FYZIKÁLNÍ SEKCE

Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity v Brně

KORESPONDENČNÍ SEMINÁŘ Z FYZIKY

4. ročník — 1997/1998

Vzorová řešení 4. série úloh

(25 bodů)

Vzorové řešení úlohy č.1 (6 bodů)

Připojíme-li uzly A a D sítě z Obr. 1 mezi póly zdroje elektromotorického napětí, bude úbytek napětí mezi body A a F roven úbytku napětí mezi body A a B, jak je vidět ze symetrie sítě. Bude tedy

$$U_{AB} = U_{AF}, \tag{1}$$

a můžeme proto rozpojit uzel S a vypustit větev spojující body B a F. Obdobně bude roven úbytek napětí mezi body A, E úbytku mezi A a C.

$$U_{AC} = U_{AE} \tag{2}$$

Proto vypouštíme větev spojující body C a E. Upravené schéma překreslené do pravoúhlého tvaru viz Obr.1.1. Označme R_1, R_2 a R_3 odpory tří paralelních větví. Platí:

$$\frac{1}{R_{EF}} = \frac{1}{R_{BC}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{2R} = \frac{3}{2R} \tag{3}$$

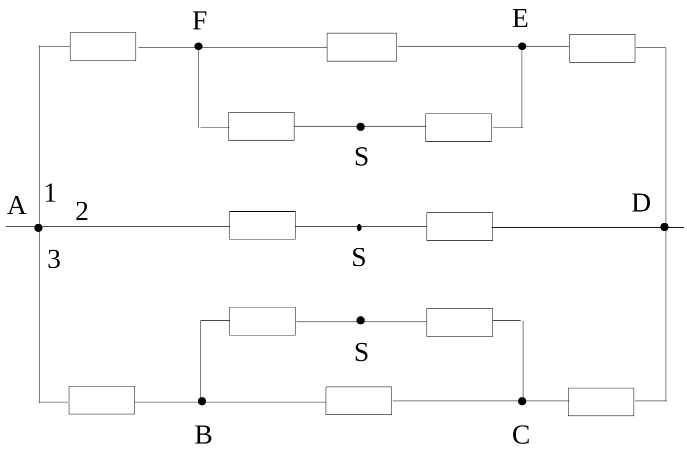
$$R_1 = R_3 = 2R + \frac{2}{3}R = \frac{8}{3}R \tag{4}$$

$$R_2 = 2R \tag{5}$$

Pro odpor R_{AD} platí:

$$\frac{1}{R_{AD}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{6}{8R} + \frac{1}{2R} = \frac{5}{4R} \tag{6}$$

$$R_{AD} = \frac{4}{5}R = 0.80 \quad \Omega \tag{7}$$



Obr.1.1

Po připojení pólů zdroje elektromotorického napětí k uzlům A a C bude platit:

$$U_{AB} = U_{AS} = U_{AE} \tag{8}$$

Vypustíme proto větve spojující body B a S a body S a E. Tři větve paralelně zapojené k uzlům A, C jsou zakresleny ve schématu Obr.1.2. Pro odpory jednotlivých větví dostáváme:

$$\frac{1}{R_{DF}} = \frac{1}{2R} + \frac{1}{2R} = \frac{1}{R} \tag{9}$$

$$R_1 = R + 2R = 3R \tag{10}$$

$$R_2 = R_3 = 2R \tag{11}$$

$$\frac{1}{R_{AC}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{3R} + \frac{2}{2R} = \frac{4}{3R} \tag{12}$$

$$R_{AC} = \frac{3}{4}R = 0.75 \quad \Omega \tag{13}$$

Při náhradě sítě rezistorem mezi uzly A a B rozpojíme uzel S. Vzniknou tak tři větve zapojené paralelně mezi uzly A a B (viz Obr.1.3).

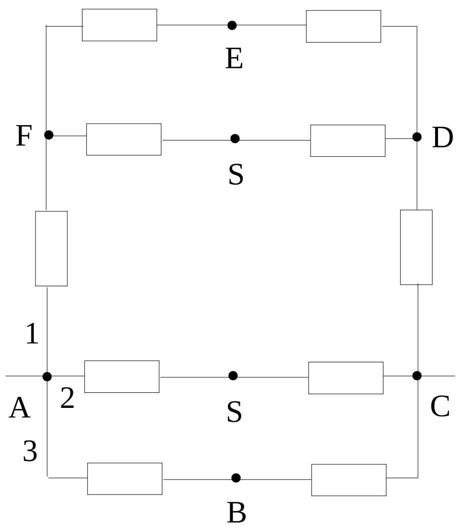
$$\frac{1}{R_{DE}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{2R} = \frac{3}{2R} \tag{14}$$

$$\frac{1}{R_{CF}} = \frac{1}{2R + \frac{2}{3}R} + \frac{1}{2R} = \frac{7}{8R} \tag{15}$$

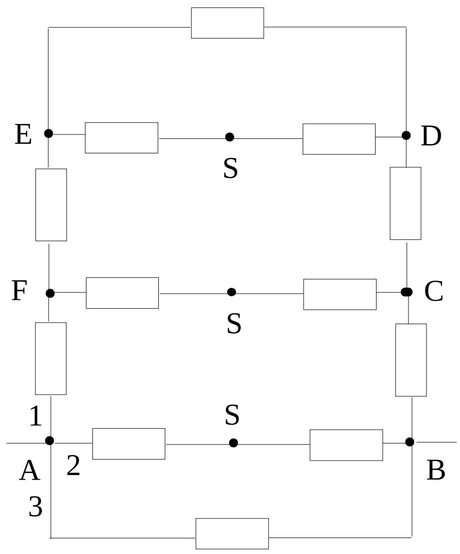
$$R_1 = 2R + \frac{8}{7}R = \frac{22}{7}R, \quad R_2 = 2R, \quad R_3 = R \tag{16}$$

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{7}{22R} + \frac{1}{2R} + \frac{1}{R} = \frac{20}{11R} \tag{17}$$

$$R_{AB} = \frac{11}{20}R = 0.55 \quad \Omega \tag{18}$$



Obr.1.2



Obr.1.3

Vzorové řešení úlohy č.2 (8 bodů)

a) Maximální počet rovnic, které pro tuto síť můžeme získat využitím Kirchhoffových zákonů je 57. Z toho 7 rovnic představuje zápis I. a 50 rovnic zápis II. Kirchhoffova zákona.

b) Pro řešení sítě je obecně potřeba minimálně stejný počet rovnic jako je neznámých proudů v jednotlivých větvích tj. 13. Z tohoto počtu představuje 6 rovnic zápis I. a 7 rovnic zápis II. Kirchhoffova zákona.

c) Počet nezávislých obvodů je $(p - q) = 7$, kde $p = 13$ je počet větví sítě a $q + 1 = 7$ je počet uzlů v síti. Jeden úplný strom sítě je zobrazen na obr. 2.2. Existuje více možností.

d) Označení proudů v jednotlivých větvích je vyznačeno na obr. 2.1.

Obr. 2.1

Obr. 2.2

Podle I. Kirchhoffova zákona můžeme pro jednotlivé uzly napsat rovnice:
uzel
A: $i_1 + i_7 - i_{12} - i_{13} = 0$
B: $i_2 + i_8 - i_7 = 0$
C: $i_3 + i_9 - i_8 + i_{13} = 0$
D: $i_4 + i_{10} - i_9 = 0$
E: $i_5 + i_{11} - i_{10} = 0$
F: $i_6 + i_{12} - i_{11} = 0$

Podle II. Kirchhoffova zákona sestavíme pro jednotlivé obvody tyto rovnice:
obvod
ABS: $R \cdot i_7 + R \cdot i_2 - R \cdot i_1 = 0$
BCS: $R \cdot i_8 + R \cdot i_3 - R \cdot i_2 = 0$
CDS: $R \cdot i_9 + R \cdot i_4 - R \cdot i_3 = 0$
DES: $R \cdot i_{10} + R \cdot i_5 - R \cdot i_4 = 0$
EFS: $R \cdot i_{11} + R \cdot i_6 - R \cdot i_5 = 0$
FAS: $R \cdot i_{12} + R \cdot i_1 - R \cdot i_6 = 0$
ACB: $R \cdot i_7 + R \cdot i_8 - E = 0$

Využitím symetrie sítě můžeme soustavu rovnic zjednodušit. Uzly **B**, **S** a **E** mají stejný potenciál, proto mezi nimi neteče proud a tedy $i_2 = i_5 = 0$. Potom platí, že hodnoty proudu i_7 a i_8 jsou si rovny, stejně tak hodnoty proudu i_{11} a i_{10}. Dále můžeme psát $i_3 = -i_1$, $i_6 = -i_4$. Dosazením těchto vztahů zredukujeme soustavu třinácti rovnic na soustavu šesti rovnic:

$i_1 + i_7 - i_9 - i_{13} = 0$
$i_4 - i_9 + i_{10} = 0$
$R \cdot i_1 - R \cdot i_7 = 0$
$R \cdot i_4 - R \cdot i_{10} = 0$
$R \cdot i_1 + R \cdot i_4 + R \cdot i_9 = 0$
$2 \cdot R \cdot i_7 - E = 0$

Vyřešením této soustavy dostaneme vztahy pro výpočet proudu tekoucího zdrojem

$$i_{13} = \frac{4 \cdot E}{3 \cdot R}$$

a odpor

$$R_{AC} = \frac{3 \cdot R}{4}.$$

Vzorové řešení úlohy č.3 (5 bodů)

Velikost proudu ve všech větvích sítě vypočítáme dosazením konkrétní hodnoty elektromotorického napětí $E = 3V$ do soustavy rovnic, kterou jsme odvodili v předešlé úloze. Stejné zůstane i číslování proudů. Pro zjednodušení si můžeme soustavu rovnic přepsat do maticového zápisu.

	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	i_8	i_9	i_{10}	i_{11}	i_{12}	i_{13}	P
1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	-1	0
2	0	1	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	1	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	1	0	0
7	-1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	-1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	-1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
11	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
12	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	0
13	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	3

Velikosti proudu získáme diagonalizací matice.

	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	i_8	i_9	i_{10}	i_{11}	i_{12}	i_{13}	P
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.5
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.5
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0.5
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1.5
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1.5
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0.5
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0.5
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4

Pokud vyšla velikost proudu záporně, znamená to, že teče opačným směrem než jsme si na počátku zvolili.

Vzorové řešení úlohy č.4 (6 bodů)

a) Počet neznámých proudů p je roven celkovému počtu větví p v obvodu. V tomto případě je $p = 7$, to znamená, že pro výpočet proudů budeme potřebovat 7 nezávislých rovnic.

Má-li síť $(q + 1)$ uzlů, pak počet rovnic vyjadřujících I. Kirchhoffův zákon je roven q. V obvodu existují 4 uzly A, C, D a F, proto I. Kirchhoffův zákon bude vyjádřen třemi rovnicemi $(q = 3)$.

b) Úplný strom sestrojíme tak, že spojíme každý uzel s každým za použití minimálního počtu větví. Náš obvod má celkem čtyři uzly, takže minimální počet větví, kterými je můžeme spojit, je roven třem. Dvě z možností volby úplného stromu jsou na obr. 3.2 a obr. 3.3.

Počet nezávislých obvodů je dán rozdílem $(p - q)$, kde p je celkový počet větví v obvodu a q je počet uzlů v obvodu zmenšený o jedničku. V tomto případě $p = 7$, $q = 3$, tedy počet nezávislých obvodů je $(p - q) = 4$.

c) Nejdříve v obvodu vyznačíme proudy v jednotlivých větvích, přičemž volba směru toku proudu je libovolná. Jedna z možných voleb je vyznačena na obr. 3.1. Při sestavování rovnic respektujeme tato pravidla : Pro zápis I. Kirchhoffova zákona platí, že proud, který do uzlu vtéká, zapisujeme se záporným, a proud, který z uzlu vytéká, s kladným znaménkem. Pro zápis II. Kirchhoffova zákona platí, že pokud procházíme obvodem ve směru proudu, je úbytek napětí na rezistoru záporný, procházíme-li zdrojem napětí od záporného pólu ke kladnému, je napětí kladné.

Nyní můžeme sestavit rovnice. Pro síť na obr. 3.1 je potřeba vyřešit sedm nezávislých rovnic, z nichž tři jsou vyjádřením I. Kirchhoffova zákona pro uzly a čtyři vyjádřením II. Kirchhoffova zákona pro nezávislé obvody, které volíme podle úplného stromu na obr. 3.2.

I. Kirchhoffův zákon pro uzly:

$$\begin{array}{rrrrrrrrl} A: & I_1 & + & I_2 & + & I_6 & - & I_7 & = 0 \\ F: & -I_2 & + & I_3 & + & I_4 & & & = 0 \\ D: & -I_3 & - & I_4 & + & I_5 & & & = 0 \end{array}$$

II. Kirchhoffův zákon pro nezávislé obvody:

$$\begin{array}{rrrrrrrrl} ACDF: & -2I_1 & + & I_2 & + & 2I_3 & + & I_5 & = 0 \\ ABC: & 2I_1 & - & 2I_6 & & & & & = 0 \\ FDE: & -2I_3 & + & 2I_4 & & & & & = 0 \\ AC zdroj: & 2I_1 & & & & & & & = 3 \end{array}$$

Maticový zápis rovnic :

	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	P
1	1	1	0	0	0	1	−1	0
2	0	−1	1	1	0	0	0	0
3	0	0	−1	−1	1	0	0	0
4	−2	1	2	0	1	0	0	0
5	2	0	0	0	0	−2	0	0
6	0	0	−2	2	0	0	0	0
7	2	0	0	0	0	0	0	3

Výsledné hodnoty proudů:

$I_1 = 3/2\ A$ $I_5 = 1.0\ A$
$I_2 = 1.0\ A$ $I_6 = 3/2\ A$
$I_3 = 1/2\ A$ $I_7 = 4.0\ A$
$I_4 = 1/2\ A$

d) Pro odpor upravené sítě mezi uzly A a C platí : $R_{AC} = E/I_7$. Po dosazení obdržíme výsledek $R_{AC} = 0.75\ \Omega$.

e) Odpory R_{AC} určené podle úloh 1)a, 2)d a 4)d mají stejnou hodnotu odporu : $R_{AC} = 0.75\ \Omega$ (výsledek úlohy 1)a), $R_{AC} = E/i_13 = 0.75\ \Omega$ (výsledek úlohy 2)d) a $R_{AC} = E/I_7 = 0.75\ \Omega$ (výsledek úlohy 4)d).

f) Proudy jak v neupravené síti na obr.2, tak v upravené síti na obr.3.1 musí být mezi shodnými dvojicemi uzlů stejné. Proto můžeme proudy vyjádřit těmito vztahy (v závorce je pak označení příslušné větve) :

$$
\begin{array}{lcrcrcl}
I_1(AS_3C) & = & i_1(AS) & = & -i_3(CS) & = & 3/2\ A \\
I_2(AF) & = & -i_{12}(AF) & & & = & 1.0\ A \\
I_3(FS_2D) & = & i_6(FS) & = & -i_4(DS) & = & 1/2\ A \\
I_4(FED) & = & -i_{11}(EF) & = & -i_{10}(DE) & = & 1/2\ A \\
I_5(DC) & = & -i_9(CD) & & & = & 1.0\ A \\
I_6(ABC) & = & i_7(AB) & = & i_8(BC) & = & 3/2\ A \\
I_7(AC) & = & i_{13}(AC) & & & = & 4.0\ A \\
0 & = & i_2(BS) & = & i_5(ES) & &
\end{array}
$$

Při porovnání číselných hodnot zjistíme, že uvedené vztahy platí.

g) Při úpravě sítě v úloze č.1 byly vypuštěny větve mezi uzly E, S a B, S. Aby tato úprava byla oprávněná, musí být potenciálový rozdíl mezi těmito uzly nulový, to znamená $U_{ES} = U_{BS} = 0$.

Potenciálový rozdíl U_{ES}, resp. U_{BS} je dán rozdílem potenciálů φ_E a φ_S, resp. φ_B a φ_S, na jednotlivých uzlech. Vztah mezi jednotlivými potenciály vyjádříme pomocí II. Kirchhoffova zákona takto :

$U_{ES} = \varphi_E - \varphi_S$

$$
\begin{array}{lcl}
\varphi_E - i_5 = \varphi_S & \Rightarrow & \varphi_E - \varphi_S = i_5 = 0 \\
\varphi_E - i_{11} - i_6 = \varphi_S & \Rightarrow & \varphi_E - \varphi_S = i_6 + i_{11} = 1/2 - 1/2 = 0
\end{array}
$$

$U_{BS} = \varphi_B - \varphi_S$

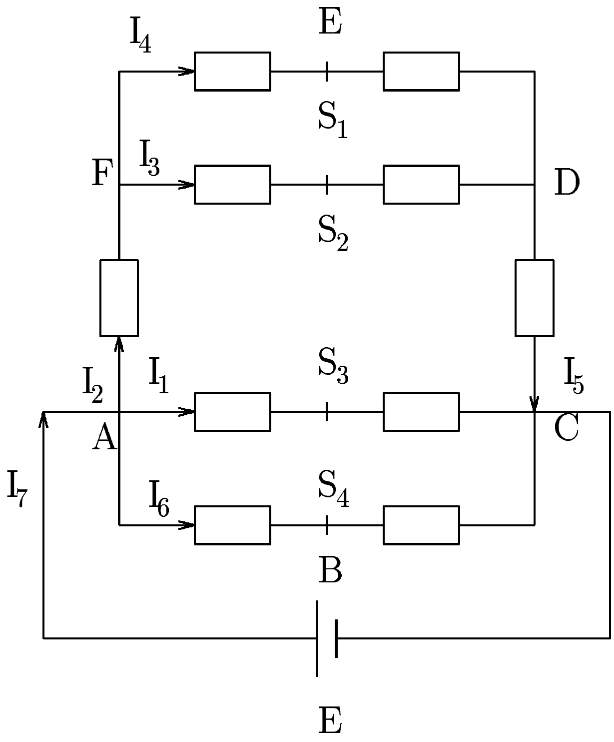
$$
\begin{array}{lcl}
\varphi_B - i_2 = \varphi_S & \Rightarrow & \varphi_B - \varphi_S = i_2 = 0 \\
\varphi_B + i_7 - i_1 = \varphi_S & \Rightarrow & \varphi_B - \varphi_S = i_1 - i_7 = 3/2 - 3/2 = 0
\end{array}
$$

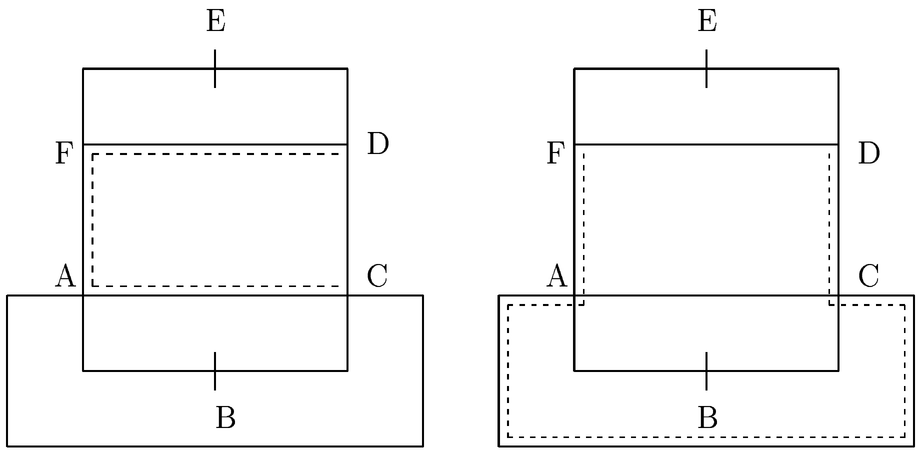
Možností, jak vyjádřit vztah mezi jednotlivými potenciály, je několik, dva způsoby bereme obvykle pro kontrolu správnosti výsledku. Po dosazení číselných hodnot proudů zjistíme, že dané potenciálové rozdíly jsou skutečně nulové.

V síti podle úlohy č.2 byl rozpojen uzel S v neupravené síti a vznikly body S_2 a S_3 v upravené síti. Aby tato úprava byla oprávněná, musí být mezi body S_2 a S_3 nulový potenciálový rozdíl. Ten opět určíme z II. Kirchhoffova zákona :

$\varphi_{S2} + I_3 + I_2 - I_1 = \varphi_{S3} \quad \Rightarrow \quad \varphi_{S2} - \varphi_{S3} = I_1 - I_2 + I_3$

Po vyčíslení $\varphi_{S2} - \varphi_{S3} = 0$.





Vzorové řešení úlohy č.5 - prémiová

a) Kirchhoffovy zákony platí i v obvodech s nelineárními prvky. Je to proto, že se při konstantním napětí nelinearita neprojevuje a daný prvek můžeme pro určité napětí nahradit prvkem lineárním s odporem stejným, jaký má v daném okamžiku nahrazený nelineární prvek.

Platnost Kirchhoffových zákonů můžeme také potvrdit, uvědomíme–li si, že první z nich vyjadřuje zákon zachování náboje a druhý zákon zachování energie u stacionárních a kvazistacionárních proudů.

b) Viz zadání obr.3.

c) Pro všechna řešení je třeba nejdříve vypočítat hodnotu napětí

$$U_t = \frac{k_B T}{e_0}$$

Při teplotě $T = 300K$ je tato hodnota rovna $U_T = 0,025861V$

Grafické řešení: Nakreslíme voltampérovou charakteristiku diody a graf zatěžovací charakteristiky zdroje. Zvolíme $I_0 = 5.10^{-7}A$ a výsledné hodnoty proudu I_{d1} a U_{d1} nalezneme v průsečíku grafů (viz obr. 5.1). Jejich hodnoty jsou

$$I_{d1} = 3.45A$$

$$U_{d1} = 0.41V$$

Řešení pomocí lineární aproximace exponenciální funkce: Zapíšeme rovnici zatěžovací charakteristiky zdroje (II.Kirchhoffův zákon)

$$\varepsilon - IR_{AC} - U = 0$$

a voltampérovou charakteristiku diody

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

Tuto rovnici zjednodušíme pomocí lineární aproximace

$$e^{\frac{U}{U_T}} \doteq e^{\frac{U_S}{U_T}} \left(1 + \frac{U - U_S}{U_T} \right);$$

kde U_S je napětí velmi blízké hledané hodnotě a tedy

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U_S}{U_T}} - 1 \right) + \frac{I_0}{U_T} (U - U_S)\, e^{\frac{U_S}{U_T}} = I_S + \frac{I_0}{U_T} e^{\frac{U_S}{U_T}} (U - U_S)$$

kde

$$I_S = I_0 \left(e^{\frac{U_S}{U_T}} - 1 \right)$$

Dosadíme zpět do zátěžové charakteristiky zdroje a získáme lineární algebraickou rovnici.

$$\varepsilon - I_S R_{AC} - \frac{I_0}{U_T} e^{\frac{U_S}{U_T}} (U - U_S)\, R_{AC} - U = 0$$

Vyjádříme si hledané napětí

$$U = \frac{\varepsilon - I_S R_{AC} + \frac{I_0}{U_T} e^{\frac{U_S}{U_T}} R_{AC} U_S}{1 + \frac{I_0}{R_{AC}} e^{\frac{U_S}{U_T}}}$$

Dosadíme si potřebné hodnoty

$$\varepsilon = 3.0V$$

$$R_{AC} = 0.75\Omega$$

$$U_T = 0.025861V$$

$$I_0 = 5.10^{-7}A$$

a hodnoty I_S a U_S převezmeme z grafického řešení

$$I_S = 3.4A$$

$$U_S = 0.4V.$$

Výpočtem zjistíme, že

$$U_{d1} = 0.401V$$

Po dosazení do zatěžovací charakteristiky zdroje $I = -\frac{U}{R_{AC}} + \frac{\varepsilon}{R_{AC}}$ zjistíme, že

$$I_{d1} = 3.465A.$$

Řešení pomocí kvadratické aproximace exponenciální funkce: Ve voltampérové charakteristice diody nahradíme exponenciální funkci funkcí kvadratickou:

$$e^{\frac{U}{U_T}} = e^{\frac{U_S}{U_T}} \left(1 + \left(\frac{U - U_S}{U_T}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{U - U_S}{U_T}\right)^2\right)$$

Úpravami podobnými jako u lineární aproximace (kvadratickou aproximaci dosadíme do voltampérové charakteristiky diody a tu potom dosadíme do zatěžovací charakteristiky zdroje) získáme kvadratickou rovnici pro neznámou U.

$$AU^2 + BU + C = 0,$$

kde

$$A = -\frac{I_0 R_{AC} e^{\frac{U_S}{U_T}}}{2U_T^2}$$

$$B = -\frac{I_0 R_{AC} e^{\frac{U_S}{U_T}}}{U_T} + \frac{I_0 R_{AC} U_S e^{\frac{U_S}{U_T}}}{U_T^2} - 1$$

$$C = \varepsilon - I_0 R_{AC}\left(e^{\frac{U_S}{U_T}} - 1\right) + \frac{U_S I_0 R_{AC} e^{\frac{U_S}{U_T}}}{U_T} - \frac{I_0 R_{AC} e^{\frac{U_S}{U_T}} U_S^2}{2U_T^2}$$

Řešením této rovnice je hodnota diodového napětí

$$U_{d1} = 0.413V.$$

Po dosazení tohoto napětí do zatěžovací charakteristiky zdroje dostaneme

$$I_{d1} = 3.449A.$$

Numerické řešení: Postupujeme podle návodu. Ze zatěžovací charakteristiky zdroje si vyjádříme proud

$$I = \frac{-U + \varepsilon}{R_{AC}}$$

a z voltampérové charakteristiky diody si po zlogaritmování a úpravách vyjádříme napětí:

$$U = U_T \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right)$$

Vyjdeme ze zatěžovací charakteristiky pro $U = 0V$. Odpovídající hodnotu proudu (4 A) dosadíme do voltampérové charakteristiky diody. Hodnotu takto získaného napětí znovu dosadíme do zátěžové charakteristiky zdroje a celý postup opakujeme tak dlouho, než dosáhneme požadované přesnosti. Postupným dosazováním dostáváme:

$$U_{d1-1} = 0V ....I_{d1-1} = 4A$$

$$U_{d1-2} = 0.411059V.....I_{d1_2} = 3.4549208A$$

$$U_{d1-3} = 0.4072483V....I_{d1_3} = 3.4570022A$$

V tomto kroku jsme již dosáhli požadované přesnosti (Hodnoty získané v posledním kroku se liší od hodnot kroku předchozího méně než o 1%. Hledané hodnoty jsou

$$U_{d1} = 0.4072V$$

$$I_{d1} = 3.4570A.$$

d) Je-li dioda zapojena v závěrném směru, počítáme úplně stejně jako v odstavci c). Podle grafického řešení na obr. 5.2 stanovíme hodnoty $U_S = -3V$ a $I_S = -I_0 = -5.10^{-7}A$ a dosadíme do vztahu pro lineární i kvadratickou aproximaci. U lineární aproximace dostáváme hodnoty

$$U_{d2} = 3.000V; I_{d2} = 4.10^{-7}A$$

Dosazením do vztahu vypočítaným po kvadratické aproximaci vypočítáme, že

$$U_{d2} = 3.000V; I_{d2} = 4,9.10^{-7}A$$

Při numerickém řešení vycházíme z rovnic $I = I_0\left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1\right)$ a $U = \varepsilon - IR_{AC}$. Vyjdeme z bodu $U = -3V$ a dostáváme:

$$U_{d2-1} = -3V...................I_{d2-1} = -5.10^{-7}A$$

$$U_{d2-2} = -2.9999996V......I_{d2-2} = -5.10^{-7}A$$

a tyto hodnoty mají požadovanou přesnost. Hledané hodnoty jsou

$$U_{d2} = -3.0000V$$

$$I_{d2} = -5.0000.10^{-7}A.$$

e) Náhradní odpor diody je v propustném i závěrném směru podle definice roven podílu napětí a proudu. Tedy v propustném směru

$$R_{d1} = \frac{U_{d1}}{I_{d1}} = 0.1178\Omega$$

a v závěrném směru

$$R_{d2} = \frac{U_{d2}}{I_{d2}} = 6.10^{6}\Omega.$$