veličin, její aplikace je vhodná při analýze jednodušších obvodů s jedním zdrojem.

3 Metoda náhradního zdroje

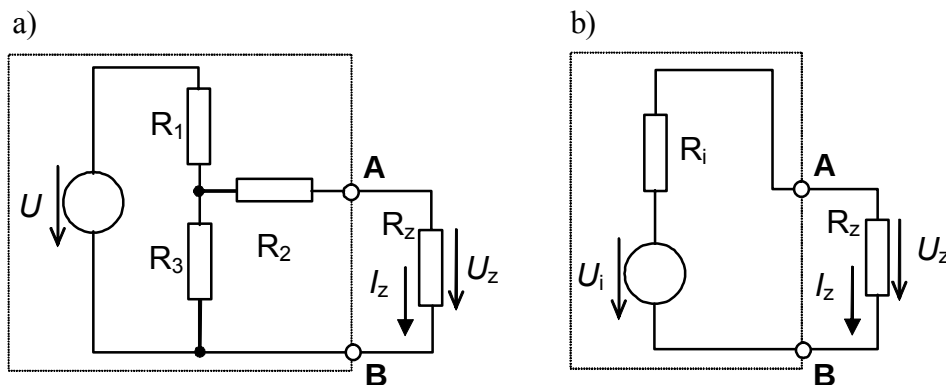
3.1 Cíl úlohy

Na uvedeném lineárním obvodu experimentálně ověřit platnost Théveninovy věty o náhradním zdroji.

3.2 Úkol

- Vypočtete napětí a proud dvou různých zátěží R_z (R_{z1} , R_{z2}) v obvodu podle Obr. 3.1a). Tyto hodnoty ověřte měřením.
- Vyznačenou část obvodu zaměňte náhradním napětovým zdrojem U_i se sériovým rezistorem R_i . Parametry náhradního zdroje (U_i , R_i) stanovte výpočtem pomocí Théveninovy věty. V náhradním obvodu opět změřte napětí a proud zátěže R_{z1} , R_{z2} .
- Parametry náhradního zdroje stanovte experimentálně.

3.3 Teoretický úvod



Obr. 3.1 K metodě náhradního zdroje: a) původní obvod se zátěží, b) náhrada obvodu napětovým zdrojem

Potřebujeme-li znát proud nebo napětí pouze u některé z větví elektrického obvodu, používáme k jeho výpočtu Théveninovu nebo Nortonovu větu. Princip spočívá v náhradě zbývajících částí obvodu (která však smí obsahovat pouze lineární prvky) jednoduchým náhradním obvodovým modelem. Může jím být napětový zdroj s parametry U_i , R_i , stanovenými pomocí Théveninovy věty nebo zdroj proudu s parametry I_i , G_i , stanovenými pomocí Nortonovy věty.

Ukážeme si použití Théveninovy věty. V elektrickém obvodu na Obr. 3.1a) nás zajímá napětí a proud zátěže R_z . Vyznačenou část obvodu nahradíme ekvivalentním napětovým zdrojem, jak je naznačeno na Obr. 3.1b). Podle Théveninovy věty je napětí ekvivalentního napětového zdroje U_i rovno napětí na svorkách AB nezátíženého obvodu (naprázdno)

$$U_i = U_{AB0} = U \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad (\text{V}) \quad (3.1)$$

a jeho vnitřní odpor R_i je roven odporu nahrazovaného obvodu, v němž jsou napěťové zdroje zkratovány a zdroje proudu rozpojeny

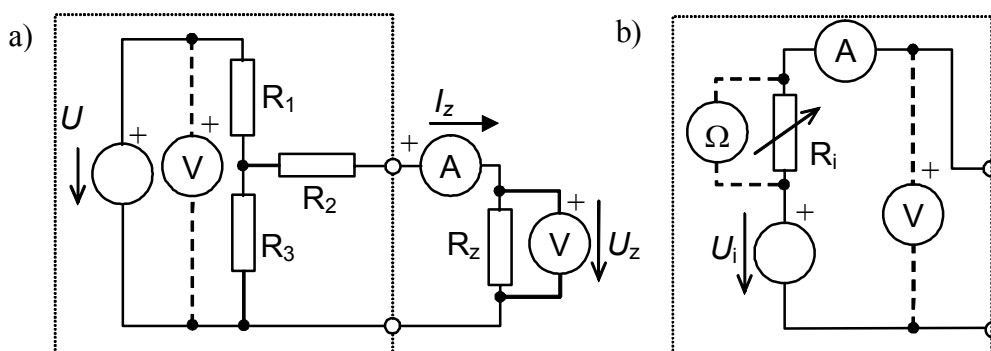
$$R_i = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + R_2. \quad (\Omega) \quad (3.2)$$

Proud a napětí analyzované větve je potom

$$I_z = \frac{U_i}{R_i + R_z}, \quad U_z = U_i \frac{R_z}{R_i + R_z}. \quad (\text{A}), (\text{V}) \quad (3.3a,b)$$

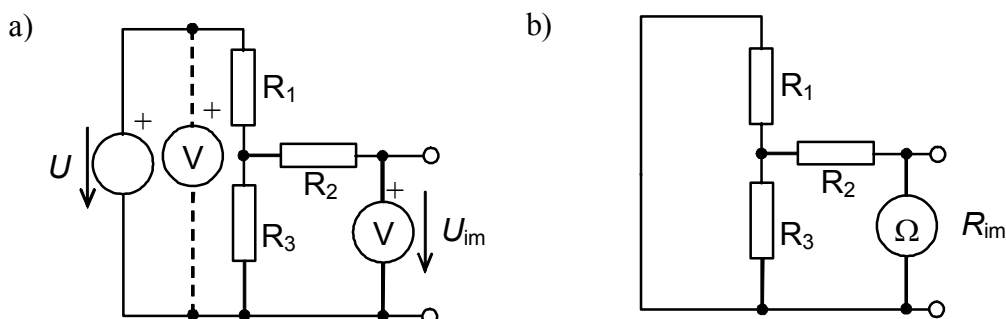
3.4 Pracovní postup

- Zapište do Tab. 3.1 hodnoty odporů přípravku R_1 , R_2 , R_3 , R_{z1} , R_{z2} a učitelem zadanou hodnotu napětí zdroje U (5 až 15 V).
- Zapojte obvod podle schématu na Obr. 3.2a), připojte zátěž R_{z1} resp. R_{z2} do obvodu, dále zapojte miliampérmetr a voltmetr pro měření proudu a napětí zátěže. Zapojení nechejte zkontrolovat vyučujícím. Připojte zdroj napětí a nastavte pomocí voltmetru požadovanou hodnotu napětí U . Změřte napětí U_{zm} a proud I_{zm} zátěže R_{z1} resp. R_{z2} ; hodnoty zapište do Tab. 3.1.



Obr. 3.2 Obvod a náhrada jeho části ekvivalentním zdrojem napětí

- Vypočtete s použitím (3.1) a (3.2) parametry napěťového zdroje U_i a R_i , nahrazujícího vyznačenou část obvodu, zapište je do Tab. 3.2.



Obr. 3.3 Postup při stanovení parametrů náhradního obvodu: a) vnitřní napětí b) vnitřní odpor

- d) Vyznačenou část obvodu nahrad'te napět'ovým zdrojem podle Obr. 3.2b). Pomocí ohmmetru nastavte proměnný rezistor na vypočtenou hodnotu vnitřního odporu R_i . Dále změnou výstupního napětí napájecího zdroje nastavte podle voltmetru svorkové napětí naprázdno na vypočtenou hodnotu U_i .
- e) K náhradnímu obvodu podle Obr. 3.2b) připojte postupně zátěž R_{z1} a R_{z2} . Změřte napětí U'_{zm} a proud I'_{zm} zátěží a hodnoty zapište do Tab. 3.1.
- f) Zapojte obvod podle schématu na Obr. 3.3a), pomocí voltmetru nastavte napětí zdroje U , změřte napětí naprázdno U_{im} . Odpojte voltmetr a zdroj napětí nahrad'te zkratem, připojte ohmmetr podle Obr. 3.3b) a změřte vnitřní odpor R_{im} . Naměřené hodnoty zapište do Tab. 3.2.

3.5 Zpracování

- a) Vypočtete napětí U_z a proud I_z zátěží R_{z1} a R_{z2} v obvodu podle Obr. 3.1a) pro zadané napětí zdroje U . Hodnoty zapište do Tab. 3.1.
- b) Spočtete relativní odchylku hodnot proudu a napětí zátěží naměřených v původním a náhradním obvodu od hodnot vypočtených.
- c) Spočtete relativní odchylku vypočtených a experimentálně zjištěných parametrů náhradního napět'ového zdroje.

Tab. 3.1 Metoda náhradního zdroje – napětí, proudy a chyby měření

	Naměřené								Vypočtené	
	Původní obvod				Náhradní obvod				Původní obvod	
Zátěž	U_{zm}		I_{zm}		U'_{zm}		I'_{zm}		U_z	I_z
	V	δ_U (%)	mA	δ_I (%)	V	δ_U (%)	mA	δ_I (%)	V	mA
	-	(A.1.2)	-	(A.1.2)	-	(A.1.2)	-	(A.1.2)	(3.3b)	(3.3a)
R_{z1}										
R_{z2}										
Pozn.	$U = \dots\dots\dots, R_1 = \dots\dots\dots, R_2 = \dots\dots\dots, R_3 = \dots\dots\dots, R_{z1} = \dots\dots\dots, R_{z2} = \dots\dots\dots$									

Tab. 3.2 Metoda náhradního zdroje – parametry náhradního obvodu

Vypočtené		Měřené			
U_i	R_i	U_{im}		R_{im}	
V	Ω	V	δ_U (%)	Ω	δ_R (%)
(3.1)	(3.2)	-	(A.1.2)	-	(A.1.2)

3.6 Použité přístroje a přípravky

- Zdroj stabilizovaného napětí typ:
- Voltmetr typ:, v.č.:
- Miliampérmetr typ:, v.č.:
- Ohmmetr typ:, v.č.:
- Panel s rezistory $R_1 = 680 \, \Omega$, $R_2 = 390 \, \Omega$, $R_3 = 470 \, \Omega$ a $R_{Z1} = 390 \, \Omega$, $R_{Z2} = 1 \, \text{k}\Omega$.

3.7 Závěr

Vyjádřete se o platnosti věty o náhradním zdroji a možnostech jejího použití při řešení lineárních elektrických obvodů.

Zhodnoťte relativní odchylky naměřených a spočtených hodnot a vyjádřete se o možných příčinách jejich vzniku.

3.8 Kontrolní příklady a otázky

3.8.1 Kontrolní příklad 3.1

V Obr. 3.1 jsou zadány hodnoty prvků: $U = 40 \, \text{V}$, $R_1 = R_2 = R_3 = 20 \, \Omega$, $R_{Z1} = 10 \, \Omega$, $R_{Z2} = 20 \, \Omega$. Pomocí Théveninovy věty o náhradním zdroji vypočítejte proud zátěží R_{Z1} , R_{Z2} .

[Řešení](#)

3.8.2 Kontrolní příklad 3.2

V Obr. 2.1 z předchozí úlohy jsou zadány hodnoty prvků: $U = 40 \, \text{V}$, $R_2 = R_4 = 10 \, \Omega$, $R_3 = 5 \, \Omega$, $R_{Z1} = 10 \, \Omega$, $R_{Z2} = 20 \, \Omega$. Pomocí Théveninovy věty o náhradním zdroji vypočítejte proud zátěží R_{Z1} , R_{Z2} . [Řešení](#)

3.8.3 Kontrolní otázka 3

Kdy je možné použít pro analýzu obvodů metodu náhradního zdroje? [Řešení](#)

3.9 Shrnutí

V případě, že potřebujeme znát parametry pouze některé větve analyzovaného obvodu (napětí, proud nebo výkon), můžeme nahradit zbývající část lineárního obvodu napěťovým zdrojem se sériovým vnitřním odporem R_i (Théveninova věta o náhradním zdroji) nebo proudovým zdrojem s paralelní vnitřní vodivostí G_i (Nortonova věta). U náhradního napěťového zdroje je potom hodnota U_i rovna napětí na svorkách zkoumané větve (větev je přitom vyjmuta z obvodu); vnitřní odpor R_i je výsledný odpor na svorkách zkoumané větve (větev je vyjmuta z obvodu), jsou-li všechny zdroje obvodu nahrazeny jejich vnitřními odpory (u ideálního zdroje napětí $R_i = 0$, u ideálního zdroje proudu $R_i \rightarrow \infty$).

4 Metoda uzlových napětí

4.1 Cíl úlohy

Na uvedeném lineárním obvodu ověřit experimentálně platnost metody uzlových napětí.

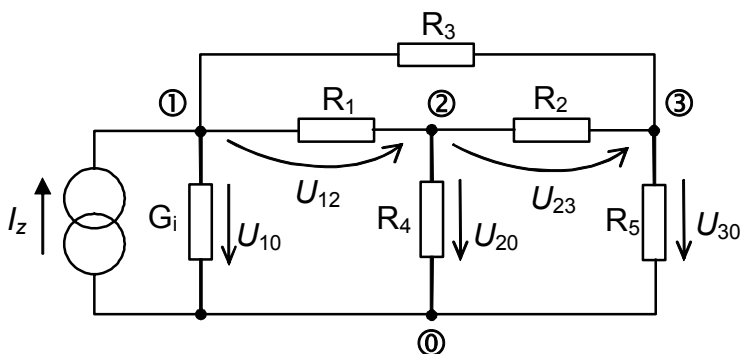
4.2 Úkol

- V obvodu podle Obr. 4.1 změřte pro zadaný proud zdroje I_z napětí U_{10} , U_{20} , U_{30} , U_{12} , U_{23} .
- Ověřte naměřené hodnoty výpočtem pomocí metody uzlových napětí. Vyhodnoťte chyby měření.

4.3 Teoretický úvod

Princip metody uzlových napětí (MUN) je založen na aplikaci prvního Kirchhoffova zákona (tzv. proudový zákon) na nezávislé uzly analyzovaného obvodu. Proudů ve větvích s pasivními prvky se vyjádří pomocí uzlových napětí, která jsou definována jako napětí mezi nezávislými uzly a zvoleným uzlem referenčním. Dostaneme tak soustavu nezávislých rovnic pro neznámá uzlová napětí.

Pomocí Ohmova a případně druhého Kirchhoffova zákona můžeme následně stanovit proudy a napětí na zbývajících větvích obvodu.



Obr. 4.1 K principu metody uzlových napětí

4.3.1 Obecný postup při analýze obvodu metodou uzlových napětí

- Předpokládejme, že v obvodu se nacházejí *pouze zdroje proudu*. Případné zdroje napětí v obvodu nahradíme ekvivalentními zdroji proudu (viz úloha 3).
- Zvolíme jeden uzel jako *referenční* (0) a očíslovujeme zbývající *nezávislé uzly*.
- Označíme uzlová napětí oproti referenčnímu uzlu (čítací šipky všech uzlových napětí směřují k referenčnímu uzlu), příklad viz Obr. 4.1.
- Pro nezávislé uzly sestavíme rovnice pomocí prvního Kirchhoffova zákona. Proudů ve větvích vyjádříme pomocí uzlových napětí a vodivostí větví. Všechny rovnice upravíme tak, že proudy případných proudových zdrojů převedeme na pravou stranu rovnic. Dostaneme soustavu *uzlových rovnic*.
- Řešením soustavy uzlových rovnic dostaneme hledaná uzlová napětí.

- Použitím druhého Kirchhoffova zákona a známých uzlových napětí stanovíme ostatní větвовá napětí v analyzovaném obvodu.
- Pomocí Ohmova zákona a větвовých napětí určíme větвовé proudy.

Uzlové rovnice v maticovém tvaru můžeme sestavit přímo, na základě pravidel vyplývajících z uvedeného obecného postupu. Obecný zápis soustavy uzlových rovnic v maticovém tvaru je

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I}_z, \quad (\text{A}) \quad (4.1)$$

kde je $\mathbf{G}$ matice koeficientů soustavy (matice vodivosti), (S)
 $\mathbf{U}$ vektor neznámých uzlových napětí, (V)
 $\mathbf{I}_z$ vektor pravých stran rovnic (vektor zdrojů proudu). (A)

4.3.2 Sestavení maticové rovnice

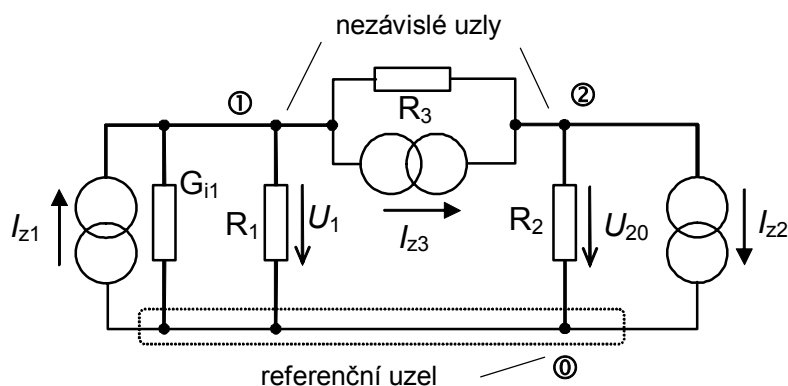
Prvky *hlavní diagonály matice $\mathbf{G}$* jsou tzv. vlastní vodivosti uzlů, tedy součty vodivostí všech rezistorů připojených do příslušného uzlu; jejich znaménka jsou kladná.

Prvky matice $\mathbf{G}$ *mimo hlavní diagonálu* jsou tzv. vzájemné vodivosti uzlů, tedy součty vodivostí rezistorů připojených mezi dvěma uzly. Pokud byly čítací šipky uzlových napětí voleny směrem k referenčnímu uzlu, je znaménko vzájemných vodivostí vždy záporné. V případě, že je obvod složen pouze z pasivních prvků a neřízených zdrojů, je matice vodivostí souměrná podle hlavní diagonály.

Prvky *vektoru zdrojů proudu* jsou součtem proudů zdrojů připojených do příslušného uzlu. Směřuje-li čítací šipka proudu do uzlu, má proud zdroje znaménko kladné, v opačném případě záporné.

Příklad

Pro ilustraci sestavíme pomocí MUN rovnice pro obvod na Obr. 4.2. Obvod sestává z rezistorů s odpory R_1, R_2, R_3 , zdroje proudu s parametry I_{z1}, G_{i1} a zdrojů proudu I_{z2}, I_{z3} . Jak je vidět z obrázku, obvod má celkem tři uzly, jako nezávislé volíme uzly 1 a 2, jako referenční uzel 0.



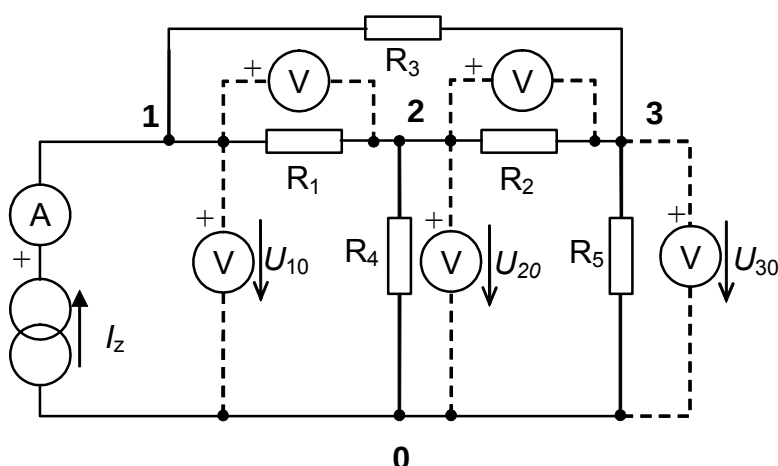
Obr. 4.2 Příklad k sestavení uzlových rovnic v maticovém tvaru

Analyzovaný obvod popíšeme soustavou dvou rovnic, jejíž maticový zápis sestavený podle výše uvedených pravidel je

$$\begin{bmatrix} G_{i1} + G_1 + G_3 & -G_3 \\ -G_3 & G_2 + G_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{10} \\ U_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{z1} - I_{z3} \\ I_{z3} - I_{z2} \end{bmatrix}, \text{ kde je } G_j = \frac{1}{R_j}. \quad (4.2)$$

Soustavu rovnic řešíme např. Gaussovou eliminační metodou, pomocí inverzní matice koeficientů soustavy, použitím Cramerova pravidla apod.

4.4 Pracovní postup



Obr. 4.3 Schéma zapojení pracoviště k ověření metody uzlových napětí

- Zapojte obvod podle schématu na Obr. 4.3, k panelu s rezistory připojte vypnutý zdroj a miliampérmetr. Požádejte vyučujícího o kontrolu zapojení a zadání hodnoty I_z (50 až 130 mA), kterou zapišete do Tab. 4.1.
- Zapněte zdroj a regulací napětí nastavte podle miliampérmetru požadovanou hodnotu proudu I_z . Postupně připojujte voltmetr (jak je čárkovaně naznačeno na Obr. 4.3) a měřte napětí U_{10} , U_{20} , U_{30} , U_{12} , U_{23} , naměřené hodnoty zapišete do Tab. 4.1.

4.5 Zpracování

- Hodnoty U_{10} , U_{20} , U_{30} vypočtete metodou uzlových napětí. Sestavte matici koeficientů $\mathbf{G}$ (vnitřní vodivost zdroje předpokládáme $G_i = 0$), vektor pravé strany $\mathbf{I}_z$ a soustavu (4.1) řešte pomocí programu LinRov.
- Dopočítejte větvová napětí U_{12} , U_{23} . Zjištěné hodnoty zapišete do Tab. 4.1 a vyhodnoťte relativní odchylku naměřených a vypočtených hodnot.

Tab. 4.1 MUN - měřené a vypočtené hodnoty

Poznámky	$I_z = \dots\dots\dots$ mA	U_{10}	U_{20}	U_{30}	U_{12}	U_{23}
Měřeno	V	-				
Vypočteno	V	(LinRov)				
δ_U	%	(A.1.2)				

4.6 Použité přístroje a přípravky

- Stabilizovaný laboratorní zdroj typ:
- Voltmetr typ:, v.č.:
- Miliampérmetr typ:, v.č.:
- Panel s rezistory $R_1 = 100 \, \Omega$, $R_2 = 150 \, \Omega$, $R_3 = 220 \, \Omega$, $R_4 = 330 \, \Omega$, $R_5 = 100 \, \Omega$.

4.7 Závěr

Diskutujte možnost aplikace MUN při řešení elektrických obvodů.

Zhodnoťte relativní odchylky naměřených a spočtených hodnot a vyjádřete se o možných příčinách jejich vzniku.

4.8 Kontrolní příklady a otázky

4.8.1 Kontrolní příklad 4.1

Pro obvod z Obr. 4.2, kdy je zadáno: $I_{Z1} = 3 \, \text{A}$, $I_{Z2} = 2 \, \text{A}$, $I_{Z3} = 1 \, \text{A}$, $G_{11} = 0,1 \, \text{S}$, $R_1 = R_3 = 100 \, \Omega$, $R_2 = 200 \, \Omega$, vypočítejte napětí U_{10} , U_{20} a U_{12} metodou uzlových napětí.

[Řešení](#)

4.8.2 Kontrolní příklad 4.2

Pro obvod z Obr. 4.3, kdy je zadáno: $I_Z = 0,2 \, \text{A}$, $R_1 = R_3 = 100 \, \Omega$, $R_2 = R_4 = 200 \, \Omega$, $R_5 = 500 \, \Omega$, vypočítejte napětí U_{10} , U_{20} , U_{30} , U_{12} , U_{13} a U_{23} metodou uzlových napětí. [Řešení](#)

4.8.3 Kontrolní otázka 4

Jaké budící zdroje předpokládáme při analýze lineárních obvodů pomocí metody uzlových napětí? [Řešení](#)

4.9 Shrnutí

Metoda uzlových napětí (MUN) je univerzální metoda analýzy lineárních obvodů, založená na aplikaci 1. K.Z.(proudového) na nezávislé uzly obvodu (je jich $n-1$, kde n je počet uzlů obvodu). Obvod může obsahovat pouze proudové zdroje, napěťové zdroje se musí transformovat na proudové pomocí Nortonovy věty.

Soustava lineárních rovnic ve tvaru $\mathbf{G} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I}$ může být řešena některou z metod řešení soustav lineárních rovnic. Prvky hlavní diagonály matice vodivostí $\mathbf{G}$ jsou vlastní vodivosti uzlů (součet všech vodivostí všech rezistorů připojených do příslušného uzlu). Prvky mimo hlavní diagonálu jsou vzájemné vodivosti uzlů (součty vodivostí všech rezistorů připojených mezi příslušnými uzly, uvádí se se záporným znaménkem). Vektor pravých stran - sloupcová matice proudů $\mathbf{I}$ - je dána součtem všech proudů (budících zdrojů) vtékajících do příslušného uzlu.

5 Metoda smyčkových proudů

5.1 Cíl úlohy

Na uvedeném lineárním obvodu ověřit experimentálně platnost metody smyčkových proudů.

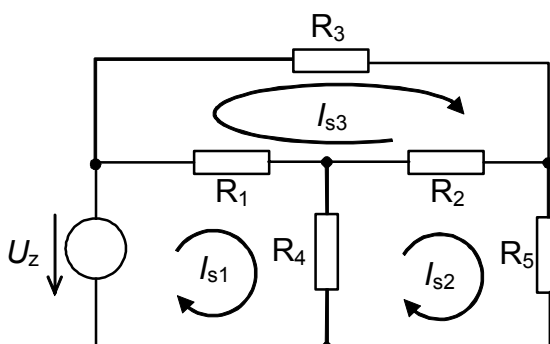
5.2 Úkol

- V obvodu podle Obr. 5.1 změřte smyčkové proudy I_{s1} , I_{s2} , I_{s3} pro zadané napětí zdroje U_z .
- Ověřte naměřené hodnoty výpočtem pomocí metody smyčkových proudů. Vyhodnoťte chyby měření.

5.3 Teoretický úvod

Princip metody smyčkových proudů (MSP) je založen na aplikaci druhého Kirchhoffova zákona (tzv. napěťový zákon) v nezávislých smyčkách analyzovaného obvodu. Napětí ve smyčkách se vyjádří pomocí smyčkových proudů. Dostaneme tak soustavu nezávislých rovnic pro neznámé smyčkové proudy.

Pomocí druhého Kirchhoffova a případně Ohmova zákona můžeme následně stanovit proudy a napětí na zbývajících větvích obvodu.



Obr. 5.1 K principu metody smyčkových proudů

5.3.1 Obecný postup při analýze obvodu metodou smyčkových proudů

- Předpokládejme, že v obvodu se nacházejí pouze zdroje napětí. Případné zdroje proudu v obvodu nahradíme ekvivalentními zdroji napětí.
- Na základě topologické analýzy obvodu zvolíme nezávislé smyčky.
- Zavedeme smyčkové proudy a zvolíme jejich orientaci, příklad viz Obr. 5.1.
- Pomocí druhého Kirchhoffova zákona sestavíme rovnice pro nezávislé smyčky tak, že v nich sečítáme napětí na jednotlivých prvcích ve směru daném orientací příslušného smyčkového proudu. Napětí na větvích dané smyčky vyjádříme pomocí smyčkových proudů a odporů rezistorů větví. Všechny rovnice následně upravíme tak, že napětí případných zdrojů napětí převedeme na pravou stranu rovnic. Dostaneme soustavu rovnic pro smyčkové proudy.
- Řešením soustavy rovnic získáme hledané *smyčkové proudy*.

- Použitím prvního Kirchhoffova zákona a známých smyčkových proudů stanovíme větrové proudy analyzovaného obvodu.
- Pomocí Ohmova zákona a větrových proudů určíme větrová napětí.

Soustavu rovnic pro smyčkové proudy můžeme sestavit přímo v maticovém tvaru na základě pravidel vyplývajících z uvedeného obecného postupu. Obecný zápis této soustavy v maticovém tvaru je

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{U}_z, \quad (\text{V}) \quad (5.1)$$

kde je $\mathbf{R}$ matice koeficientů soustavy (matice odporů), (Ω)
 $\mathbf{I}$ vektor neznámých smyčkových proudů, (A)
 $\mathbf{U}_z$ vektor pravých stran rovnic (vektor zdrojů napětí). (V)

5.3.2 Sestavení maticové rovnice

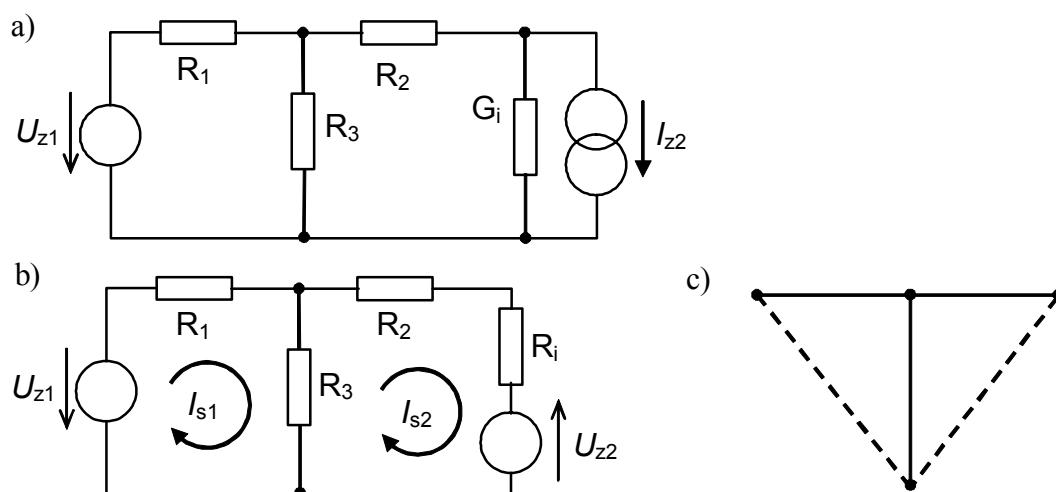
Prvky *hlavní diagonály matice $\mathbf{R}$* jsou součtem odporů všech rezistorů zapojených v příslušných smyčkách, jejich znaménka jsou kladná.

Prvky matice $\mathbf{R}$ *mimo hlavní diagonálu* jsou rovny součtu odporů rezistorů, které jsou společné příslušným dvěma smyčkám (protékají jimi oba proudy současně). Znaménko je kladné, je-li shodný směr proudu v obou smyčkách, v opačném případě je znaménko záporné. Pokud byla zvolena souhlasná orientace všech smyčkových proudů, jsou všechny prvky mimo hlavní diagonálu záporné. V případě, že je obvod složen pouze z pasivních prvků a neřízených zdrojů, je matice odporů souměrná podle hlavní diagonály.

Prvky *vektoru zdrojů napětí* jsou součtem napětí zdrojů zapojených v příslušných smyčkách. Je-li směr číací šipky napětí zdroje shodný se zvoleným směrem smyčkového proudu, má napětí zdroje znaménko záporné, v opačném případě kladné.

Příklad

Pro ilustraci sestavíme pomocí MSP rovnice pro obvod podle Obr. 5.2a). Obvod sestává z rezistorů s odpory R_1, R_2, R_3 , zdroje napětí U_z a zdroje proudu s parametry I_{z2}, G_i . Zdroj proudu nahradíme ekvivalentním zdrojem napětí s parametry (Obr. 5.2b):



Obr. 5.2 Příklad k sestavení smyčkových rovnic v maticovém tvaru

$$U_{z2} = \frac{I_{z2}}{G_i}, \quad R_i = \frac{1}{G_i} \quad (\text{V}), (\Omega) \quad (5.2)$$

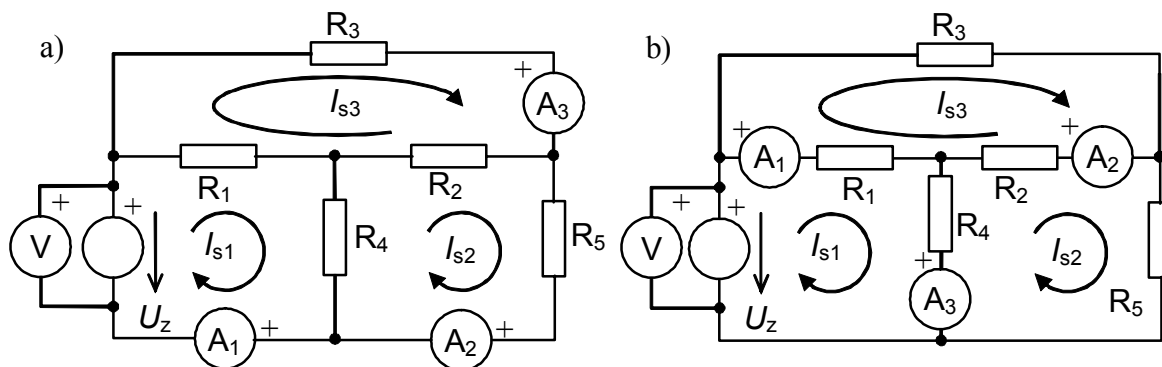
Jak je vidět z topologického grafu obvodu na Obr. 5.2c), má obvod dvě hlavní větve (vyznačené čárkovaně) a každou hlavní větví musí protékat právě jeden nezávislý smyčkový proud. Analyzovaný obvod má proto dvě nezávislé smyčky a popíšeme jej soustavou dvou rovnic, jejíž maticový zápis je pro zvolený směr I_{s1}, I_{s2}

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_3 & -R_3 \\ -R_3 & R_2 + R_3 + R_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{z1} \\ I_{z2} / G_i \end{bmatrix}, \text{ kde je } R_i = \frac{1}{G_i}. \quad (5.3)$$

Soustavu rovnic řešíme např. Gaussovou eliminační metodou, pomocí inverzní matice koeficientů soustavy, použitím Cramerova pravidla apod.

5.4 Pracovní postup

- Zapojte obvod podle schématu na Obr. 5.3a), k přípravku s rezistory připojte vypnutý zdroj napětí a voltmetr, pro měření smyčkových proudů zapojte do obvodu miliampérmetry. Zapojení nechejte zkontrolovat a požádejte vyučujícího o zadání hodnoty napětí U_z (v rozsahu 5 až 15 V), kterou zapišete do Tab. 5.1. Zapišete si rovněž vnitřní odpor R_A použitých miliampérmetrů.
- Zapněte zdroj a nastavte pomocí voltmetru jeho výstupní napětí na hodnotu U_z . Změřte proudy I_{s1}, I_{s2}, I_{s3} a naměřené hodnoty zapišete do Tab. 5.1.
- Odpojte zdroj, obvod přepojte podle schématu na Obr. 5.3b). Znovu připojte zdroj a zkontrolujte jeho výstupní napětí, případně je znovu nastavte na hodnotu U_z . Změřte proudy rezistory I_{R1}, I_{R2}, I_{R4} a naměřené hodnoty zapišete do Tab. 5.1.



Obr. 5.3 Zapojení úlohy k ověření metody smyčkových proudů

5.5 Zpracování

- Hodnoty I_{s1}, I_{s2}, I_{s3} vypočtete metodou smyčkových proudů. Sestavte matici koeficientů $\mathbf{R}$, vektor pravé strany $\mathbf{U}_z$ a soustavu (5.1) řešte např. pomocí programu LinRov. Vzhledem k faktu, že nelze zanedbat vnitřní odpor R_A použitých ampérmetrů, je potřebné tento odpor započítat do soustavy (5.1) tak, že namísto ampérmetrů uvažujete ve schématu odpory s hodnotou R_A .

- b) Dopačítejte proud rezistory I_{R1} , I_{R2} , I_{R4} jako rozdíl příslušných smyčkových proudů. Zjištěné hodnoty запиšte do Tab. 5.1 a vyhodnoťte relativní odchylku naměřených a vypočtených hodnot.

Tab. 5.1 MSP - měřené a vypočtené hodnoty

Poznámky $U_Z = \dots\dots\dots V$ $R_A = \dots\dots\dots \Omega$			I_{S1}	I_{S2}	I_{S3}	I_{R1}	I_{R2}	I_{R4}
				(I_{R5})	(I_{R3})	$(I_{S1} - I_{S3})$	$(I_{S2} - I_{S3})$	$(I_{S1} - I_{S2})$
Měřeno	mA	-						
Vypočteno	mA	(LinRov)						
δ	%	(A.1.2)						

5.6 Použité přístroje a přípravy

- Stabilizovaný laboratorní zdroj typ:
- Voltmetr typ:, v.č.:
- Miliampérmetr A_1 typ:, v.č.:
- Miliampérmetr A_2 typ:, v.č.:
- Miliampérmetr A_3 typ:, v.č.:
- Panel s rezistory $R_1 = 100 \Omega$, $R_2 = 150 \Omega$, $R_3 = 220 \Omega$,
 $R_4 = 470 \Omega$, $R_5 = 100 \Omega$.

5.7 Závěr

Diskutujte možnost aplikace MSP při řešení elektrických obvodů.

Zhodnoťte relativní odchylky naměřených a spočtených hodnot a vyjádřete se o možných příčinách jejich vzniku.

5.8 Kontrolní příklady a otázky

5.8.1 Kontrolní příklad 5.1

Pro obvod z Obr. 5.2, kdy je zadáno: $U_{Z1} = 25 V$, $I_{Z2} = 2 A$, $G_i = 0,1 S$, $R_1 = R_3 = 100 \Omega$, $R_2 = 200 \Omega$, vypočítejte proudy I_{S1} , I_{S2} a I_{S3} metodou smyčkových proudů. [Řešení](#)

5.8.2 Kontrolní příklad 5.2

Pro obvod z Obr. 5.1, kdy je zadáno: $U_Z = 200 V$, $R_1 = R_3 = 100 \Omega$, $R_2 = R_4 = 200 \Omega$, $R_5 = 500 \Omega$, vypočítejte proudy I_{S1} , I_{S2} , I_{S3} a I_{R1} , I_{R2} , I_{R4} metodou smyčkových proudů. [Řešení](#)

5.8.3 Kontrolní otázka 5

Jaké budící zdroje předpokládáme při analýze lineárních obvodů pomocí metody smyčkových proudů? [Řešení](#)

5.9 Shrnutí

Metoda smyčkových proudů (MSP) je univerzální metoda analýzy lineárních obvodů založená na aplikaci 2. K.Z.(napětového) na nezávislé smyčky obvodu (je jich $v-n+1$, kde v je počet větví a n počet uzlů obvodu). Obvod může obsahovat pouze napětové zdroje; proudové zdroje se musí transformovat na napětové pomocí Théveninovy věty

Soustava lineárních rovnic ve tvaru $\mathbf{R} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{U}$ může být řešena některou z metod řešení soustav lineárních rovnic. Prvky hlavní diagonály matice odporů $\mathbf{R}$ jsou vlastní odpory smyček (součet odporů všech rezistorů zapojených v příslušné smyčce). Prvky mimo hlavní diagonálu jsou vzájemné odpory smyček (součty odporů všech rezistorů připojených mezi dvěma příslušnými smyčkami - se záporným znaménkem, protékají-li vzájemnými prvky smyčkové proudy nesouhlasným směrem, s kladným znaménkem, protékají-li souhlasným směrem). Vektor pravých stran - sloupcová matice napětí $\mathbf{U}$ - je dána součtem všech napětí budících zdrojů zapojených v příslušné smyčce.

6 Princip superpozice

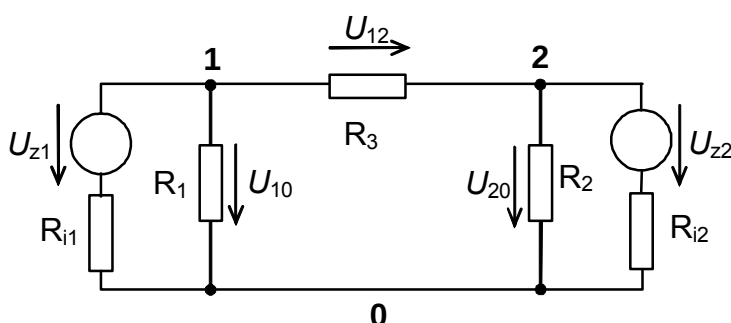
6.1 Cíl úlohy

Ověřit experimentálně platnost principu superpozice.

6.2 Úkol

- Měřením i výpočtem ověřte platnost principu superpozice v lineárním obvodu.
- Měřením i výpočtem ověřte, zda platí princip superpozice v nelineárním obvodu.

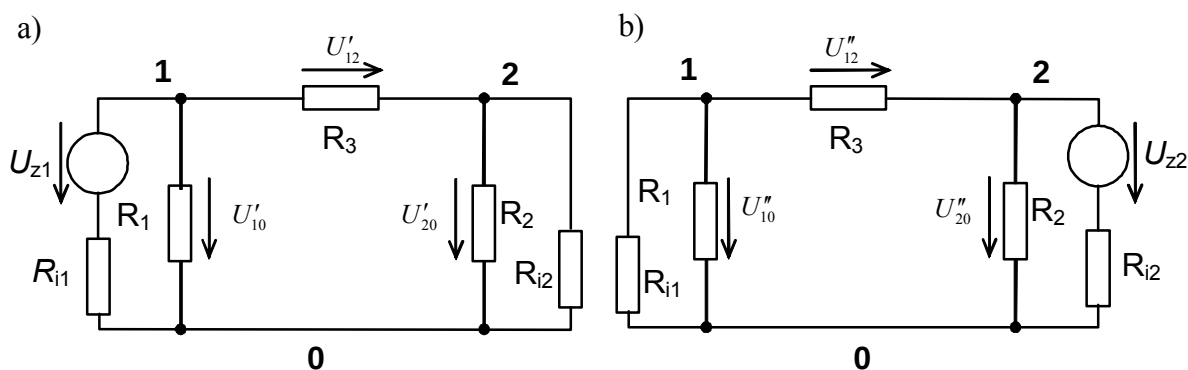
6.3 Teoretický úvod



Obr. 6.1 K ověření platnosti principu superpozice v lineárních obvodech

Při analýze lineárních obvodů se často využívá princip superpozice, podle kterého se lineárně sčítají účinky jednotlivých zdrojů působících v lineárním obvodu (platí pro proudy i napětí větvi). To tedy znamená, že např. výsledné napětí U_{10} mezi uzly 1 a 0 vyznačené v obvodu se dvěma zdroji napětí na Obr. 6.1 je dáno algebraickým součtem dílčího napětí U'_{10} v obvodu se zdrojem U_{z1} podle Obr. 6.2a) a napětí U''_{10} v obvodu se zdrojem U_{z2} podle Obr. 6.2b)

$$U_{10} = U'_{10} + U''_{10} \quad (V) \quad (6.1)$$

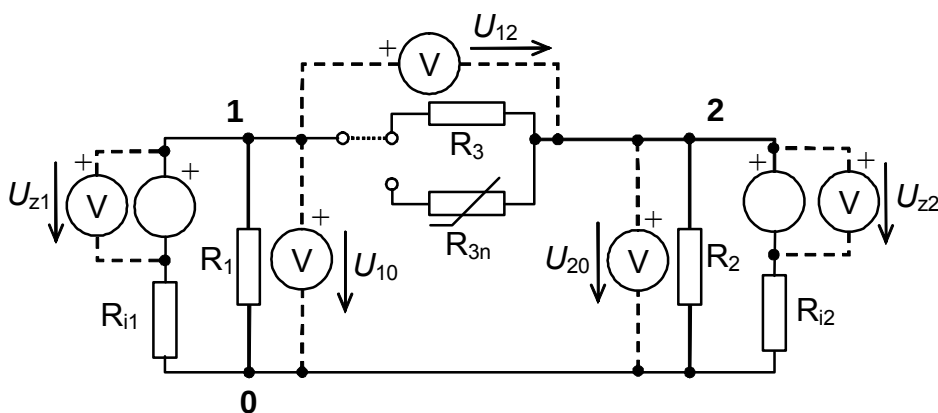


Obr. 6.2 Postup při použití principu superpozice

Stejný vztah platí i pro všechny ostatní obvodové veličiny - napětí a proudy. Jak je vidět z Obr. 6.2) nebo Obr. 6.2b), při zjišťování dílčích účinků jednotlivých zdrojů nahradíme ty zdroje, které právě neuvažujeme, jejich vnitřním odporem (ideální zdroj napětí se nahradí zkratem $R_i = 0$, ideální zdroj proudu rozpojením $R_i \rightarrow \infty$).

6.4 Pracovní postup

- Sestavte lineární obvod podle schématu na Obr. 6.3, na panelu s rezistory $R_1, R_2, R_3, R_{3n}, R_{i1}, R_{i2}$, propojte uzly 1 a 2 přes *lineární* rezistor R_3 .
- Připojte k obvodu přívody obou zdrojů napětí. Zapojení nechejte zkontrolovat, poté oba zdroje zapněte.
- Voltmetrem změřte napětí zdrojů U_{z1}, U_{z2} , dále napětí mezi uzly U_{10}, U_{20}, U_{12} , všechny hodnoty zapisujte do Tab. 6.1. Respektujte polaritu měřených veličin.



Obr. 6.3 Schéma zapojení úlohy pro ověření principu superpozice

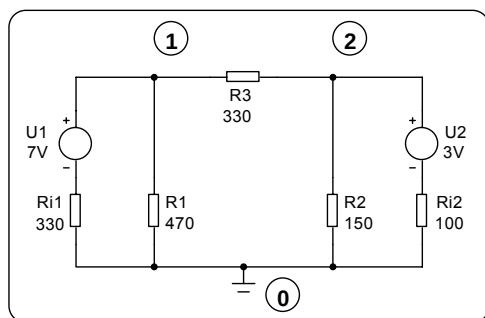
- Odpojte zdroj napětí U_{z2} a nahradte jej zkratem (upravte zapojení podle Obr. 6.2a) pomocí zkratové spojky). Změřte napětí $U'_{10}, U'_{20}, U'_{12}$.
- Připojte zpět zdroj napětí U_{z2} a odpojte U_{z1} , ten nahradte zkratem (upravte zapojení podle Obr. 6.2b) pomocí zkratové spojky). Změřte napětí $U''_{10}, U''_{20}, U''_{12}$.
- Sestavte nelineární obvod propojením uzlů 1 a 2 přes *nelineární prvek* R_{3n} (jako nelineární rezistor je použita běžná křemíková dioda). Postup podle bodů b) až e) opakujte. Hodnoty zapisujte do Tab. 6.2.

6.5 Zpracování

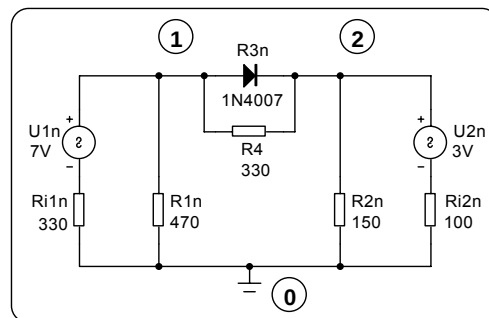
6.5.1 Simulace

- Spusťte program MicroCap; otevřete připravený soubor *superpozice.cir*. Připravená schémata Obr. 6.4 odpovídají měřenému lineárnímu a nelineárnímu obvodu z Obr. 6.3.. Lineární a nelineární obvod jsou uspořádány do listů (podobně jako v Excelu). V každém listu je kromě připraveného schématu obvodu také popis postupu.

Lineární obvod



Nelineární obvod



Obr. 6.4 Schémata lineárního a nelineárního obvodu simulovaného v MicroCapu

- Upravte hodnoty napětí zdrojů tak, aby odpovídala měřenému obvodu.
- Otevřete záložku *Lineární*. Spusťte stejnosměrnou analýzu **Analysis/Dynamic DC**. Zobrazí se uzlová napětí všech nezávislých uzlů obvodu.
- Napětí U_{10} a U_{20} zapište do Tab. 6.1 řádek Simulace; dopočtete napětí $U_{12} = U_{10} - U_{20}$. Napětí zdroje U_2 nastavte na 0 voltů a opět zapište uzlová napětí U'_{10} , U'_{20} , U'_{12} . Poté nastavte napětí zdroje U_2 na původní hodnotu, napětí zdroje U_1 na 0 voltů a opět zapište uzlová napětí U''_{10} , U''_{20} , U''_{12} .
- Otevřete záložku *Nelineární* a opakujte postup podle c) a d).

Tab. 6.1 Princip superpozice v lineárním obvodu

Působící zdroje	$U_{z1} = \dots\dots\dots V$			$U_{z1} = \dots\dots\dots V$			$U_{z1} = 0\text{ V}$			Odchylka		
	$U_{z2} = \dots\dots\dots V$			$U_{z2} = 0\text{ V}$			$U_{z2} = \dots\dots\dots V$					
Větвовá napětí	U_{10}	U_{20}	U_{12}	U'_{10}	U'_{20}	U'_{12}	U''_{10}	U''_{20}	U''_{12}	ΔU_{10}	ΔU_{20}	ΔU_{12}
	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(6.2)	(6.2)	(6.2)
Měřeno												
Simulace												

Tab. 6.2 Princip superpozice v nelineárním obvodu

[illegible]

- f) Porovnejte všechny naměřené hodnoty s hodnotami získanými analýzou obvodu pomocí programu MicroCap.
- g) Vyhodnoťte pro měřené i simulované hodnoty odchylku ΔU_{ij} podle vztahu

$$\Delta U_{ij} = U_{ij} - (U'_{ij} + U''_{ij}). \quad (\text{V}) \quad (6.2)$$

- h) Srovnajte naměřené hodnoty se simulovanými.

Poznámka k programu MicroCap: čísla se zadávají s desetinnými tečkami. Aktuální studentskou verzi programu lze získat na webové adrese <http://www.spectrum-soft.com>.

6.6 Použité přístroje a přípravky

- Dvojitý stabilizovaný zdroj napětí U_{z1} , U_{z2} typ:
- Voltmetr typ:, v.č.:
- Panel s obvodem podle obrázku, hodnoty odporů jsou $R_1 = 470 \Omega$, $R_2 = 150 \Omega$, $R_3 = 330 \Omega$, $R_{i1} = 330 \Omega$, $R_{i2} = 100 \Omega$.

6.7 Závěr

Na základě zjištěných výsledků formulujte závěr o platnosti principu superpozice v lineárních a nelineárních obvodech.

6.8 Kontrolní příklady a otázky

6.8.1 Kontrolní příklad 6.1

V Obr. 5.2b jsou zadány hodnoty prvků: $U_{z1} = 30 \text{ V}$, $U_{z2} = 60 \text{ V}$, $R_1 = R_3 = 20 \Omega$, $R_2 = R_i = 10 \Omega$. Pomocí metody superpozice vypočítejte napětí U_{R3} na rezistoru R_3 . [Řešení](#)

6.8.2 Kontrolní příklad 6.2

V Obr. 6.1 jsou zadány hodnoty prvků: $U_{z1} = 30 \text{ V}$, $U_{z2} = 60 \text{ V}$, $R_1 = R_{i1} = 10 \Omega$, $R_2 = R_{i2} = 5 \Omega$, $R_3 = 20 \Omega$. Pomocí metody superpozice vypočítejte napětí U_{10} na rezistoru R_1 . [Řešení](#)

6.8.3 Kontrolní otázka 6

V jakých obvodech je možné použít metodu superpozice? [Řešení](#)

6.9 Shrnutí

Podle principu superpozice, který platí pouze v lineárních obvodech, se účinky jednotlivých zdrojů v obvodě lineárně sčítají. Toho je možné využít při analýze obvodů s více zdroji, kdy analyzujeme postupně (opakovaně) zkoumaný obvod pouze s jedním ze zdrojů (ostatní zdroje jsou nahrazeny jejich vnitřním odporem). Výsledný parametr obvodu (napětí nebo proud větve) je potom dán součtem dílčích příspěvků od jednotlivých zdrojů. Samotnou metodu je vhodné použít pro analýzu pouze v nejjednodušších obvodech. Ve složitějších obvodech je lépe použít některou z efektivnějších metod – univerzální metody MSP, MUN.

7 Vlastnosti lineárních a nelineárních obvodových prvků

7.1 Cíl úlohy

Experimentálně ověřit základní vlastnosti lineárních a nelineárních prvků, změřit u zadaných obvodových prvků A-V charakteristiky a určit v uvedeném pracovním bodě statický a dynamický odpor prvku.

7.2 Úkol

- Změřte a zobrazte ampérvoltové (A-V) charakteristiky zadaného lineárního a nelineárního prvku, dále sériové a paralelní kombinace těchto prvků.
- Pomocí naměřených charakteristik stanovte pro každý prvek nebo jejich zapojení statický a dynamický odpor v předepsaných pracovních bodech.
- Pro zadaný pracovní bod nakreslete linearizovaný model nelineárního prvku a uveďte jeho statický a dynamický odpor.

7.3 Teoretický úvod

Elektrický obvod označujeme jako nelineární, pokud obsahuje alespoň jeden nelineární prvek, jehož hlavní fyzikální parametr závisí na proudu nebo napětí. Vlastnosti nelineárního prvku jsou vyjádřeny jeho charakteristikou, která je obecně nelineární rovnicí

$$F(x, y) = 0, \quad (7.1)$$

kde x a y jsou veličiny definující fyzikální parametr příslušného prvku. Pro rezistor je to napětí u a proud i , pro kapacitor náboj q a napětí u , pro induktor magnetický tok ϕ a proud i . V nelineárních obvodech *neplatí princip superpozice*, a proto je jejich řešení obtížnější. Nelineární obvod obvykle neřešíme pro celou oblast charakteristik jeho nelineárních prvků, ale jen pro aktuální část, kterou nazýváme *pracovní oblast*.

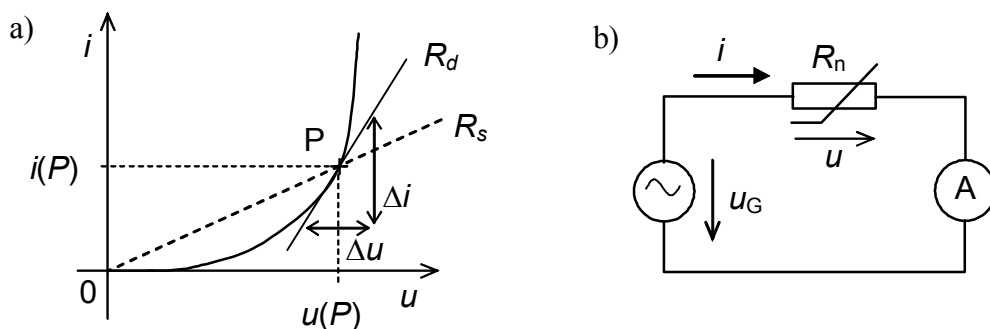
Na ampérvoltové charakteristice nelineárního rezistoru můžeme odečíst v příslušném pracovním bodě P jeho *statický odpor*

$$R_s = \frac{u(P)}{i(P)}, \quad (\Omega) \quad (7.2)$$

který charakterizuje chování prvku z hlediska stejnosměrného proudu. Pracovní bod P potom určuje tzv. *stejnoseměrný pracovní bod*. Chování prvku při malém střídavém signálu v okolí pracovního bodu P (viz. Obr. 7.1a)) vyjadřuje *diferenciální (dynamický) odpor*

$$R_d = \frac{du(P)}{di(P)} \cong \frac{\Delta u(P)}{\Delta i(P)}. \quad (\Omega) \quad (7.3)$$

Charakteristiky nelineárních prvků zjišťujeme zpravidla měřením bod po bodu - *staticky*, nebo *dynamicky* např. pomocí generátoru a osciloskopu s použitím časově proměnných budících signálů. Na osu x osciloskopu se přivádí veličina u a na osu y veličina i , viz Obr. 7.1.

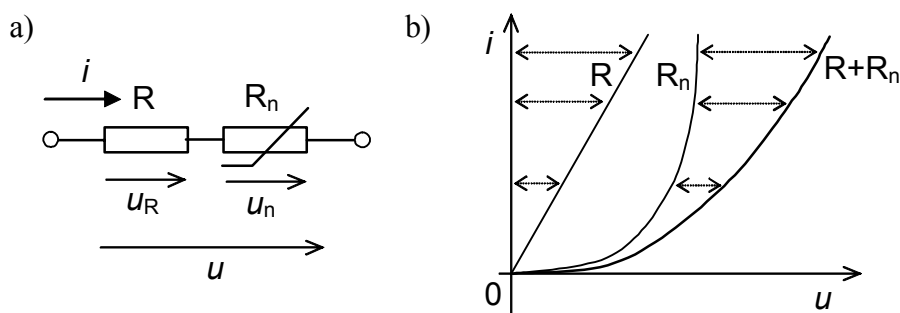


Obr. 7.1 Ampérvoltová charakteristika nelineárního prvku a její měření

Rovnice pro hledané obvodové veličiny sestavujeme při analýze nelineárních obvodů na základě Kirchhoffových zákonů. Vzhledem k nelineárním charakteristikám těchto prvků jsou i tyto rovnice nelineární. Jejich řešení (analytické nebo numerické) je matematicky náročnější než v případě obvodů lineárních. V praxi se proto často používají metody grafické, které jsou poměrně jednoduché a názorné, i když méně přesné.

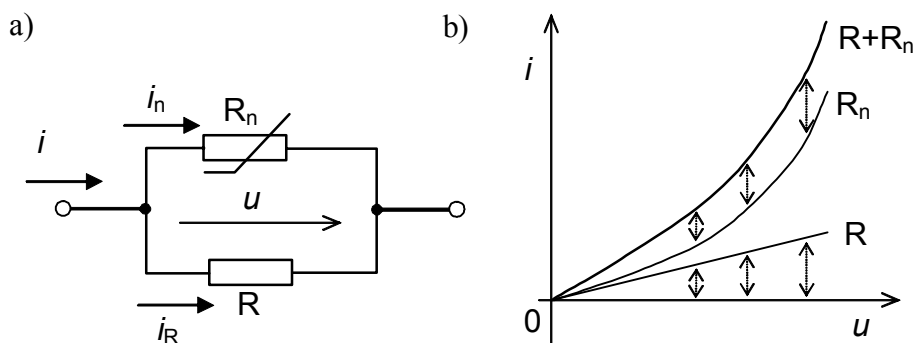
Při grafickém řešení je možné využít **metodu postupného zjednodušování** - výslednou charakteristiku nelineárního obvodu získáme grafickým součtem dílčích charakteristik jednotlivých prvků.

Při sériovém zapojení lineárního a nelineárního prvku podle Obr. 7.2a), kdy je proud oběma prvky shodný, je výsledná charakteristika dána součtem obou dílčích charakteristik pro $i = \text{konst.}$, jak je naznačeno na Obr. 7.2b).



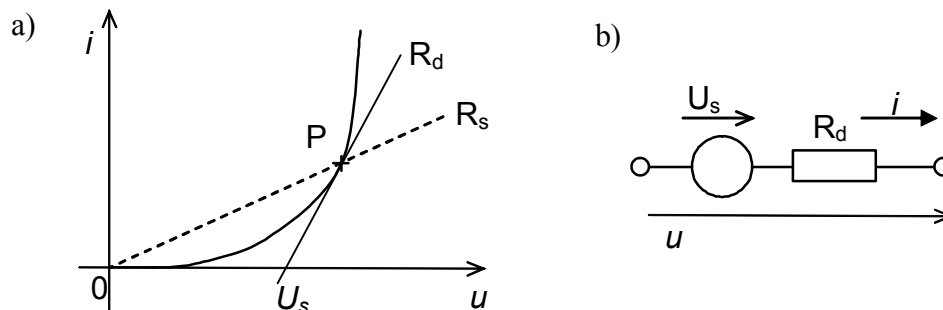
Obr. 7.2 Grafická konstrukce AV-charakteristiky sériově zapojených prvků

Při paralelním zapojení lineárního a nelineárního prvku podle Obr. 7.3a), kdy je na obou prvcích shodné napětí, je výsledná charakteristika dána součtem obou charakteristik pro $u = \text{konst.}$, jak je patrné z Obr. 7.3b).



Obr. 7.3 Grafická konstrukce AV-charakteristiky paralelně zapojených prvků

Často zjednodušujeme řešení nelineárních obvodů linearizací, která vychází z náhrady nelineární charakteristiky prvku lineárním modelem. Vytvoření *linearizovaného modelu* je znázorněno na Obr. 7.4. AV-charakteristika je aproximována tečnou v bodě P, čemuž odpovídá model z Obr. 7.4b). Taková náhrada je ovšem platná pouze pro malé signály, kdy se příliš nemění poloha pracovního bodu P daného prvku.

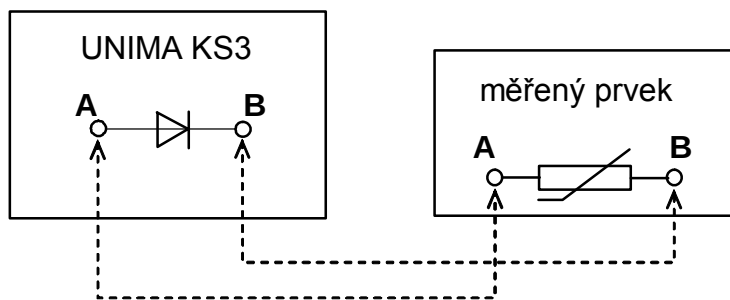


Obr. 7.4 Linearizovaný model nelineárního prvku platný pro okolí pracovního bodu P

7.4 Pracovní postup

Pro měření AV charakteristik podle Obr. 7.1 využijeme přístroj Unima, jehož [popis](#) je v úvodu skript.

- Zapněte počítač a univerzální měřicí přístroj UNIMA. Spustíte o bslužný program a zvolte režim měření charakteristik (**Char/Diode**).
- Nastavte rozsahy os grafu pro kladný i záporný směr:
 - $U_f = 2,1 \text{ V}$, $U_r = 2,1 \text{ V}$,
 - $I_f = 7 \text{ mA}$, $I_r = 7 \text{ mA}$.
- K příslušným svorkám, tak jak je naznačeno na Obr. 7.5, připojujte postupně zadané prvky (R a nelineární prvek 1 nebo nelineární prvek 2), změřte a do jednoho grafu zobrazte jejich AV-charakteristiky. Následně změřte i charakteristiky jejich sériového (Obr. 7.2a) a paralelního (Obr. 7.3a) zapojení. Dodržujte polaritu – svorky A, B podle obrázku.



Obr. 7.5 K měření AV-charakteristiky prvků

- Naměřené křivky popište (**F5**) a graf vytiskněte (**F10, Large copy, Only char**).
- Pro pracovní bod určený proudem i_P (zadá učitel) zjistěte odpovídající napětí u_P na všech zobrazených charakteristikách a zapište je do tabulky. Podobně zjistěte napětí a proudy bodů P_1 a P_2 v okolí pracovního bodu P pro všechny prvky; body P_1 a P_2 volte v blízkém okolí přibližně $\pm 5 \%$ od proudu v bodě P.

7.5 Zpracování

Vyhodnoťte statický R_s a dynamický R_d odpor prvků v určených pracovních bodech.

Tab. 7.1 Statický a dynamický odpor měřených prvků

Prvek			Rezistor		Nelineární prvek		Sériové spojení		Paralelní spojení	
i_P	mA	-								
u_P	mV	-								
R_s	k Ω	(7.2)								
Okolí P			P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2
i	mA	-								
u	mV	-								
R_d	k Ω	(7.3)								

7.6 Použité přístroje a přípravky

- Univerzální měřicí přístroj Unima KS3
- Panel s měřenými prvky

7.7 Závěr

Srovnajte hodnoty statického a dynamického odporu (Tab. 7.1). Uveďte náhradní linearizovaný model (Obr. 7.4) měřeného nelineárního prvku pro okolí pracovního bodu P.

7.8 Kontrolní příklady a otázky

7.8.1 Kontrolní příklad 7.1

V pracovním bodě prvku P (0,8 V; 1 mA) a jeho blízkém okolí určeném body P_1 (0,76 V; 1,5 mA) a P_2 (0,84 V; 1,5 mA) určete statický a dynamický odpor prvku. [Řešení](#)

7.8.2 Kontrolní otázka 7

Jaké je nejjednodušší náhradní schéma linearizovaného modelu nelineárního prvku (pro velmi malý posun pracovního bodu)? [Řešení](#)

7.9 Shrnutí

Elektrický obvod je nelineární, pokud obsahuje alespoň jeden nelineární prvek. V nelineárních obvodech neplatí princip superpozice. Vlastnosti nelineárního prvku vyjadřuje jeho charakteristika; pro rezistivní prvky je to VA nebo AV charakteristika, kterou často vyjadřujeme graficky. Z hlediska stejnosměrného proudu vystihuje chování prvku jeho statický odpor (poměr napětí a proudu v pracovním bodě $R_s = u(P)/i(P)$). Chování prvku při přivedení malého střídavého signálu vystihuje jeho dynamický odpor (tečna k charakteristice v pracovním bodě $R_d \cong \Delta u(P)/\Delta i(P)$). Nelineární obvody musíme řešit jinými metodami, než obvody lineární (metody grafické, numerické, analytické).

8 Přenos výkonu

8.1 Cíl úlohy

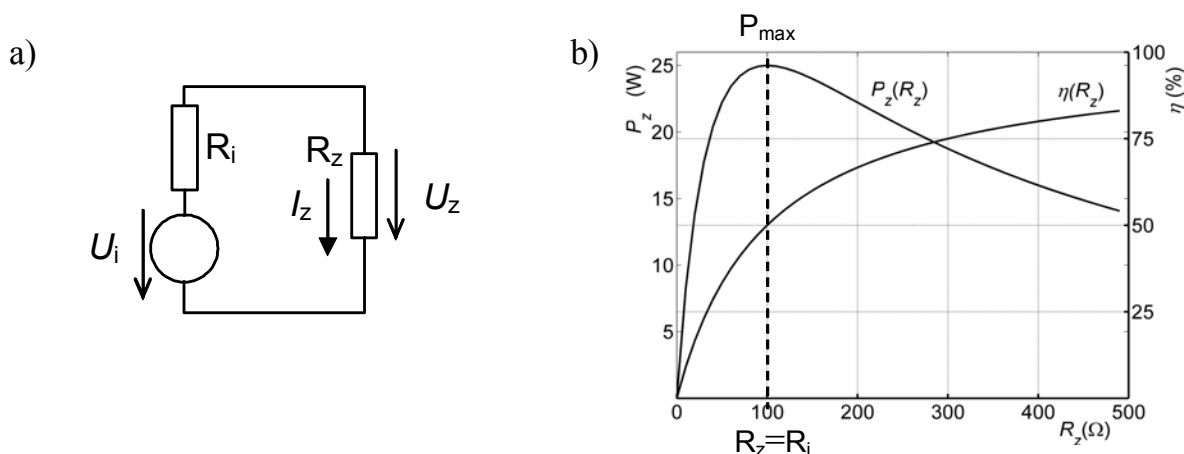
Experimentálně ověřit na daném obvodu problematiku přenosu výkonu a výkonového přizpůsobení.

8.2 Úkol

- Měřením stanovte přenášený výkon P_z reálného zdroje stejnosměrného napětí v závislosti na velikosti zatěžovacího odporu R_z . Měření proveďte nepřímou metodou.
- Na základě měření stanovte závislost účinnosti η při přenosu výkonu do R_z .
- Závislosti $P_z(R_z)$ a $\eta(R_z)$ vyneste ve vhodném měřítku do jednoho grafu a graficky určete velikost účinnosti η při maximálním přenosu výkonu $P_{\max}$.

8.3 Teoretický úvod

8.3.1 Výkon v elektrickém obvodu



Obr. 8.1 K přenosu výkonu: a) schéma obvodu, b) výkon na zátěži a účinnost přenosu jako funkce hodnoty R_z

Předpokládejme, že máme v elektrickém obvodu reálný zdroj elektrické energie s vnitřním napětím U_i a vnitřním odporem R_i , zátěž je tvořena rezistorem s odporem R_z podle Obr. 8.1a). Je zřejmé, že výkon P_z zátěže

$$P_z = U_z \cdot I_z, \quad (\text{W}) \quad (8.1)$$

kde U_z je napětí na zátěži a I_z proud zátěží.

Na Obr. 8.1b) je jako příklad pro zvolené parametry zdroje $U_i = 100 \text{ V}$, $R_i = 100 \Omega$ znázorněna závislost výkonu P_z na velikosti odporu zátěže R_z

$$P_z(R_z) = U_i^2 \frac{R_z}{(R_i + R_z)^2}. \quad (\text{W}) \quad (8.2)$$

Nalezením extrému funkce (8.2) zjistíme podmínku pro maximální přenos výkonu

$$R_z = R_i, \quad (\Omega) \quad (8.3)$$

což je vidět i z Obr. 8.1b). Tento stav nazýváme *výkonové přizpůsobení zátěže a zdroje*, velikost maximálního výkonu na zátěži $P_{\max}$ je

$$P_{\max} \Big|_{R_z=R_i} = \frac{U_i^2}{4R_i}. \quad (\text{W}) \quad (8.4)$$

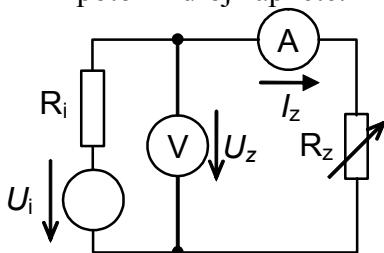
Jedním z parametrů charakterizujících přenos výkonu je účinnost. Účinnost η je definovaná jako procentuálně vyjádřený podíl výkonu na zátěži P_z k výkonu zdroje P_i

$$\eta = 100 \frac{P_z}{P_i} = 100 \frac{R_z}{R_i + R_z}. \quad (\%) \quad (8.5)$$

Z definice (8.5) je vidět, že účinnost při přenosu nezávisí na vnitřním napětí zdroje a její hodnota roste s rostoucí hodnotou R_z . Grafická závislost $\eta(P_z)$ je nakreslena na Obr. 8.1b). Při maximálním přenosu výkonu je účinnost přenosu 50 %.

8.4 Pracovní postup

- a) Sestavte zapojení podle schématu na Obr. 8.2, jako zátěž použijte odporovou dekádu XL6 s nastavenou hodnotou odporu 100 Ω . Zapište si vnitřní odpor zdroje R_i . Do obvodu zapojte analogový miliampérmetr a voltmetr. Zapojení nechejte zkontrolovat a potom zdroj zapněte.



Obr. 8.2 Měření přenášeného výkonu nepřímou metodou

- b) Změřte proud I_z a napětí U_z v obvodu postupně pro hodnoty zátěže $R_z = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,0; 1,1; 1,3; 1,5; 1,7; 1,9; 2,1 \text{ k}\Omega$, nastavované na odporové dekádě.

Poznámka: Zásady měření s analogovými přístroji najdete v úvodu těchto skript

- c) Naměřené hodnoty zapište do Tab. 8.1, počet řádků tabulky volte podle počtu zadaných hodnot R_z . Konstantu k měřicích přístrojů zapisujte ve tvaru zlomku (počet dílků stupnice).

8.5 Zpracování

- Vypočtete hodnoty výkonu na zátěži P_z .
- Určete účinnost přenosu výkonu η . Poznamenejme, že vztah (8.5) kvůli zjednodušení nerespektuje vliv měřicích přístrojů.

Tab. 8.1 Přenos výkonu a chyby měření pro zapojení VA

Poznámky $R_i = \dots\dots\dots \Omega$								
R_z	U_z			I_z			P_z	η
Ω	α_V	k_V	V	α_A	k_A	mA	mW	%
-	-	-	(A.1.1)	-	-	(A.1.1)	(8.1)	(8.5)

8.6 Použité přístroje a přípravky

- Stabilizovaný zdroj napětí typ:
- Panel s rezistorem $R_i = 1 \text{ k}\Omega$
- Voltmetr analogový typ:, v.č.:
- Miliampérmetr analogový typ:, v.č.:
- Odporová dekáda typ: XL6 v.č.:

8.7 Závěr

Do jednoho grafu vyneste ve vhodném měřítku závislosti $P_z(R_z)$ a $\eta(R_z)$ a z grafu určete maximální přenášený výkon $P_{\max}$ a velikost účinnosti η při maximálním přenosu výkonu. Porovnejte s teoretickými hodnotami uvedenými v úvodu.

8.8 Kontrolní příklady a otázky

8.8.1 Kontrolní příklad 8.1

Pro obvod z Obr. 8.1, ve kterém je $U_i = 24 \text{ V}$, $R_i = 2 \Omega$, vypočtete výkon zdroje, výkon dodaný do zátěže a účinnost při přenosu výkonu: a) pro zátěž $R_{z1} = 10 \Omega$, b) při výkonovém přizpůsobení zátěže ke zdroji. [Řešení](#)

8.9 Shrnutí

Účinnost při přenosu výkonu reálného zdroje stejnosměrného napětí nezávisí na vnitřním napětí zdroje. Hodnota účinnosti přenosu výkonu roste s rostoucí hodnotou rezistoru zátěže R_z . Při maximálním přenosu výkonu do zátěže je účinnost přenosu 50 %.

9 Magnetické pole ve vzduchové mezeře

9.1 Cíl úlohy

Zjistěte experimentálně u daného C-jádra závislost magnetické indukce B ve vzduchové mezeře na budicím proudu cívky.

9.2 Úkol

- Pomocí přípravku změřte závislost magnetické indukce B ve vzduchové mezeře C-jádra na budicím proudu cívky I_b .
- Proměřte průběh magnetické indukce v prostoru vzduchové mezery v závislosti na poloze snímací sondy.
- Pro hodnoty budicího proudu $I_b = 0,5 \text{ A}$ a 1 A vypočítejte velikost indukce B ve vzduchové mezeře magnetického obvodu, porovnejte vypočtené a naměřené hodnoty.

9.3 Teoretický úvod

Na Obr. 9.1a) je nakresleno jednoduché provedení magnetického obvodu. Obvod tvoří jádro ve tvaru toroidu vyrobeného z feromagnetického materiálu s vysokou permeabilitou μ , přerušené relativně malou vzduchovou mezerou délky l_v . Na jádře je navinuta cívka s N_z závitů. Cívka je zdrojem magnetického pole. Průchodem proudu I_b cívkou se v jádru a vzduchové mezeře vytvoří magnetický tok Φ . Indukční čáry mají tvar uzavřených křivek.

Úkolem je stanovit velikost indukce magnetického pole B ve vzduchové mezeře. Zanedbáme rozptylové toky a budeme předpokládat homogenní magnetické pole v magnetickém obvodu.

Celým magnetickým obvodem protéká konstantní *magnetický indukční tok* Φ , pro který v případě homogenního pole platí

$$\Phi = B \cdot S, \quad (\text{Wb}) \quad (9.1)$$

kde je B magnetická indukce v obvodu, (T)
 S průřez magnetického obvodu. (m²)

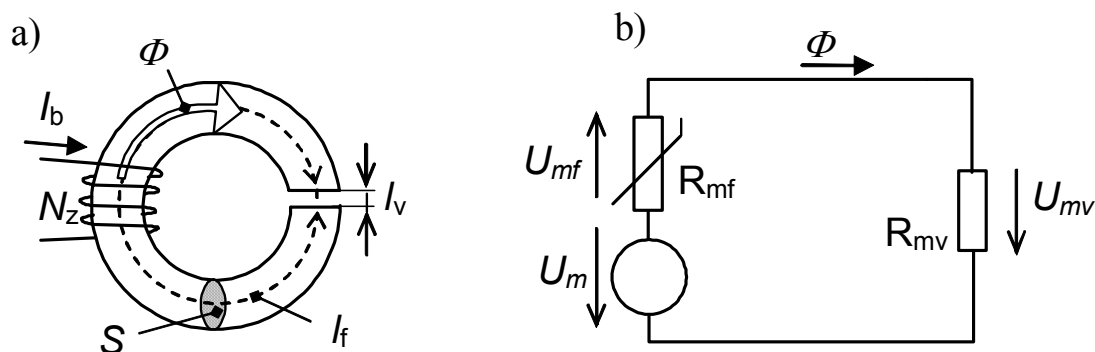
Protože indukční tok je konstantní po celé délce siločáry stejně jako průřez S , je podle (9.1) konstantní rovněž indukce B v celém obvodu Obr. 9.1a) a pro feromagnetikum a vzduchovou mezeru platí

$$B = \mu_f \cdot H_f = \mu_0 \cdot \mu_{rf} \cdot H_f = \mu_v \cdot H_v = \mu_0 \cdot \mu_{rv} \cdot H_v, \quad (\text{T}) \quad (9.2)$$

kde μ_f permeabilita feromagnetika, (H.m⁻¹)
 μ_{rf} relativní permeabilita feromagnetika, (-)
 μ_v permeabilita vzduchu, (H.m⁻¹)
 μ_{rv} relativní permeabilita vzduchu, $\mu_{rv} \cong 1$, (-)
 μ_0 permeabilita vakua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$. (H.m⁻¹)

Pro magnetický obvod z Obr. 9.1a) lze vytvořit ekvivalentní obvodový model - Obr. 9.1b), pro který formálně platí zákony známé z řešení elektrických obvodů. V původním obvodu jsou magnetické vlastnosti materiálu rozloženy podél celé délky siločáry, zatímco

v obvodovém modelu jsou soustředěny do magnetických odporů R_m (R_{mf} – magnetický odpor feromagnetika, R_{mv} – magnetický odpor vzduchu).



Obr. 9.1 Magnetický obvod a) a jemu ekvivalentní model b)

Zdrojem s magnetickým napětím U_m je v obvodu na Obr. 9.1b) cívka protékána proudem. Magnetické napětí zdroje U_m je rovno součtu úbytků magnetických napětí na magnetických odporech protékaných indukčním tokem Φ , proto platí

$$U_m = N_z \cdot I_b = U_{mf} + U_{mv} = H_f \cdot l_f + H_v \cdot l_v, \quad (\text{A}) \quad (9.3)$$

kde je l_f délka střední siločáry ve feromagnetiku, (m)
 l_v délka střední siločáry ve vzduchu, (m)
 H_f intenzita magnetického pole ve feromagnetiku, ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)
 H_v intenzita magnetického pole ve vzduchu. ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)

Mezi magnetickým tokem, napětím a odporem platí tzv. Hopkinsonův zákon

$$U_m = \Phi \cdot R_m, \quad R_m = R_{mf} + R_{mv} \quad (\text{A}), (\text{H}^{-1}) \quad (9.4a,b)$$

kde je U_m magnetické napětí zdroje, (A)
 Φ magnetický indukční tok, (Wb)
 R_m celkový magnetický odpor obvodu. (H^{-1})

Magnetický odpor feromagnetické a vzduchové části obvodu je

$$R_{mf}(I_b) = \frac{l_f}{\mu_0 \cdot \mu_{rf}(H_f) \cdot S}, \quad R_{mv} = \frac{l_v}{\mu_0 \cdot \mu_{rv} \cdot S}. \quad (\text{H}^{-1}) \quad (9.5a,b)$$

Feromagnetikum je nelineární magnetický materiál; jeho relativní permeabilita μ_{rf} je funkcí intenzity H_f . Proto ani jeho magnetický odpor není konstantní a mění se s intenzitou pole H_f , tedy i s budícím proudem I_b . Z tohoto důvodu je potřeba řešit magnetické obvody s feromagnetikem jako nelineární.

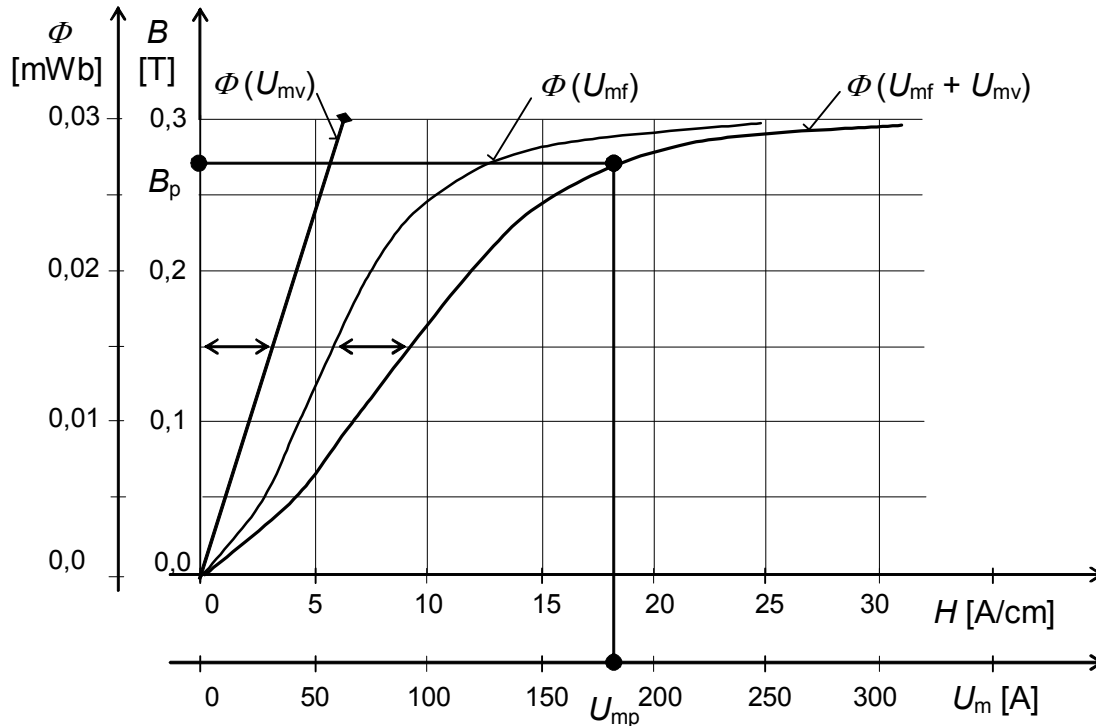
Charakteristika feromagnetických materiálů se udává často závislostí $B(H)$; buď graficky (tzv. magnetizační křivkou), nebo po přepočtení tabulkou hodnot $\mu_{rf}(I_b)$.

9.3.1.1 Vlastnosti feromagnetika zadané magnetizační křivkou

Z (9.5) je patrné, že zatímco magnetický odpor vzduchové mezery R_{mv} je konstantní a jeho velikost závisí pouze na délce a ploše vzduchové mezery, magnetický odpor feromagnetika R_{mf} závisí nelineárně na budícím proudu, protože μ_{rf} je funkcí proudu I_b . Dosazením (9.4) do (9.3) dostaneme

$$U_m = U_{mv} + U_{mf} = \Phi \cdot R_{mv} + \Phi \cdot R_{mf}(I_b). \quad (\text{A}) \quad (9.6)$$

Vzhledem k tomu, že magnetický tok je přímo úměrný indukci $\Phi = B \cdot S$ a magnetické napětí je přímo úměrné intenzitě $U_m = H \cdot l$, dostaneme graficky vyjádřenou závislost $\Phi(U_{mf})$ pouhou záměnou měřítek na odpovídajících osách magnetizační křivky $B(H)$ materiálu, do grafu dokreslíme závislost $\Phi(U_{mv})$ s využitím (9.4) a (9.5b). Grafickým součtem $\Phi(U_{mf})$ a $\Phi(U_{mv})$ podle (9.6) při konstantním magnetickém toku Φ dostaneme závislost $\Phi(U_m) \approx B(U_m)$. Z ní je možno pro zadanou hodnotu pracovního magnetického napětí budící cívky $U_{mp} = N_z \cdot I_b$ zjistit odpovídající velikost magnetické indukce B_p .



Obr. 9.2 Příklad ke grafickému řešení nelineárních magnetických obvodů, zde pro ferit FONOX N05

Příklad grafického řešení pro magnetický obvod z materiálu FONOX N05 je naznačen na Obr. 9.2. Magnetický obvod má tvar toroidu podle Obr. 9.1a), průřez $S = 10^{-4} \text{ m}^2$, délka vzduchové mezery $l_v = 0,25 \text{ mm}$ a délka střední siločáry $l_f + l_v = 0,1 \text{ m}$.

9.3.1.2 Vlastnosti feromagnetika zadané tabulkou $\mu_{rf}(I_b)$

Dosazením magnetických intenzit z (9.2) do (9.3) dostaneme pro magnetické napětí výraz

$$N_z \cdot I_b = \frac{B \cdot l_f}{\mu_{rf}(I_b) \cdot \mu_0} + \frac{B \cdot l_v}{\mu_{rv} \cdot \mu_0} = \frac{B}{\mu_0} \left(\frac{l_f}{\mu_{rf}(I_b)} + \frac{l_v}{\mu_{rv}} \right). \quad (\text{A}) \quad (9.7)$$

Jeho úpravou získáme výraz pro velikost indukce magnetického pole v obvodu

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N_z \cdot I_b}{\frac{l_f}{\mu_{rf}(I_b)} + \frac{l_v}{\mu_{rv}}}. \quad (\text{T}) \quad (9.8)$$

9.3.1.3 Zjednodušení výpočtu

Výpočet můžeme zjednodušit v případě, že nelineární magnetický odpor (9.5a) feromagnetické části obvodu je zanedbatelný oproti lineárnímu magnetickému odporu (9.5b) vzduchové mezery. Permeabilita feromagnetických materiálů je značně vyšší než permeabilita vzduchu $\mu_f \gg \mu_v$, proto při vzduchové mezeře dostatečně dlouhé vzhledem k délce celého magnetického obvodu platí

$$\frac{l_v}{\mu_{rv}} \gg \frac{l_f}{\mu_{rf}}, \quad \mu_{rv} \approx 1. \quad (m) \quad (9.9)$$

Pak lze (9.8) zjednodušit a pro magnetickou indukci dostaneme

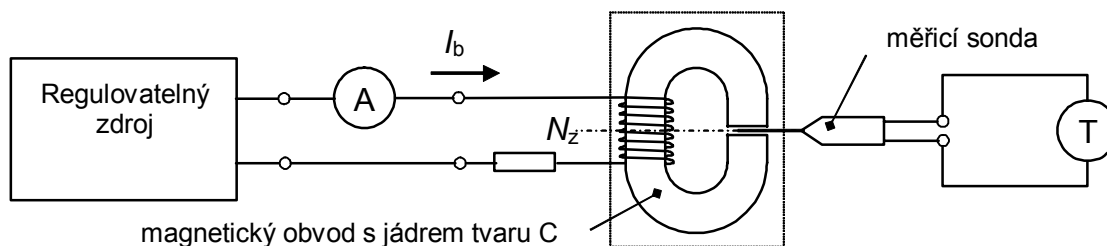
$$B' \approx \mu_0 \cdot \frac{N_z \cdot I_b}{l_v}. \quad (T) \quad (9.10)$$

V *linearizovaném magnetickém obvodu* nezávisí indukce na vlastnostech feromagnetika, pouze na délce vzduchové mezery a parametrech budicí cívky. Vidíme, že vložením dostatečné vzduchové mezery se magnetický obvod linearizuje.

9.4 Pracovní postup

Magnetický obvod podle Obr. 9.3 tvoří feromagnetické jádro tvaru C s navinutou budicí cívkou o N_z závitů. Magnetické pole ve vzduchové mezeře jádra se vybudí stejnosměrným elektrickým proudem I_b , který prochází vinutím cívky. Indukci v mezeře B měříme Teslametrem pomocí měřicí Hallovovy sondy, umístěné ve vzduchové mezeře.

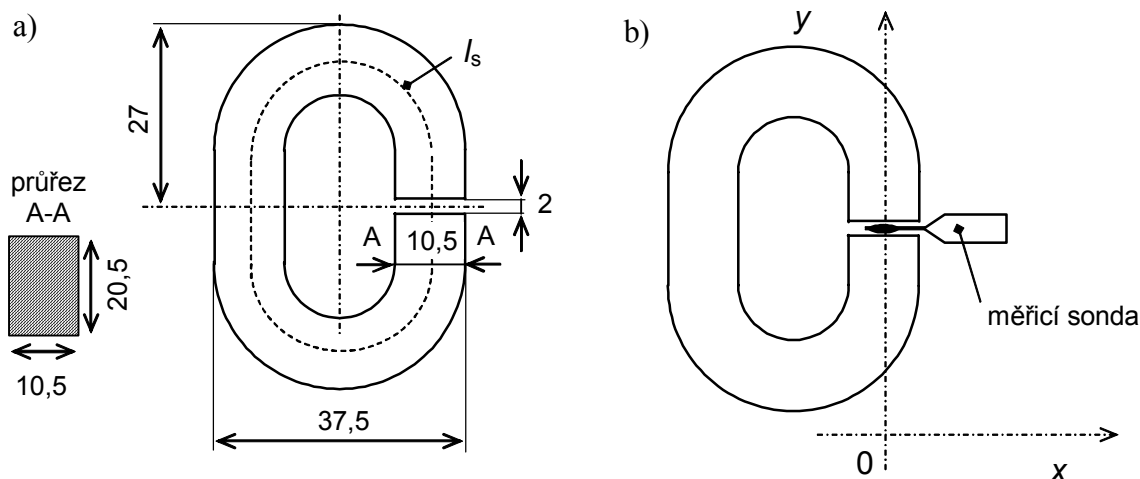
- Do Tab. 9.1 si zapište počet závitů N_z budicí cívky, který je uveden na přípravku. Dále si opište hodnoty relativní permeability feromagnetika z tabulky $\mu_{rf}(I_b)$ použitého materiálu jádra.
- Sondu Teslametru pro měření hodnoty indukce magnetického pole umístěte do středu vzduchové mezery (poloha $x = 0$). Hodnotu budicího proudu I_b nastavujte podle ampérmetru změnou velikosti výstupního napětí regulovatelného zdroje v rozsahu od 0 A do 1 A s krokem 0,1 A. Naměřenou velikost indukce B zapisujte do Tab. 9.1.
- Nastavte budicí proud I_b na učitelem zadanou hodnotu (zapište si ji) a posuvem sondy po 1 mm proměřte průběh magnetické indukce v celém průřezu vzduchové mezery a v jejím okolí. Hodnoty B zapisujte do Tab. 9.2.



Obr. 9.3 Zapojení úlohy pro měření magnetické indukce ve vzduchové mezeře magnetického obvodu

9.5 Zpracování

Skutečný geometrický tvar magnetického obvodu a jeho rozměry jsou uvedeny na Obr. 9.4a). Na Obr. 9.4b) je vyznačena poloha měřicí sondy v kartézské souřadnicové soustavě v rovině x - y ; v poloze 0 je Hallova sonda uprostřed vzduchové mezery.



Obr. 9.4 Feromagnetické jádro přípravku: a) geometrie a rozměry v mm, b) umístění měřicí sondy

Tab. 9.1 Závislost magnetické indukce na budicím proudu

I_b	A	-	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
μ_{ef}	-	-										
B	mT	-										
B_v	mT	(9.8)										
B_v'	mT	(9.10)										
Poznámka $N_z = \dots\dots\dots$												

- Pro zadané budicí proudy z Tab. 9.1 vypočtete podle (9.8) hodnotu B_v ; použijte náčrtek na Obr. 9.4 a tabulku hodnot $\mu_{\text{ef}}(I_b)$ použitého materiálu jádra (je k dispozici na pracovišti). Do vztahu dosazujte relativní permeabilitu podle budicího proudu.
- Pro linearizovaný obvod vypočtete podle (9.10) a запиšte do Tab. 9.1 hodnotu indukce B_v' .
- Závislost naměřené magnetické indukce na velikosti budicího proudu $B(I_b)$ z Tab. 9.2 vyneste do grafu. Do téhož grafu vyneste i vypočtené hodnoty indukce B_v a B_{vl} .
- Závislost magnetické indukce na poloze sondy $B(x)$ vyneste do dalšího grafu. Z něj zjistěte hodnotu indukce B_v pro $x = 5,25$ mm (kraj vzduchové mezery) a porovnejte ji s hodnotou pro $x = 0$.

Tab. 9.2 Závislost magnetické indukce na poloze sondy

x	mm	-3	-2	-1	0	2	4	6	8	10	11	12	13
B_v	mT												
Poznámka		Měřeno při $I_b = \dots\dots\dots$ A					$B_v(5.25\text{mm}) = \dots\dots\dots$ T				$B_v(0) = \dots\dots\dots$ T		

9.6 Použité přístroje a přípravky

- Stabilizovaný zdroj typ:
- Teslametr typ:
- Miliampérmetr typ:, v.č.:

9.7 Závěr

Z grafu porovnejte naměřený průběh závislosti magnetické indukce na budicím proudu $B(I_b)$ s průběhem B_v a B_{vl} . Podle velikosti hodnot B_v a B_{vl} stanovte, zda je možné měřený obvod považovat za lineární, tedy zda je vzduchová mezera dostatečná pro splnění podmínky (9.9).

Podle grafu $B(x)$ a hodnot B_v uprostřed a na kraji mezery zhodnoťte homogenitu magnetického pole ve vzduchové mezeře.

9.8 Kontrolní příklady a otázky

9.8.1 Kontrolní příklad 9.1

Pro magnetický obvod z Obr. 9.1, u kterého je délka vzduchové mezery $l_v = 1$ mm, průřez jádra $S = 1$ cm², počet závitů budicí cívky $N_z = 300$ závitů a budicí proud $I_B = 1$ A vypočítejte indukci B_v ve vzduchové mezeře. [Řešení](#)

9.8.2 Kontrolní otázka 9

Co způsobuje v magnetickém obvodu s feromagnetikem vzduchová mezera? [Řešení](#)

9.9 Shrnutí

Feromagnetikum je nelineární magnetický materiál; jeho relativní permeabilita μ_{rf} je funkcí intenzity H_f . Z tohoto důvodu je potřeba řešit magnetické obvody s feromagnetikem jako nelineární. Charakteristika feromagnetických materiálů se udává často závislostí $B(H)$ buď graficky (tzv. magnetizační křivkou), nebo tabulkou hodnot $\mu_{rf}(I_b)$.

Často můžeme výpočet zjednodušit, pokud je magnetický odpor feromagnetické části obvodu (nelineární) daleko menší než magnetický odpor vzduchové mezery (lineární). V takovém případě odpor feromagnetika zanedbáme a parametry tohoto *linearizovaného magnetického obvodu* závisí pouze na délce vzduchové mezery a parametrech budicí cívky.

10 Měření napětí neharmonických průběhů

10.1 Cíl úlohy

Cílem úlohy je ověřit platnost definičních vztahů pro výpočet střední aritmetické hodnoty a efektivní hodnoty měřeného napětí.

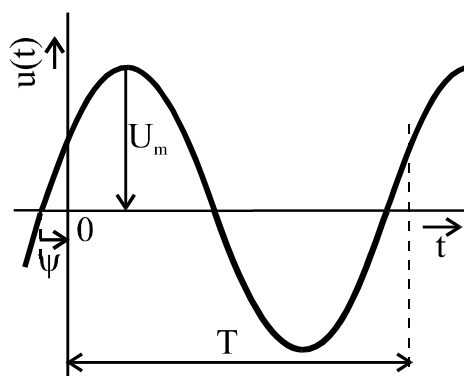
10.2 Úkol

- Experimentálně ověřit platnost definičního vztahu pro výpočet střední aritmetické hodnoty a efektivní hodnoty napětí trojúhelníkového a obdélníkového průběhu.
- Ověřit postup výpočtu efektivní hodnoty napětí vzniklého superpozicí stejnosměrné složky a harmonického napětí.

10.3 Teoretický úvod

Periodická obvodová veličina (napětí, proud) je popsána periodickou funkcí. Periodická funkce je plně určena svým průběhem v době jedné periody. Doba opakování periodické funkce se nazývá perioda a značí se T . Reciproká hodnota periody se nazývá kmitočet (frekvence) s jednotkou Hz a značí se f .

Zvláštním případem periodicky proměnné obvodové veličiny je harmonická obvodová veličina, jejíž časový průběh (okamžitou hodnotu) lze vyjádřit *harmonickou funkcí*, tj. funkcí sinus. Např. harmonické napětí (Obr. 10.1) je matematicky definováno



Obr. 10.1 Harmonické napětí

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi), \quad (\text{V}) \quad (10.1)$$

kde je U_m maximální hodnota dosažená v průběhu periody, nazývá se amplituda harmonického napětí.

ψ počáteční fáze harmonického napětí.

Průměrnou hodnotu funkce v daném časovém intervalu udává *střední hodnota* (časová střední hodnota) napětí nebo proudu. Tato střední hodnota se často označuje jako stejnosměrná složka periodického průběhu. Střední hodnota periodického napětí $u(t)$ je dána vztahem

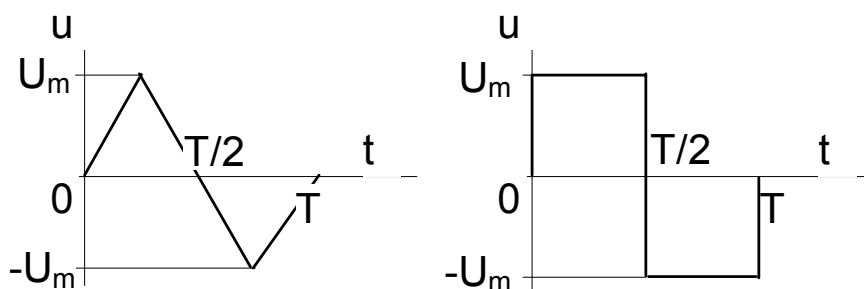
$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt. \quad (\text{V}) \quad (10.2)$$

Dále je definována *střední aritmetická hodnota* periodického průběhu. Definiční vztah je podobný vztahu (10.2) jen s tím rozdílem, že integrujeme absolutní hodnotu signálu

$$U_{sa} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt. \quad (\text{V}) \quad (10.3)$$

Jednou z nejdůležitějších charakteristických hodnot časového průběhu napětí je *efektivní hodnota*, neboť vyjadřuje jeho energetický obsah. Matematicky je efektivní hodnota napětí $u(t)$ definována vztahem

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} . \quad (V) \quad (10.4)$$



Obr. 10.2 Souměrný trojúhelníkový a obdélníkový průběh

Poměr mezi efektivní a střední aritmetickou hodnotou udává činitel tvaru

$$k_t = \frac{U}{U_{sa}} . \quad (-) \quad (10.5)$$

Činitel výkyvu udává poměr mezi amplitudou a efektivní hodnotou

$$k_v = \frac{U_m}{U} . \quad (-) \quad (10.6)$$

Zaměřme se na dva konkrétní průběhy napětí. Souměrný trojúhelníkový a obdélníkový průběh jsou zobrazeny na Obr. 10.2. Souměrný trojúhelníkový průběh má střední hodnotu rovnou nule. Střední aritmetická hodnota souměrného trojúhelníkového průběhu se vypočte

$$U_{sa} = \frac{1}{T} \left[\frac{U_m \frac{T}{2}}{2} + \frac{|-U_m| \frac{T}{2}}{2} \right] = \frac{U_m}{2} . \quad (V) \quad (10.7)$$

Efektivní hodnota souměrného trojúhelníkového průběhu se vypočte (s využitím symetrie signálu - počítáme pouze pro čtvrtinu periody)

$$U = \sqrt{\frac{4}{T} \int_0^{T/4} \left[\frac{4U_m}{T} t \right]^2 dt} = \sqrt{\frac{4}{T} \left[\frac{4U_m}{T} \right]^2 \int_0^{T/4} t^2 dt} = \dots = \frac{U_m}{\sqrt{3}} . \quad (V) \quad (10.8)$$

Činitel tvaru k_t a činitel výkyvu k_v pro souměrný trojúhelníkový průběh jsou

$$k_t = \frac{U}{U_{sa}} = \frac{\frac{U_m}{\sqrt{3}}}{\frac{U_m}{2}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \doteq 1,155, \quad k_v = \frac{U_m}{U} = \frac{U_m}{\frac{U_m}{\sqrt{3}}} = \sqrt{3} \doteq 1,732 \quad (-) \quad (10.9a,b)$$

Souměrný obdélníkový průběh má střední hodnotu rovnou nule. Podle vztahu (10.3) a z Obr. 10.2 plyne, že střední aritmetická hodnota souměrného obdélníkového průběhu je rovna hodnotě U_m .

Efektivní hodnota souměrného obdélníkového průběhu se vypočte (opět s využitím symetrie signálu)

$$U = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{T} U_m^2 \frac{T}{2}} = U_m. \quad (V) \quad (10.10)$$

Činitel tvaru k_t a činitel výkyvu k_v pro souměrný obdélníkový průběh jsou

$$k_t = \frac{U}{U_{sa}} = \frac{U_m}{U_m} = 1, \quad k_v = \frac{U_m}{U} = \frac{U_m}{U_m} = 1. \quad (-) \quad (10.11a,b)$$

Tab. 10.1 Činitelé tvaru a výkyvu základních časových průběhů

Činitel	Harmonický průběh	Trojúhelníkový průběh	Obdélníkový průběh
$k_t = \frac{U}{U_{sa}}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \doteq 1,111$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \doteq 1,155$	1
$k_v = \frac{U_m}{U}$	$\sqrt{2} \doteq 1,414$	$\sqrt{3} \doteq 1,732$	1

Přístroje pro měření efektivní hodnoty se dělí do dvou základních skupin.

Do první skupiny patří přístroje pro *přímé měření efektivní hodnoty*. Efektivní hodnotu měří přímo některé číslicové a analogové elektronické voltmetry (nesoucí často označení TRMS - True Root Mean Square, tedy tzv. skutečná efektivní hodnota).

Do druhé skupiny přístrojů pro měření efektivní hodnoty patří přístroje, které měří střední aritmetickou hodnotu, avšak jejich hodnota je vynásobena činitelem tvaru pro harmonický průběh $k_{th} = 1,111$ (kalibrací stupnice nebo nastavením zesílení elektronického převodníku). Obvodová realizace vztahu (10.3) je totiž jednodušší než realizace vztahu (10.4). Pokud takovým přístrojem měříme *neharmonickou veličinu*, můžeme správnou efektivní hodnotu určit vydělením údaje přístroje U_{mer} hodnotou činitele tvaru pro harmonický průběh $k_{th} = 1,111$ a vynásobením hodnotou činitele tvaru k_t pro měřený neharmonický průběh

$$U = U_{mer} \cdot \frac{k_t}{k_{th}}. \quad (V) \quad (10.12)$$

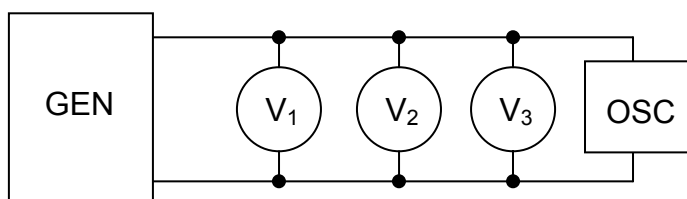
Značné chyby se můžeme dopustit, měříme-li efektivní hodnotu napětí s *nenulovou stejnosměrnou složkou* přístrojem, který má na vstupu zapojen oddělovací kondenzátor. Mezi takové přístroje patří převážná většina střídavých číslicových i analogových elektronických

voltmetrů. Správné určení efektivní hodnoty pak můžeme provést dvojím měřením: údaj střídavého voltmetru odpovídá pouze efektivní hodnotě střídavé složky $U_{\sim}$, stejnosměrnou složku U_0 změříme voltmetrem stejnosměrným. Výslednou efektivní hodnotu vypočteme v souladu se vztahem (10.4) podle vzorce

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_{\sim}^2} . \quad (V) \quad (10.13)$$

10.4 Postup měření

a) Zapojte přístroje podle schématu na Obr. 10.3 a zapněte je.



Obr. 10.3 Zapojení pracoviště pro měření napětí různých průběhů

Ve schématu jsou přístroje značeny:

- GEN funkční generátor typ 33120A, [popis](#) viz úvod skript,
- V_1 číslicový voltmetr s převodníkem efektivní hodnoty (TRMS),
- V_2 číslicový voltmetr s převodníkem střední aritmetické hodnoty,
- V_3 analogový voltmetr s usměrňovačem,
- OSC kontrolní osciloskop.

Na všech přístrojích nastavte správné rozsahy pro měření střídavého napětí ($V_{\sim}$) velikosti $U = 5\text{ V}$, tj. rozsahy nejbližší vyšší.

- b) Na funkčním generátoru nastavte frekvenci 50 Hz, přepněte do režimu harmonického napětí a nastavte amplitudu $U_m = 5\text{ V}$ (tzn. nastavte 10 V_{pp}), bez stejnosměrné složky (offset 0 V). Do Tab. 10.2 запиšte hodnoty napětí indikované voltmetry V_1 až V_3 . Zasynchronizujte osciloskop, aby zobrazoval měřený průběh napětí.
- c) Generátor přepněte postupně do režimů generace trojúhelníkového a obdélníkového napětí (symetrické průběhy bez stejnosměrné složky podle Obr. 10.2). Opět запиšte hodnoty napětí indikované voltmetry V_1 až V_3 do Tab. 10.2.
- d) Odpojte analogový voltmetr V_3 . Voltmetr V_1 bude měřit střídavé napětí ($V_{\sim}$), voltmetr V_2 přepněte na měření stejnosměrného napětí ($V_{=}$). Generátor přepněte do režimu harmonického napětí, nastavte amplitudu $U_m = 4\text{ V}$ a stejnosměrnou složku (offset) na $U_0 = 3\text{ V}$. Změřené hodnoty střídavé $U_{\sim}$ a stejnosměrné U_0 složky napětí запиšte do tabulky Tab. 10.3.

10.5 Zpracování naměřených hodnot

- a) V Tab. 10.2 vypočtete teoretické hodnoty efektivního napětí U_{vyp} . Dále u přístrojů V_2 a V_3 přepočítejte naměřenou hodnotu na efektivní pomocí (10.12).

- b) Pro harmonický signál s nenulovou stejnosměrnou složkou vypočtete pomocí (10.13) z naměřených hodnot efektivní hodnotu U_{mer} , dále určete teoretickou efektivní hodnotu U_{teor} .

Tab. 10.2 Měření napětí různých průběhů

Signál	k_t	k_v	U_{vyp}	$U_1 = U_{1\text{mer}}$	$U_{2\text{mer}}$	U_2	$U_{3\text{mer}}$	U_3
	-	-	V	V	V	V	V	V
	Tab. 10.1	Tab. 10.1		(10.12)	-	(10.12)	-	(10.12)
Harmonický	1,111	$\sqrt{2}$						
Trojúhelník	1,155	$\sqrt{3}$						
Obdélník	1	1						
Poznámka	$f = 50 \text{ Hz}$, $U_0 = 0 \text{ V}$, $U_m = 5 \text{ V}$							

Tab. 10.3 Měření harmonického napětí s nenulovou stejnosměrnou složkou

$U_{\sim} = U_{1\text{mer}}$	$U_0 = U_{2\text{mer}}$	U_{mer}	U_{teor}
V	V	V	V
-	-	(10.13)	(10.13)
Pozn.	$f = 50 \text{ Hz}$, $U_0 = 3 \text{ V}$, $U_m = 4 \text{ V}$		

10.6 Závěr

V závěru zhodnoťte, zda platí definiční vztahy pro výpočet střední aritmetické hodnoty a efektivní hodnoty měřeného napětí. Pomocí Tab. 10.3 porovnejte hodnotu efektivního napětí signálu s nenulovou stejnosměrnou složkou získanou měřením a výpočtem.

10.7 Shrnutí

Pokud nejsou měřicí přístroje označeny TRMS (přímé měření efektivní hodnoty), měří principiálně jinou charakteristickou hodnotu – nejčastěji střední aritmetickou hodnotu. Takové přístroje jsou kalibrovány pro měření harmonických napětí a proudů; pro měření neharmonických signálů lze provést přepočet indikované hodnoty, pokud známe hodnotou činitele tvaru k_t měřeného signálu.

Pro měření neharmonických napětí a proudů s neznámým činitelem tvaru je nutno použít přístroje s převodníkem efektivní hodnoty – TRMS.

11 Dodatky

11.1 Výsledky testů

Úloha 1

Kontrolní příklad 1.1:

$$I_i = \frac{U_i}{R_i} = \frac{25}{2} = 12,5 A \quad G_i = \frac{1}{R_i} = \frac{1}{2} = 0,5 S$$

Kontrolní příklad 1.2:

$$R_i = \frac{1}{G_i} = 1000 \Omega \quad U_i = R_i I_i = 250 V$$

Kontrolní otázka 1:

Náhradní schéma reálného zdroje napětí představuje sériové spojení ideálního zdroje napětí U_i a rezistoru R_i . Náhradní schéma reálného zdroje proudu představuje paralelní spojení ideálního zdroje proudu I_i vodivosti G_i .

Zdroj napětí a proudu jsou navzájem ekvivalentní platí-li: $I_i = \frac{U_i}{R_i}$, $G_i = \frac{1}{R_i}$.

Úloha 2

Kontrolní příklad 2.1:

Předpokládejme $I'_1 = 1 A$. Potom $U'_1 = R_1 \cdot I'_1 = 10 V$; $U'_1 = U'_2$; $I'_2 = U'_2 / R_2 = 1 A$;
 $I'_3 = I'_1 + I'_2 = 2 A$; $U'_3 = R_3 \cdot I'_3 = 10 V$; $U' = U'_2 + U'_3 = 20 V$; $I'_4 = U' / R_4 = 2 A$
 $I' = I'_4 + I'_3 = 4 A$; $k = U / U' = 2$;

Proto $U_1 = k \cdot U'_1 = 20 V$; $U_2 = U_1$; $I_1 = k I'_1 = 2 A$; *atd., tj.*
 $I_2 = 2 A$; $I_3 = 4 A$; $I_4 = 4 A$; $I = 8 A$; $U_3 = 20 V$;

Kontrolní otázka 2:

Metodu úměrných veličin je možné použít pouze pro analýzu lineárních obvodů. Vhodné je jí aplikovat v případech jednodušších obvodů s jedním zdrojem.

Úloha 3

Kontrolní příklad 3.1:

$$R_i = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + R_2 = 10 + 20 = 30 \Omega ; \quad (\text{pro } R_Z \rightarrow \infty) \quad U_i = U_{AB} = U \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 20 \text{ V}$$

$$I_{R_{Z1}} = \frac{U_i}{R_i + R_{Z1}} = \frac{20}{30 + 10} = 0,5 \text{ A} ; \quad I_{R_{Z2}} = \frac{U_i}{R_i + R_{Z2}} = \frac{20}{30 + 20} = 0,4 \text{ A}$$

Kontrolní příklad 3.2:

$$R_i = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 3,3 \Omega ; \quad U_i = U \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 26,6 \text{ V}$$

$$I_{R_{Z1}} = \frac{U_i}{R_i + R_{Z1}} = 2 \text{ A} ; \quad I_{R_{Z2}} = \frac{U_i}{R_i + R_{Z2}} = 1,1429 \text{ A}$$

Kontrolní otázka 3:

Metodu náhradního zdroje je možné použít v případě, že potřebujeme znát parametry pouze některé větve analyzovaného obvodu (napětí, proud, nebo výkon). Potom můžeme nahradit zbývající část obvodu (která musí být lineární) napěťovým zdrojem se sériovým vnitřním odporem R_i (Theveninova věta o náhradním zdroji) nebo proudovým zdrojem s paralelní vnitřní vodivostí G_i (Nortonova věta).

Úloha 4

Kontrolní příklad 4.1:

Maticový tvar rovnic pro uzly 1 a 2 viz vztah (4.2), po číselném dosazení

$$\begin{bmatrix} 0,1125 & -0,01 \\ -0,01 & 0,015 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{10} \\ U_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad \Delta = 0,1125 \cdot 0,015 - 0,01^2 = 1,5875 \cdot 10^{-3} \text{ S}^2$$

$$\Delta_1 = \begin{bmatrix} 2 & -0,01 \\ -1 & 0,015 \end{bmatrix} = 0,02 \text{ A.S}, \quad \Delta_2 = \begin{bmatrix} 0,1125 & 2 \\ -0,01 & -1 \end{bmatrix} = -0,0925 \text{ A.S},$$

$$U_{10} = \Delta_1 / \Delta = 12,5984 \text{ V} ; \quad U_{20} = \Delta_2 / \Delta = -58,2677 \text{ V} ; \quad U_{12} = U_{10} - U_{20} = 70,8661 \text{ V}.$$

Kontrolní příklad 4.2:

Maticový tvar rovnic :

$$\begin{bmatrix} G_1 + G_3 & -G_1 & -G_3 \\ -G_1 & G_1 + G_2 + G_4 & -G_2 \\ -G_3 & -G_2 & G_2 + G_3 + G_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{10} \\ U_{20} \\ U_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_Z \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

po číselném dosazení

$$\begin{bmatrix} 0,02 & -0,01 & -0,01 \\ -0,01 & 0,02 & -0,005 \\ -0,01 & -0,005 & 0,017 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{10} \\ U_{20} \\ U_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta = 1,6 \cdot 10^{-6}; \quad \Delta_1 = 6,3 \cdot 10^{-5}; \quad \Delta_2 = 4,4 \cdot 10^{-5}; \quad \Delta_3 = 5,0 \cdot 10^{-5}$$

$$U_{10} = \Delta_1 / \Delta = 39,375 \text{ V}; \quad U_{20} = \Delta_2 / \Delta = 27,500 \text{ V}; \quad U_{30} = \Delta_3 / \Delta = 31,250 \text{ V}.$$

$$U_{12} = U_{10} - U_{20} = 11,875 \text{ V}; \quad U_{13} = U_{10} - U_{30} = 8,125 \text{ V}; \quad U_{23} = U_{20} - U_{30} = -3,750 \text{ V}.$$

Kontrolní otázka 4:

Při analýze lineárních obvodů pomocí metody uzlových napětí předpokládáme budící zdroje proudu. Pokud se v obvodu vyskytují zdroje napětí, musíme je nahradit ekvivalentními zdroji proudu.

Úloha 5

Kontrolní příklad 5.1:

Maticový tvar rovnic pro smyčky 1 a 2 viz vztah (5.3), po číselném dosazení

$$\begin{bmatrix} 200 & -100 \\ -100 & 310 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25 \\ 20 \end{bmatrix}, \quad \Delta = 200 \cdot 310 - 100^2 = 52000 \Omega^2$$

$$\Delta_1 = \begin{bmatrix} 25 & -100 \\ 20 & 310 \end{bmatrix} = 9750 \Omega \cdot V, \quad \Delta_2 = \begin{bmatrix} 200 & 25 \\ -100 & 20 \end{bmatrix} = 6500 \Omega \cdot V$$

$$I_{S1} = \Delta_1 / \Delta = 0,1875 \text{ A}; \quad I_{S2} = \Delta_2 / \Delta = 0,125 \text{ A}; \quad I_{R3} = I_{S1} - I_{S2} = 0,0625 \text{ A}.$$

Kontrolní příklad 5.2:

Maticový tvar rovnic :

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_4 & -R_4 & -R_1 \\ -R_4 & R_2 + R_4 + R_5 & -R_2 \\ -R_1 & -R_2 & R_1 + R_2 + R_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_Z \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

po číselném dosazení

$$\begin{bmatrix} 300 & -200 & -100 \\ -200 & 900 & -200 \\ -100 & -200 & 400 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 200 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta = 63 \cdot 10^6; \quad \Delta_1 = 64 \cdot 10^6; \quad \Delta_2 = 20 \cdot 10^6; \quad \Delta_3 = 26 \cdot 10^6$$

$$I_{S1} = \Delta_1 / \Delta = 1,0159 \text{ A}; \quad I_{S2} = \Delta_2 / \Delta = 0,3175 \text{ A}; \quad I_{S3} = \Delta_3 / \Delta = 0,4127 \text{ A}.$$

$$I_{R1} = I_{S1} - I_{S3} = 0,6032 \text{ A}; \quad I_{R2} = I_{S2} - I_{S3} = -0,0952 \text{ A}; \quad I_{R4} = I_{S1} - I_{S2} = 0,6984 \text{ A}.$$

Kontrolní otázka 5:

Při analýze lineárních obvodů pomocí metody smyčkových proudů předpokládáme budící zdroje napětí. Pokud se v obvodu vyskytují zdroje proudu, musíme je nahradit ekvivalentními zdroji napětí.

Úloha 6**Kontrolní příklad 6.1:**

- a) Obvod se zdrojem U_{Z1} , zdroj U_{Z2} je vyřazen – nahrazen zkratem, řešíme metodou zjednodušování.

Proud ze zdroje do obvodu (ve směru I_{S1}) je $I'_1 = U_{Z1} / R'_{celk}$, $R'_{celk} = R_1 + R_3 \parallel [R_2 + R_i]$

$$R'_{celk} = R_1 + \frac{R_3(R_2 + R_i)}{R_3 + (R_2 + R_i)} = 30 \, \Omega ; I'_1 = U_{Z1} / R'_{celk} = 30 / 30 = 1,0 \, A$$

$$U'_{R3} = U_{Z1} - I'_1 \cdot R_1 = 10,0 \, V \quad (\text{ve směru } I_{S1})$$

- b) Obvod se zdrojem U_{Z2} , zdroj U_{Z1} je vyřazen – nahrazen zkratem, řešíme metodou zjednodušování.

Proud ze zdroje do obvodu (ve směru I_{S2}) je $I''_2 = U_{Z2} / R''_{celk}$, $R''_{celk} = R_i + R_2 + R_3 \parallel R_1$

$$R''_{celk} = R_i + R_2 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_3 + R_1} = 30,0 \, \Omega ; I''_2 = U_{Z2} / R''_{celk} = 60 / 30 = 2,0 \, A$$

$$U''_{R3} = U_{Z2} - I''_2 \cdot (R_i + R_2) = 20,0 \, V \quad (\text{ve směru } I_{S2})$$

$$U_{R3} = U'_{R3} - U''_{R3} = 10,0 - 20,0 = -10,0 \, V \quad (\text{vzhledem ke směru } I_{S1})$$

Kontrolní příklad 6.2:

- a) Obvod se zdrojem U_{Z1} , zdroj U_{Z2} je vyřazen – nahrazen zkratem, řešíme metodou zjednodušování.

Proud ze zdroje do obvodu $I'_1 = U_{Z1} / R'_{celk}$, $R'_{celk} = R_{i1} + R_1 \parallel [R_3 + (R_2 \parallel R_{i2})]$

$$R'_{celk} = R_{i1} + \frac{R_1 \left(R_3 + \frac{R_2 \cdot R_{i2}}{R_2 + R_{i2}} \right)}{R_1 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_{i2}}{R_2 + R_{i2}}} = 16,92308 \, \Omega ; I'_1 = U_{Z1} / R'_{celk} = 30 / 16,92308 = 1,7727 \, A$$

$$U'_{10} = U_{Z1} - I'_1 \cdot R_{i1} = 12,27 \, V$$

- b) Obvod se zdrojem U_{Z2} , zdroj U_{Z1} je vyřazen – nahrazen zkratem, řešíme metodou zjednodušování.

Proud ze zdroje do obvodu $I''_2 = U_{Z2} / R''_{celk}$, $R''_{celk} = R_{i2} + R_2 \parallel [R_3 + (R_1 \parallel R_{i1})]$

$$R''_{celk} = R_{i2} + \frac{R_2 \left(R_3 + \frac{R_1 \cdot R_{i1}}{R_1 + R_{i1}} \right)}{R_2 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_{i1}}{R_1 + R_{i1}}} = 9,1\bar{6} \, \Omega ; \quad I_2'' = U_{Z2} / R''_{celk} = 60 / 9,1\bar{6} = 6,54906 \, A$$

$$U_{20}'' = U_{Z2} - I_2'' \cdot R_{i2} = 27,25468 \, V$$

$$U_{10}'' = U_{20}'' \cdot \frac{\frac{R_1 \cdot R_{i1}}{R_1 + R_{i1}}}{R_3 + \frac{R_1 \cdot R_{i1}}{R_1 + R_{i1}}} = 5,4509 \, V , \quad U_{10} = U_{10}' + U_{10}'' = 12,2\bar{7} + 5,4509 = 17,7237 \, V$$

Kontrolní otázka 6:

Metodu superpozice je možné použít pouze v lineárních obvodech s více zdroji.

Úloha 7**Kontrolní příklad 7.1:**

$$R_s = \frac{u(P)}{i(P)} = \frac{0,8}{0,001} = 800 \, \Omega ; \quad R_d \cong \frac{\Delta u(P)}{\Delta i(P)} = \frac{0,84 - 0,76}{1,5 \cdot 10^{-3} - 0,7 \cdot 10^{-3}} = \frac{0,08}{0,8 \cdot 10^{-3}} = 100 \, \Omega$$

Kontrolní otázka 7:

Náhradní schéma linearizovaného modelu nelineárního prvku pro velmi malý posun pracovního bodu může být tvořeno sériovým spojením ideálního zdroje napětí U_0 a rezistoru R_d o hodnotě dynamického odporu prvku v okolí pracovního bodu. Při grafickém znázornění představuje tečnu v pracovním bodě VA charakteristiky prvku, napětí U_0 je průsečíkem této tečny s osou napětí.

Úloha 8**Kontrolní příklad 8.1:**

$$a) \quad I_Z = \frac{U_i}{R_i + R_Z} = \frac{24}{2 + 10} = 2 \, A ; \quad P_Z = R_Z \cdot I_Z^2 = 10 \cdot 2^2 = 40 \, W ;$$

$$P_i = \frac{U_i^2}{R_i + R_Z} = \frac{24^2}{2 + 10} = 48 \, W ; \quad \eta = \frac{P_Z}{P_i} = \frac{40}{48} = 0,8\bar{3} \, .$$

$$b) \quad R_Z = R_i = 2 \, \Omega$$

$$I_Z = \frac{U_i}{R_i + R_Z} = \frac{24}{2 + 2} = 6 \, A ; \quad P_Z = R_Z \cdot I_Z^2 = 2 \cdot 6^2 = 72 \, W ;$$

$$P_i = \frac{U_i^2}{R_i + R_Z} = \frac{24^2}{2 + 2} = 144 \, W ; \quad \eta = \frac{P_Z}{P_i} = \frac{72}{144} = 0,5 \, .$$

Úloha 9

Kontrolní příklad 9.1:

B_V vypočteme za předpokladu $\mu_{rv} \cong 1$ a $R_{mv} \gg R_{mf}$.

$$R_{mv} = \frac{l_v}{\mu_0 \mu_{rv} S} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-4}} = 7,95775 \cdot 10^6 \text{ (H}^{-1}\text{)} ;$$

$$\Phi = \frac{U_m}{R_{mv}} = \frac{N_Z \cdot I_b}{R_{mv}} = \frac{300 \cdot 1}{7,95775 \cdot 10^6} = 3,7699 \cdot 10^{-5} \text{ Wb}$$

$$B_V = \frac{\Phi}{S} = \frac{3,7699 \cdot 10^{-5}}{1 \cdot 10^{-4}} = 0,377 \text{ T} .$$

Kontrolní otázka 9:

Vzduchová mezera linearizuje magnetický obvod. Pokud je magnetický odpor vzduchové mezery podstatně větší než magnetický odpor feromagnetika, pak v tomto obvodu hodnota magnetického indukčního toku prakticky nezávisí na vlastnostech feromagnetika, ale pouze na parametrech vzduchové mezery a budicí cívky.

Seznam použité literatury

- [1] Valsa, J. - Sedláček, J.: Teoretická elektrotechnika I. Skriptum VUT Brno, 1997.
- [2] Gescheidtová, E. a kol.: Základní metody měření v elektrotechnice. Skriptum VUT Brno, 2000.
- [3] Brančík, L.: Elektrotechnika 1. Přednášky. Skriptum VUT Brno, 2003.
- [4] Sedláček, J. – Steinbauer, M. – Zapletal, Z.: Elektrotechnika 1. laboratorní cvičení, počítačová cvičení. Skriptum VUT Brno, 2003.
- [5] Škrášek, J. - Tichý, Z.: Základy aplikované matematiky III. SNTL Praha, 1990.