

SPOJOVÁNÍ IMPEDANCÍ

(program pro TI 58/59)

Jiří Ježek

Výpočet elektrických obvodů je jednou z velkých oblastí aplikace malé výpočetní techniky mezi radioamatéry i mezi profesionály. Abychom nepředkládali čtenářům pouze program k okopírování, ale dále rozvíjeli vlastní schopnost tvoření a sestavování programů, uvádíme i matematická východiska programu, jeho strukturu (vývojové diagramy) a několik příkladů včetně vypočítaných hodnot a sestavených grafů. To vše postupně v tomto a následujících dvou číslech AR.

Program umožňuje určit výslednou impedanci, absolutní hodnotu impedance a fázový posuv jednoduchého i složitějšího dvojpólu skládajícího se z odporů, kapacit a indukčností nebo z obecných impedancí. Umožňuje sledovat závislost impedance na kmitočtu či na hodnotách některých členů obvodu.

Vložené hodnoty impedancí $Z_1 = r_1 + jx_1$, $Z_2 = r_2 + jx_2$, ... $Z_n = r_n + jx_n$ se postupně ukládají jako uspořádané dvojice reálných čísel $[r_1; x_1]$, $[r_2; x_2]$, ... $[r_n; x_n]$ do registrů $[R_{10}; R_{11}]$, $[R_{12}; R_{13}]$, ... $[R_{i-1}; R_i]$. Program E spočítá hodnotu sériového spojení impedancí Z_n a Z_{n-1} uložených v registrech $[R_{i-3}; R_{i-2}]$, $[R_{i-1}; R_i]$ a uloží ji do registrů $[R_{i-3}; R_{i-2}]$. Program D řeší stejnou úlohu pro paralelní spojení. Pokud potřebujeme transfigurovat spojení impedancí do trojúhelníka na spojení do hvězdy, vložíme nejprve po řadě hodnoty Z_1, Z_2, Z_3 a programem C' uložíme transformované veličiny Z_{12}, Z_{23}, Z_{31} místo původních hodnot Z_1, Z_2, Z_3 .

Programem E' se ukládá hodnota zvoleného kmitočtu do registru R_5 , program B' počítá absolutní hodnotu výsledné impedance a fázový posuv. Program D' umožňuje zaměnit obsahy registrů s hodnotami dvou naposled vložených impedancí, tj.

$$[R_{i-3}; R_{i-2}] \leftrightarrow [R_{i-1}; R_i]$$

Do registrů $[R_{i-1}; R_i]$ můžeme uložit činný odpor r programem A jako $[r; 0]$, indukčnost L programem B jako $[0; \omega L]$, kapacitu C programem C jako $[0; -\frac{1}{\omega C}]$ a impedanci $r + jx$ jako $[r; x]$ programem podle 6. kroku tabulky.

Použité vztahy

Pro sériové spojení: $Z_s = Z_n + Z_{n-1}$, uloženo do $[R_{i-3}; R_{i-2}]$.

Pro paralelní spojení: $Z_p = \frac{Z_n \cdot Z_{n-1}}{Z_n + Z_{n-1}}$ uloženo do

$$[R_{i-3}; R_{i-2}], Z_n = r_n + jx_n \vee [R_{i-1}; R_i], Z_{n-1} = r_{n-1} + jx_{n-1} \vee [R_{i-3}; R_{i-2}]$$

Pro transfiguraci trojúhelník - hvězda:

$$Z_{ij} = \frac{Z_i \cdot Z_j}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \quad [ij] = [31], [23], [12]$$

$$Z_1 \text{ a } Z_{13} \text{ uloženo v } [R_{i-5}; R_{i-4}],$$

$$Z_2 \text{ a } Z_{23} \text{ uloženo v } [R_{i-3}; R_{i-2}],$$

$$Z_3 \text{ a } Z_{31} \text{ uloženo v } [R_{i-1}; R_i].$$

$$Z_n = \sqrt{r_n^2 + x_n^2} \quad \text{uloženo v } R_x.$$

$$\varphi = \arctg \frac{x_n}{r_n} \quad \text{uloženo v } R_i.$$

$$\omega = 2\pi f$$

f ... kmitočet (Hz)

r ... odpor (Ω)

L ... indukčnost (H)

C ... kapacita (F)

x ... imaginární složka impedance [Ω]

Poznámka:

Symbolem R_i budeme nadále rozumět označení příslušného registru i číslo v tomto registru uložené.

Použití programu udává následující tabulka.

Program pro spojování impedancí můžeme používat dvojím způsobem:

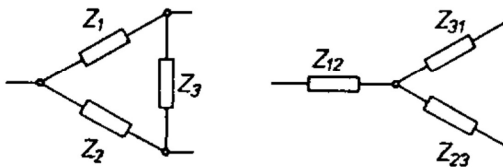
1. Hodnoty jednotlivých členů obvodu vkládáme na displej a řešíme postupně obvod podle následující tabulky.
2. Hodnoty jednotlivých členů obvodu uložíme do volných registrů a postup řešení obvodu naprogramujeme tak, že

programy z následující tabulky volíme jako podprogramy a hodnoty členů obvodu vyvoláme jako RCL...

Lbl A' RCL... konfigurace obvodu
.. INV SBR

Druhý způsob má tu výhodu, že celý výpočet můžeme jednoduše opakovat s pozměněnou hodnotou kmitočtu nebo s jinou hodnotou některého členu.

krok	použití	vstupní hodnota	tlačítko	displej
1	Start a příprava paměti		RST R/S	9
2	Vložení kmitočtu f (Hz)	f	E'	f
3	Vložení odporu r (Ω)	r	A	0
4	Vložení indukčnosti L (H)	L	B	x_L
5	Vložení kapacity C (F)	C	C	$-x_C$
6	Vložení impedance $r + j \cdot x$ (Ω)	r x	A R/S	0 x
7	Sériové spojení Z_n a Z_{n-1}		E $x \neq 1$	r_s x_s
8	Paralelní spojení Z_n a Z_{n-1}		D $x \neq 1$	r_p x_p
9	Transfigurace trojúhelník – hvězda po předcházejícím vložení Z_1, Z_2, Z_3		C' $x \neq 1$ RCL 00 RCL (i-2) RCL (i-3) RCL (i-4) RCL (i-5)	r_{31} x_{31} i x_{23} r_{23} x_{12} r_{12}
10	Výpočet absolutní hodnoty impedance a fázového posuvu (po programech E, D , případně C') Poznámka: Fázový posuv je vypočítán ve stupních. Pokud chceme vyjádřit fázový posuv v radiánech, stiskneme před tlačítkem B' ještě tlačítko Rad .		B' $x \neq 1$	$ Z $ φ
11	Výměna registrů s impedancemi Z_{n-1} a Z_n $[R_{i-3}; R_{i-2}] \leftrightarrow [R_{i-1}; R_i]$		D'	r'_{n-1}



Výpis programu:

000 47 CMs	9 32 $x \geq t$	r_s, x_s	8 76 Lbl	vstup L	9 07 07	
1 09 9	050 43 RCL		9 12 B		150 09 9	9 do R_6
2 42 STO	1 07 7		100 86 St flg		1 42 STO	pror r_s, x_s
3 00 0	2 48 Exc		1 00 0		2 06 6	
4 91 R/S	3 00 0	i do R_0	2 76 Lbl	vstup C	3 76 Lbl	
	4 76 Lbl		3 13 C			
5 76 Lbl	5 65 x		4 65 x		4 42 STO	
6 23 In x	6 71 SBR		5 02 2		5 73 RCL Ind	
7 04 4	7 23 In x		6 65 x		6 00 0	
8 42 STO	8 36 Pgm	násobení	7 89 π		7 69 Op	
9 07 7	9 04 4	k. čísel	8 65 x		8 30 30	
010 76 Lbl	060 13 C		9 43 RCL		9 69 Op	
	1 43 RCL		110 05 5	výpočet x	160 30 30	
11 24 CE	2 08 8		1 95 =		1 85 +	
12 73 RCL Ind	3 42 STO		2 87 If flg	pro L	2 73 RCL Ind	
3 00 0	4 03 3		3 00 0	skok na	3 00 0	
4 72 STO Ind	5 43 RCL		4 01 1	adresu	4 69 Op	
5 07 7	6 09 9		5 18 18	118	5 30 30	
6 69 Op	7 42 STO		6 35 1/x		6 69 Op	
7 30 30	8 04 4		7 94 +/-		7 30 30	
8 97 Dsz	9 36 Pgm	dělení	8 22 INV		8 85 +	
9 07 7	070 04 4		9 86 St flg		9 73 RCL Ind	
020 24 CE	1 18 C'		120 00 0		170 00 0	
1 69 Op	2 76 Lbl	uložení r, s	1 29 CP	0 do R_t	1 95 =	
2 20 20	3 32 $x \geq t$		2 32 $x \geq t$		2 72 STO Ind	
3 92 INV SBR	4 72 STO Ind		3 69 Op		3 06 6	
	5 00 0		4 20 20		4 69 Op	
4 76 Lbl	6 32 $x \geq t$		5 72 STO Ind	0 do R_{i-1}	5 36 36	
5 15 E	7 69 Op		6 00 0		6 73 RCL Ind	
6 71 SBR	8 20 20		7 32 $x \geq t$		7 00 0	
7 23 In x	9 72 STO Ind		8 69 Op		8 32 $x \geq t$	
8 36 Pgm	080 00 0		9 20 20		9 06 6	
9 04 4	1 32 $x \geq t$		130 72 STO Ind	x do R_i	180 44 SUM	
030 12 B	2 92 INV SBR		1 00 0		1 00 0	
1 61 GTO	3 76 Lbl	vstup r	2 92 INV SBR		2 32 $x \geq t$	
2 32 $x \geq t$	4 11 A				3 72 STO Ind	
	5 09 Op		3 76 Lbl	f do R_5	4 00 00	
3 76 Lbl	6 20 20	i-1	4 10 E'		5 03 3	
4 14 D	7 72 STO Ind	r do R_{i-1}	5 42 STO		6 22 INV	
5 71 SBR	8 00 0		6 05 5		7 44 SUM	
6 23 In x	9 69 Op		7 92 INV SBR		8 00 0	
7 08 8	090 20 20	i do R_0			9 97 Dsz	je-li $R_7 \neq 0$, skok na STO
8 48 Exc	1 00 0		8 76 Lbl	$ z , \varphi$	190 07 7	
9 00 0	2 72 STO Ind	0 do R_i	9 17 B'		1 42 STO	
040 85 +	3 00 0		140 32 $x \geq t$		2 71 SBR	
1 03 3	4 92 INV SBR		1 22 INV		3 65 x	
2 54)	5 72 STO Ind	x do R_i	2 37 P→R		4 04 4	
3 42 STO	6 00 0		3 32 $x \geq t$		5 44 SUM	
4 07 7	7 92 INV SBR		4 92 INV SBR	-	6 00 0	
5 36 Pgm	8 76 Lbl	transi-			7 71 SBR	
6 04 4	6 18 C'	gurace	5 76 Lbl	transi-	8 65 x	
7 12 B	7 02 2	2 do R_7	6 00 0	gurace	9 04 4	
8 71 SBR	8 42 STO	pro smyčku	7 02 2	2 do R_7	200 44 SUM	
			8 42 STO	pro smyčku	1 00 0	
					2 61 GTO	

3 65 x		8 00 0	
		9 69 Op	
4 76 Lbl	výměna	220 20 20	
5 19 D'	registrů	1 69 Op	
6 02 2		2 20 20	
7 42 STO		3 72 STO Ind	
8 07 7		4 00 0	
9 76 Lbl		5 69 Op	
		6 30 30	
210 45 y ^x		7 97 Dsz	je-li
1 73 RCL Ind		8 07 7	R ₇ ≠ 0,
2 00 0		9 45 y ^x	skok na
3 69 Op		230 69 Op	y ^x
4 30 30		1 20 20	
5 69 Op		2 69 Op	
6 30 30		3 20 20	
7 63 Exc Ind		234 92 INV SBR	

Uživatelské funkce:

- A ... vložení r
- B ... vložení L
- C ... vložení C
- D ... paralelní spojení Z_n, Z_{n-1}
- E ... sériové spojení
- A' ... pro konfiguraci obvodu
- B' ... výpočet |Z|, φ
- C' ... transfigurace trojúhelník-hvězda
- D' ... výměna Z_{n-1} ↔ Z_n
- E' ... vložení kmitočtu

Obsazení registrů:

- R₀ ... i - indexregistr
- R₁ ... a } a + jb, výsledek operace
- R₂ ... b } s komplexními čísly
- R₃ ... c } c + jd
- R₄ ... d }
- R₅ ... f
- R₆ ... indexregistr
- R₇ ... řízení smyček
- R₈ ... součet reálných složek
- R₉ ... součet imaginárních složek
- R₁₀ a další pracovní

Použitá návěští:

LblInx ... 005	LblICE ... 010	LblE ... 024	LblD ... 033
Lblx ... 054	Lblx ≥ t ... 072	LblB ... 098	LblC ... 102
LblE' ... 133	LblB' ... 138	LblC' ... 145	LblSTO ... 153
LblD' ... 204	Lbly ^x ... 209	LblA' ... 235	

Rozdělení paměti:

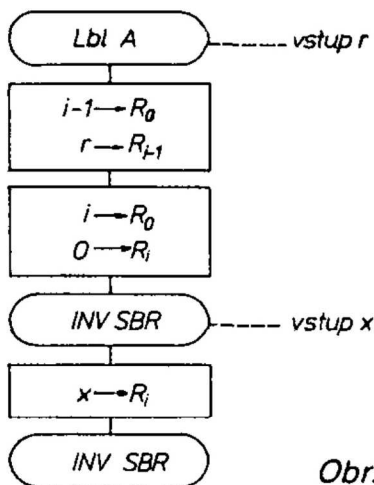
239,29 pro TI-58 - pokud program obvodu A' potřebuje více kroků, zvolíme rozdělení 319,19 a hodnoty obvodu ukládáme místo do registrů přímo do programu A'. Pro výpočet zůstávají registry 10-19.
319,79 pro TI-59.

Kontrolní program:

RST R/S 1 A.2 R/S 1 E' 1 +/- B -6,28 0,5 C -0,318 C' 0,0948 2 A 1 +/- R/S E 2,09 D' -0,09 3 B E -0,09 D 2,279 E 4,15 B' 4,473060611 x ≥ t 21,90711228

Struktura programu:

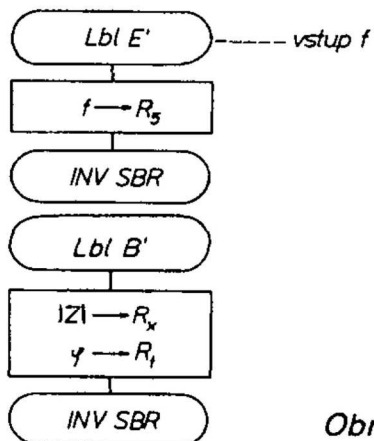
Program používá nepřímé adresování podle řídicího registru (indexregistru) R₀, do kterého je na počátku programu vloženo číslo i-2 = 9 (instrukcemi RST R/S).



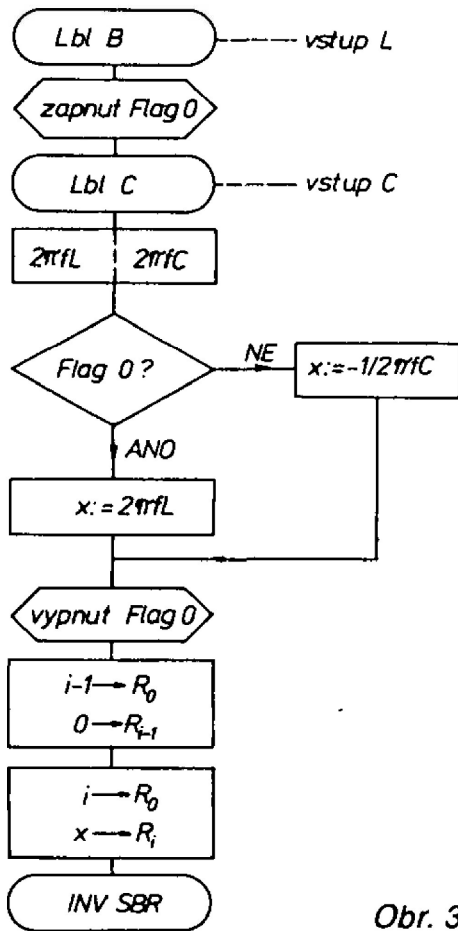
Obr. 1.

Při vkládání hodnoty odporu r (LBI A) nejdříve instrukcí Op 20 zvětšíme index v registru R₀ na i-1 a instrukcí STO Ind 0 uložíme číslo z displeje do R_{i-1}. Do R_i pak vložíme 0 (imaginární část impedance). Pokud vkládáme i imaginární složku x, pokračuje program instrukcí R/S a přesune do R_i místo 0 hodnotu x.

Převážná část pro vstup indukčnosti (LBI B) a kapacity (LBI C) je společná. Při vložení L tlačítkem B sepneme přepínač Flag 0, pro kapacitu zůstane vypnut. Po výpočtu 2πfL popř. 2πfC se program rozvětví (vlivem Flag 0), získané hodnoty x_L nebo x_C se pak v další společné části programu uloží do registru R_i, v R_{i-1} je 0.



Obr. 2.

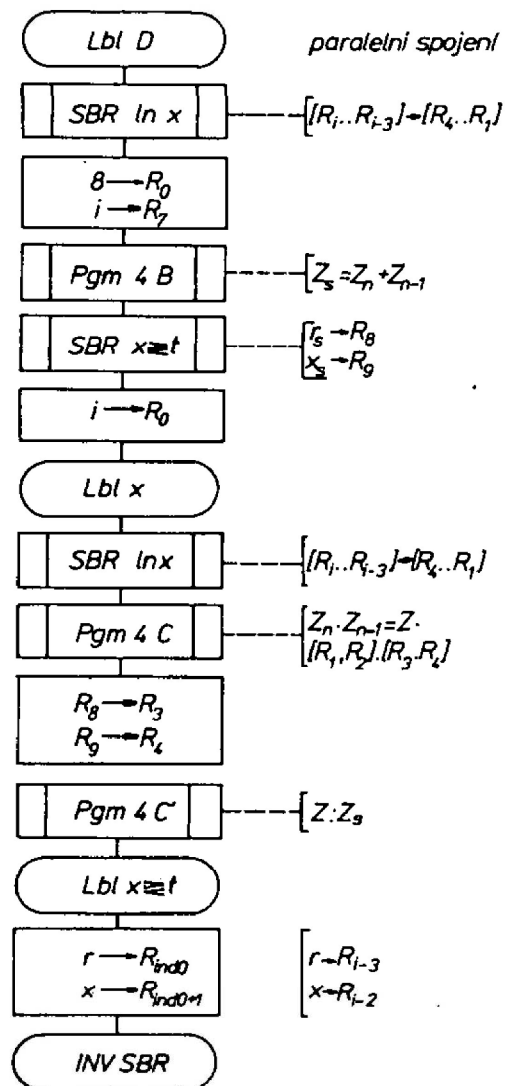


Obr. 3.

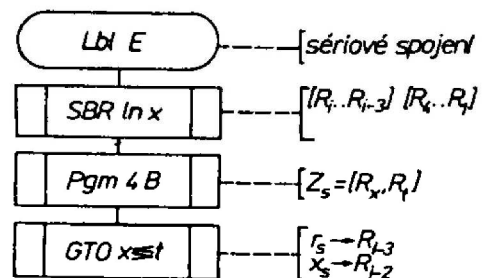
Programem **Lbl E'** se pouze přesune hodnota vloženého kmitočtu z displeje do R_5 .

Program **B'** předpokládá reálnou část impedance na displeji, imaginární část pak v registru R_i . Použitím převodu pravoúhlých souřadnic na polární dostaneme absolutní hodnotu impedance $|Z|$ i fázový posun φ . Kalkulátor je po zapnutí vždy nastaven tak, že výpočty s úhly probíhají ve stupních. Chceme-li výsledek v radiánech, stiskneme tlačítko **Rad**.

Podprogramem **Lbl In x** přesouváme obsahy čtyř posledních registrů do R_1 až R_4 a připravujeme tak paměti pro vestavěný program Pgm 04 – operace s komplexními čísly (používáme součet B, součin C, podíl C'). Podprogram **Lbl x ⇒ t** přesouvá výsledky operace do posledních dvou registrů. Část **Lbl x** je určena pro výpočet podílu součinu a součtu komplexních čísel. Používáme ji v programu **Lbl D** pro paralelní spojení impedancí a v programu **Lbl C'** při výpočtu jednotlivých členů hvězdy.



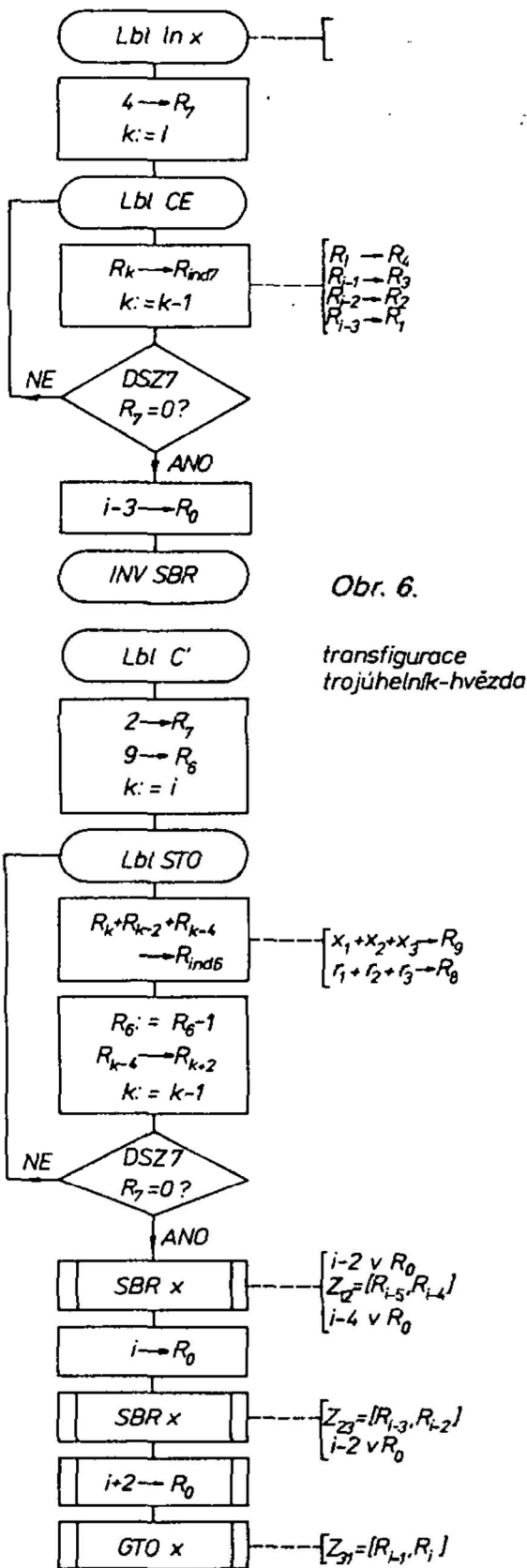
Obr. 4.



Obr. 5.

Programy pro sériové a paralelní spojení (**Lbl E**, **Lbl D**) počítají vždy se dvěma naposled vloženými impedancemi v registrech R_{i-3} , R_{i-2} , R_{i-1} , R_i a výsledek uloží do registrů R_{i-3} , R_{i-2} .

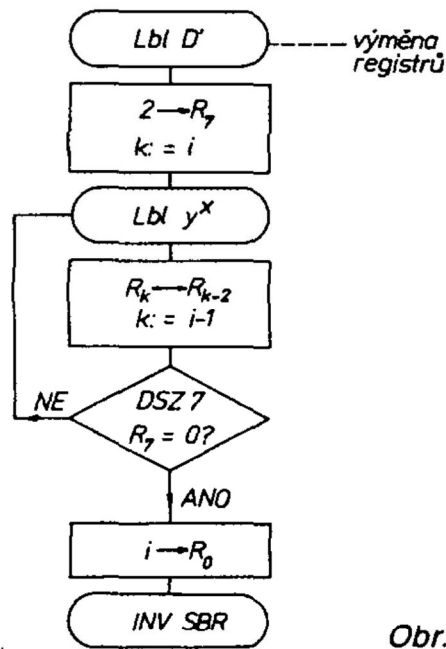
Program pro transfiguraci impedancí spojených do trojúhelníka na spojení do



Obr. 6.

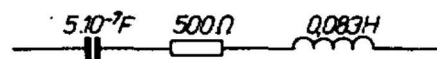
hvězdy vyžaduje složitější strukturou delší dobu výpočtu. Kromě registru R_0 je zde použit další indexregistr R_6 , který řídí v programu **Lbi STO** uložení součtu reálných a imaginárních částí tří naposled vložených impedancí do registrů R_8 a R_9 . Podprogram **Lbi STO** ještě současně ukládá hodnotu impedance Z_1 z R_{i-5} , R_{i-4} také do R_{i+1} , R_{i+2} . Použitá smyčka zmenšuje potřebný počet programových kroků. Dále třikrát použité podprogramy **Lbi x** vypočítají transformované hodnoty impedancí a uloží je do registrů místo impedancí původních.

Pro záměnu impedancí uložených v posledních čtyřech registrech slouží program **D'**. Smyčka **Lbi y^x**, řízená registrem R_7 , vymění nejdříve imaginární složky a potom reálné části impedancí.



Obr. 8.

Příklad 1 – sériové spojení:
pro $f = 1200 \text{ Hz}$



Řešení 1. způsobem	displej	význam
RST R/S 1200 E'5 EE 7		
+/- C 500 A 0,083 B E E 500		r
x≠t	284	x
x≠t B'	616	Z
x≠t	35,8	φ (°)

Pro jiný kmitočet musíme celý postup opakovat.

Řešení 2. způsobem:

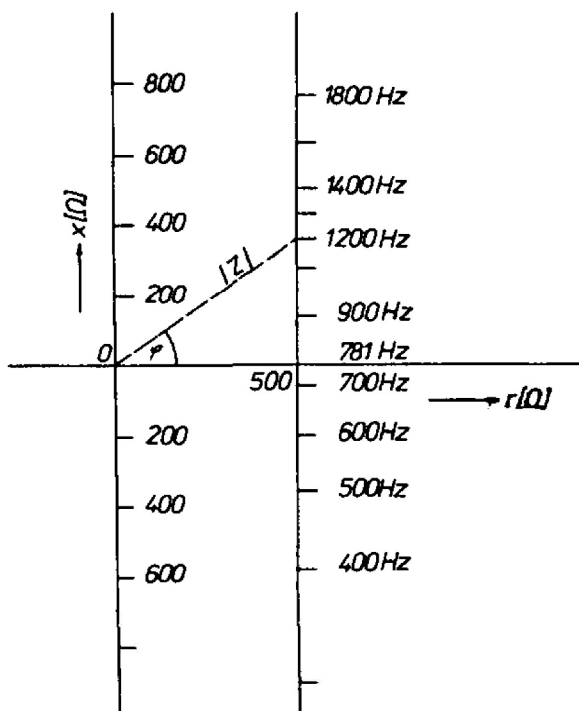
Údaje kapacity, odporu a indukčnosti vložíme do registrů R₂₇ až R₂₉ (předcházející registry tvoří rezervu pro výpočet).

RST R/S 5 EE 7 +/- STO 27 500 STO 28 0,083 STO 29

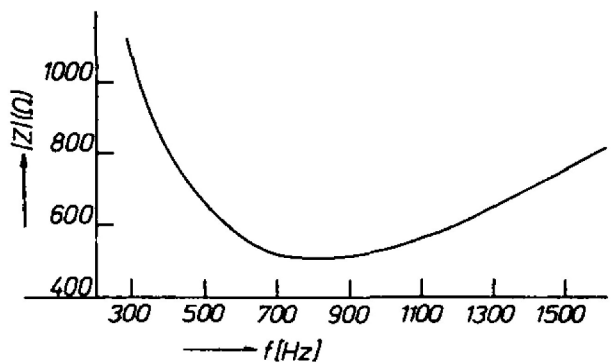
Do programové paměti vložíme od nejbližší volné adresy program obvodu (GTO):

Lb1 A' RCL 27 C RCL 28 A RCL 29 B E E R/S x≠t R/S x≠t B' R/S x≠t R/S 9, STO 00 100 SUM 5 RCL 5 Pause GTO A'

Vložíme-li počáteční hodnotu kmitočtu 100 Hz (100 E'), bude program A' počítat r, x, |Z|, φ pro kmitočty 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, ... atd. Před výpočtem se vždy na okamžik objeví na displeji vkládaný kmitočet (Pause). Výpočet pokračuje vždy po stisknutí tlačítka R/S. Při použití tiskárny nahradíme instrukci R/S příkazem k tisku Prt. Před počátkem dalšího výpočetního cyklu se vkládá číslo 9 do indexregistru R₀. Některé vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.



Obr. 9. Graf k příkladu 1

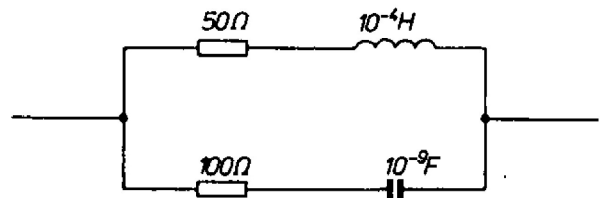


Obr. 10. Graf k příkladu 1

Tab. 2.

f (Hz)	Z (Ω)		Z (Ω)	φ (°)
	r	x		
100	500	-3130	3170	-80,9
200	500	-1490	1570	-71,4
300	500	- 905	1030	-61,4
400	500	- 587	771	-49,6
500	500	- 376	626	-36,9
600	500	- 218	545	-23,5
700	500	- 90	508	-10,2
781	500	0	500	0,0
800	500	19	500	2,2
900	500	116	513	13,0
1000	500	203	540	22,1
1200	500	361	616	35,8
1400	500	503	709	45,2
1600	500	635	809	51,8

Příklad 2 – paralelní spojení



Řešení 1. způsobem:

RST R/S 1 EE 6 E' 50 A 1 EE 4

+/- BE 100 A 1 EE 9 +/- CED 171

x≠t -169

x≠t B' 240

x≠t -44,7

Pro jiný kmitočet postup opakujeme.

displej význam
r
x
|Z|
φ

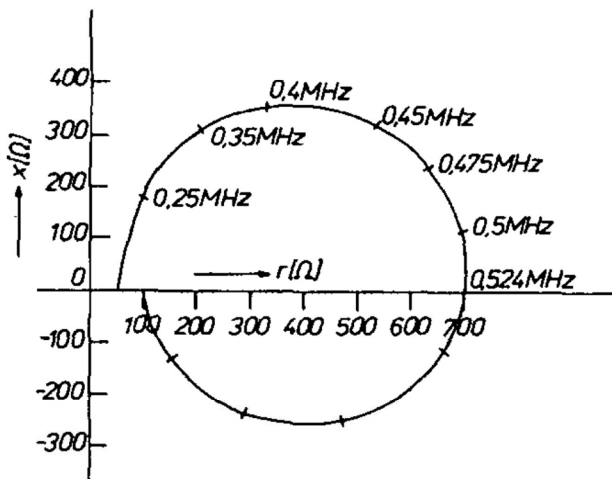
Některé vypočítané hodnoty jsou v tab. 3.

Tab. 3.

f (kHz)	r (Ω)	x (Ω)	Z (Ω)	φ (°)
1 Hz	50	0	50	0
125	60	81	99	54,9
250	93	189	211	63,9
350	205	316	377	57,0
375	263	374	436	52,8
400	341	368	501	47,2
425	437	366	570	40,0
450	545	328	636	31,1
475	641	244	685	20,8
500	697	123	707	10,0
503	700	105	708	8,6
523	701	4	701	0,3
530	694	-29	694	-2,4
550	657	-113	667	-9,7
600	528	-231	576	-23,6
625	467	-253	531	-28,4
700	335	-257	423	-37,5
750	281	-242	371	-40,8
875	207	-201	288	-44,2
1000	171	-169	240	-44,7
1250	139	-128	189	-42,7
1500	125	-103	162	-39,6
1750	117	-87	146	-36,4
2000	113	-75	135	-33,5
10 000	100	-14	101	-8,1
100 000	100	1	100	-0,8

Poznámka:

Maximální absolutní hodnota impedance je asi při 503,292 kHz. Nulový fázový posuv nastává asi při 254 kHz.



Obr. 11. Graf k příkladu 2

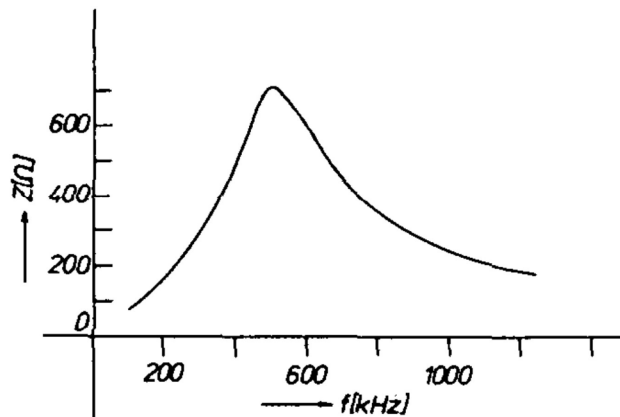
Řešení 2. způsobem:

RST R/S 50 STO 26 1 EE 4 +/- STO 27 100 STO 28 1 EE 9 +/- STO 29 (uložení do registrů)

Program pro řešení obvodu:

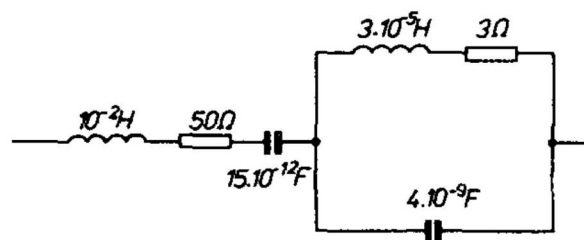
LbI A' RCL 26 A RCL 27 B ERCL 28 A RCL 29 C E D R/S x z t R/S x z t B' R/S x z t R/S 9 STO 00 přírůstek kmitočtu SUM 5 Pause GTO A'

Počáteční kmitočet vložíme do R₅ a tlačítkem A' zahájíme výpočet.



Obr. 12. Graf k příkladu 2

Příklad 3 – kombinované spojení:



Řešení druhým způsobem bez uložení hodnot obvodu do datových registrů (vhodné pro TI-58):

LbI A' 1 EE 2 +/- B 50 A E 15 EE 12 +/- C E 3 EE 5 +/- B 3 A E 4 EE 9 +/- C D E R/S x z t R/S x z t B' R/S x z t R/S 9 STO 00 přírůstek kmitočtu SUM 5 Pause GTO A'

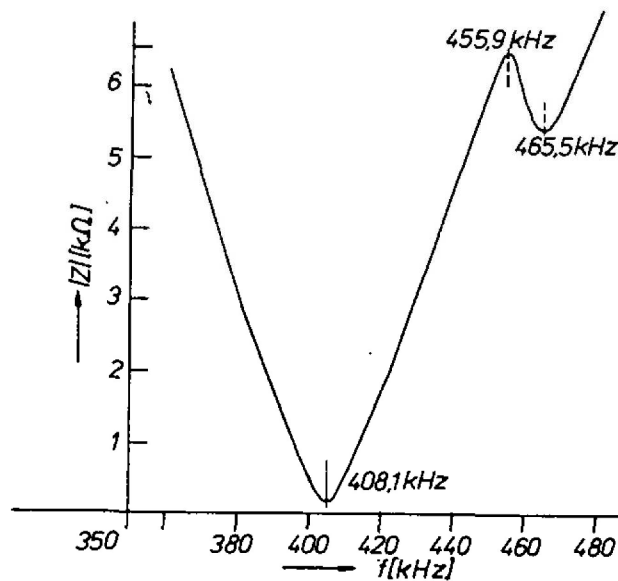
Počáteční kmitočet vložíme do R₅ (po přípravě RST R/S) a tlačítkem A' zahájíme výpočet.

Některé vypočítané hodnoty jsou v tab. 4.

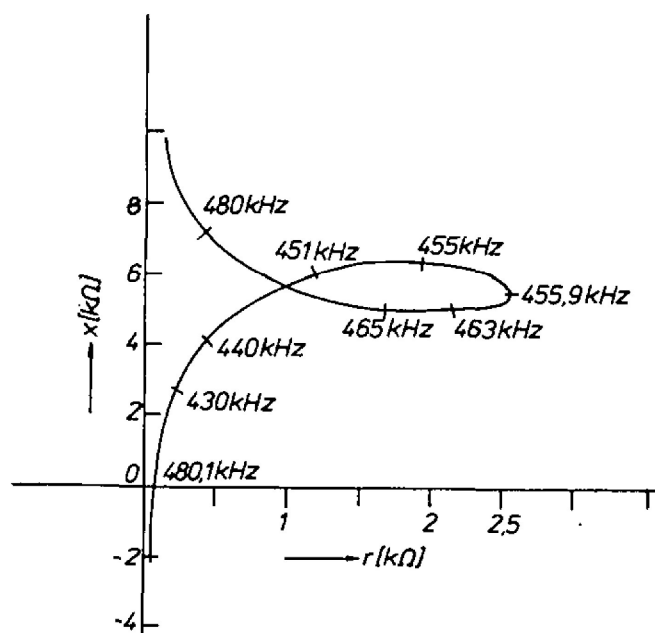
Tab. 4.

f [kHz]	r [Ω]	x [Ω]	Z [Ω]	φ [°]
1 Hz	53	-10 ¹⁰	10 ¹⁰	-90
200	55	-40440	40440	-90
300	59	-16420	16420	-90
400	100	-1088	1092	-85
401	102	-953	959	-84
402	104	-819	826	-83
403	105	-685	693	-81
404	107	-551	561	-79
405	109	-417	431	-75
406	111	-283	304	-69
407	113	-150	188	-53
408	116	-16	117	-8
408,1	116	-3	116	-1
409	118	117	167	45
410	121	251	278	64
420	157	1588	1596	84
430	232	2948	2957	85
440	427	4382	4403	84
450	1119	5889	5995	79
455	1259	6017	6147	78
455,9	2167	6230	6595,9	70,8
456	2186	6223	6595,3	71
457	2358	6120	6558	71
458	2486	5965	6462	67
459	2547	5775	6312	66
460	2532	5576	6124	66
461	2442	5395	5922	66
462	2292	5257	5735	66
463	2104	5174	5585	68
464	1900	5147	5486	70
465	1697	5170	5441	72
465,5	1599	5198	5438	73
466	1505	5234	5446	74
470	928	5719	5794	81
480	360	7188	7197	87
500	135	9701	9702	89
700	52	28730	28730	90
10 ²⁰	50	6.10 ¹⁸	6.10 ¹⁸	90

Minimální hodnota $|Z|$ je asi při 408,1 kHz, další lokální minimum nastává při 465,5 kHz. Lokální maximum $|Z|$ je při 455,9 kHz.



Obr. 13. Graf k příkladu 3



Obr. 14. Graf k příkladu 3

Příklad 4 – můstek:

