

ÚZKOPÁSMOVÉ KMITOČTOVÉ FILTRY – VYUŽITÍ NORTONOVÝCH OBVODOVÝCH TRANSFORMACÍ

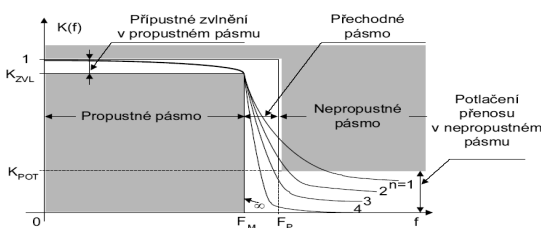
Ing. Lubomír Fröhlich

VUT FEKT, Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky
Kolejní 2906/4, Královo Pole, 61200, Brno, Česká republika
Email: xfrohl00@stud.feec.vutbr.cz; fuserek@seznam.cz

Prezentovaný článek se zabývá možnostmi širšího využití Nortonových obvodových transformací a návrhem výpočtových algoritmů optimalizace úzkopásmových kmitočtových filtrů a realizací těchto transformací ve vhodném programovém prostředí C++ Builder a ověřením jejich ekvivalentních úprav.

1. ÚVOD

Kmitočtové filtry jsou převážně lineární elektrické obvody, jejichž hlavním úkolem je propouštět harmonické složky spektra zpracovávaných signálů v určitém pásmu kmitočtů, které nazýváme propustné pásmo. Mimo propustné pásmo jsou harmonické složky naopak silně utlumovány – tzv. nepropustné pásmo. Vše je názorně zobrazeno na obrázku č. 1.



Obr. č. 1: Příklad závislosti modulu charakteristiky filtru typu dolní propust na řádu filtru a zobrazení propustného a nepropustného pásma

Tento článek byl rozdělen do několika částí ve kterých je popsán a rozebrán princip Nortonových obvodových transformací, vytvořeny vhodné výpočtové algoritmy sloužící pro realizaci v programovém prostředí C++ Builder a pro dané obvody byl využit simulační program PSpice, který ověřil platnost těchto obvodových transformací.

2. EKVIVALENTNÍ ÚPRAVY OBVODŮ

V závěrečné etapě návrhu filtru obvykle optimalizujeme výsledné hodnoty jednotlivých stavebních prvků filtru z hlediska jeho technické realizace. Často je potřeba optimalizovat i výslednou strukturu předběžně navrženého obvodu RLC filtru. Nejčastěji se tyto úpravy provádějí u pásmových propustí (vyšší kmitočty – parazitní kapacity cívek, při úzkopásmových propustí – zvětšení rozsahu hodnot stavebních prvků).

2.1. CÍLE EKVIVALENTNÍCH ÚPRAV

- Eliminace nerealizovatelných součástí (záporné kapacity, ideální transformátory ...),
- minimalizace počtu stavebních prvků (např. induktorů, cena),
- úprava hodnot prvků na vhodnou velikost,
 - Zmenšení hodnot kapacitorů nebo induktorů,
 - minimalizace poměru maximálních, minimálních hodnot prvků,
 - minimalizace souhrnné hodnoty některých prvků,
 - změna zatěžovací impedance.
- optimalizace struktury z hlediska snadné realizovatelnosti,
 - Vytvoření struktury realizovatelné např. piezorezonátory
 - Vytvoření struktury eliminující parazitní prvky
 - Paralelní kapacitory k induktorům v příčkovém článku pro absorpci parazitní kapacity cívky
 - Kapacitor mezi živou svorkou podélného LC článku a zem
 - Rozdělení laděných obvodů z hlediska minimalizace citlivosti ke změnám zátěže
- optimalizace struktury z hlediska minimalizace citlivostí.

2.2. MOŽNOSTI PROVEDENÍ EKVIVALENTNÍCH ÚPRAV

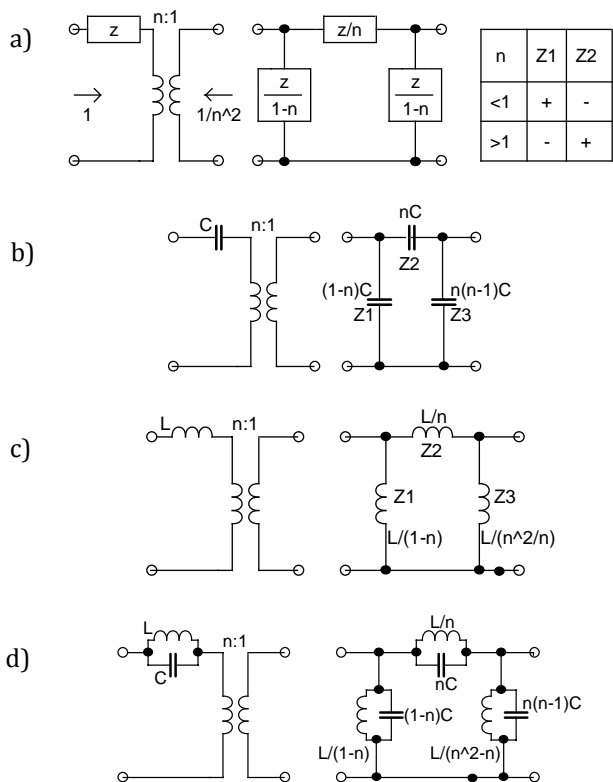
- Dvojpolové transformace
- Trojpolové transformace
- Dvojbranové transformace
 - Transformace filtru na symetrické zapojení
 - Transformace s využitím Bartletovy věty
 - Nortonovy transformace

3. NORTONOVY TRANSFORMACE

Nortonovy transformace patří mezi dvojbranové transformace. Často jsou používány k závěrečným úpravám zapojení filtrů zejména pásmových propustí. V procesu syntézy mohou být využity k optimalizaci výsledného zapojení filtru z nejrůznějších hledisek (ekvivalentních úprav).

3.1. PRVNÍ NORTONOVA TRANSFORMACE

Princip této transformace je patrný z obr. č. 2. Vložení ideálního (i fiktivního) transformátoru s převodem $n:1$ transformuje podélnou impedanci Z dvojbranu na Π článke impedancí Z_1, Z_2 a Z_3 . Z výrazů pro transformované impedance vyplývá, že pro převod $n > 1$ je impedance $Z_1 < 0$, pro $n < 1$ je impedance $Z_3 < 0$. Je-li transformovanou impedancí kapacitor s původní kapacitou C , induktor s původní indukčností L , nebo paralelní kmitavý obvod LC, velikost jednotlivých prvků výsledného Π článku po transformaci impedance jsou patrné na obr. č. 2.



Obr. č. 2: První Nortonova transformace: a) princip, b) transformace kapacitoru C, c) induktoru L, d) paralelního LC obvodu

Obrázek č.2 tedy zobrazuje několik obvodů na kterých je zachycen princip první Nortonovy transformace. Pro přehlednost raději vypíšu jednotlivé vztahy pro patřičné impedance, které vzniknou transformací podélné impedance Z , v našem případě L, C nebo LC obvodu.

Jednotlivé vztahy jsou také uváděny u patřičných součástek pro snadnou orientaci.

➤ 1NT – transformace kapacitoru C

$$Z_1 = (1-n) \cdot C \tag{1}$$

$$Z_2 = n \cdot C \tag{2}$$

$$Z_3 = n \cdot (n-1) \cdot C \tag{3}$$

➤ 1NT – transformace induktoru L

$$Z_1 = L / (1-n) \tag{4}$$

$$Z_2 = L / n \tag{5}$$

$$Z_3 = L / (n^2/n) \tag{6}$$

➤ 1NT – transformace paralelního LC obvodu

$$Z_1 = L / (1-n) \tag{7}$$

$$Z_1 = (1-n) \cdot C \tag{8}$$

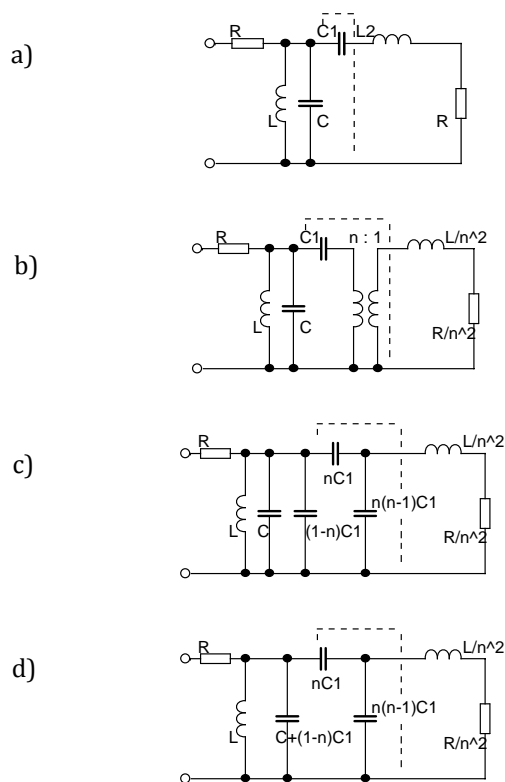
$$Z_2 = L / n \tag{9}$$

$$Z_2 = n \cdot C \tag{10}$$

$$Z_3 = L / (n^2/n) \tag{11}$$

$$Z_3 = n \cdot (n-1) \cdot C \tag{12}$$

Může také nastat situace, že dvojbran bude složitější a bude obsahovat vpravo za vloženým transformátorem ještě další impedance, poté jejich hodnoty musí být pro zachování přenosu násobeny parametrem $1/n^2$. Tedy odpory a indukčnosti násobíme $1/n^2$ a kapacity n^2 . Vše popisuje obr. č. 3, vhodné pro $n > 1$.

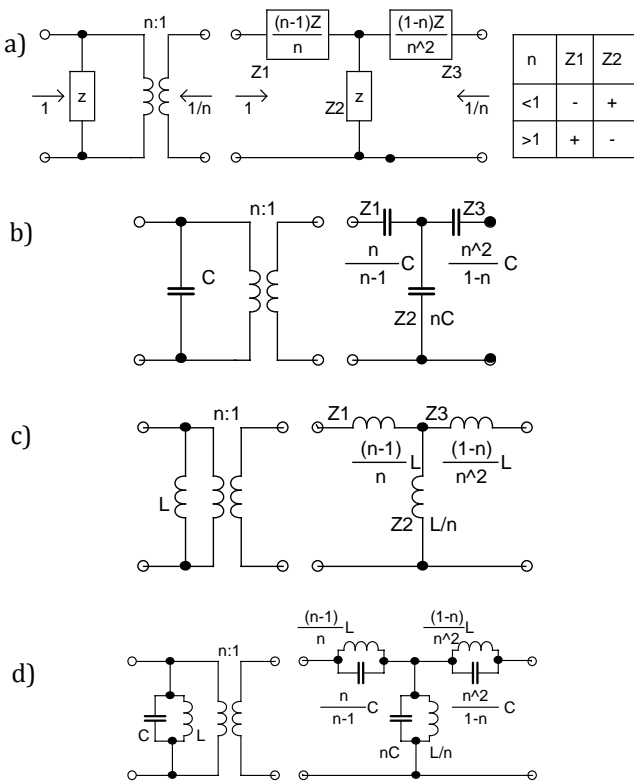


Obr. č. 3: První Nortonova transformace (kapacitou C1): a) výchozí zapojení, b) transformace pomocí ideálního

transformátoru, c) Nortonova transformace, d) eliminace záporné hodnoty kapacitoru (1-n)C1 součtem s větší hodnotou C (pro n>1)

3.2. DRUHÁ NORTONOVA TRANSFORMACE

Princip druhé Nortonovy transformace ukazuje obr. č. 4. Vložení ideálního transformátoru s převodem n:1 transformuje v dvojbranu příčnou impedanci Z na T člunek impedancí Z₁, Z₂ a Z₃. Z vlastností transformace plyne, že v závislosti na volbě převodu n je vždy jedna z výsledných impedancí záporná. Jestliže budeme mít n>1 je impedance Z₃<0 a také může nastat situace, že n<1 je impedance Z₁<0. Hodnoty jednotlivých prvků výsledného T člunku pro transformaci kapacitoru C, induktoru L a LC obvodu jsou patrné z obrázku č. 4.



Obr. č. 4: Druhá Nortonova transformace: a) princip, b) transformace kapacitoru C, c) induktoru L, d) paralelního LC obvodu

➤ 2NT – transformace kapacitoru C

$$Z_1 = C \cdot (n / (n-1)) \quad (13)$$

$$Z_2 = C \cdot n \quad (14)$$

$$Z_3 = C \cdot (n^2 / (1-n)) \quad (15)$$

➤ 2NT – transformace induktoru L

$$Z_1 = L \cdot ((n-1) / n) \quad (16)$$

$$Z_2 = L / n \quad (17)$$

$$Z_3 = L \cdot ((1-n) / n^2) \quad (18)$$

➤ 2NT – transformace paralelního LC obvodu

$$Z_1 = L \cdot ((n-1) / n) \quad (19)$$

$$Z_1 = C \cdot (n / (n-1)) \quad (20)$$

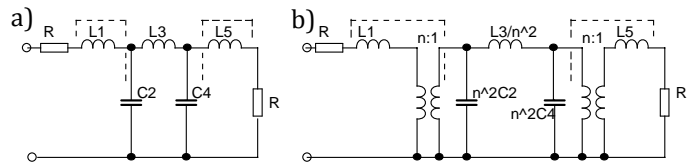
$$Z_2 = L / n \quad (21)$$

$$Z_2 = C \cdot n \quad (22)$$

$$Z_3 = L \cdot ((1-n) / n^2) \quad (23)$$

$$Z_3 = C \cdot (n^2 / (1-n)) \quad (24)$$

Při obou transformacích je vždy jedna z impedancí záporná a proto je třeba ji sloučit s některou kladnou impedancí původního obvodu. Pro úspěšnou aplikaci některé z transformací je zapotřebí, aby původní dvojbran obsahoval potřebné kladné impedance. Každá transformace tedy může zvýšit počet prvků dvojbranu o jednotku. V případě Π nebo T struktury příslušných impedancí původního dvojbranu však počet prvků může zůstat stejný, nebo se i může o jednotku snížit. Do LC struktury je také možno vložit n-1 fiktivních transformátorů. Začleňováním fiktivních ideálních transformátorů je možno měnit velikost impedancí a získat řadu variant ekvivalentních obvodů. Pro požadavek zachování hodnot původních zakončovacích impedancí je potřeba aplikovat sudý počet transformací s výsledným transformačním převodem $n = n_1 n_2 \dots = 1$, tato podmínka je patrná na obr. č. 5.



Obr. č. 5: Princip použití Nortonovy transformace na dílčí část filtru bez změny zakončovacích odporů: a) původní filtr, b) transformovaný filtr

4. PŘÍKLADY POUŽITÍ NORTONOVY TRANSFORMACE

Jak je patrné z obrázku č. 5, jedná se o pásmovou propust 4. řádu u které požadujeme stejné velikosti indukčností cívek.

U tohoto zapojení poté dojde ke změně zatěžovací impedance výsledného filtru. Jestliže chceme zachovat počet cívek, musíme zvolit jen transformaci kapacitorů pro n<1, kdy může být vznikající záporná kapacita absorbována příslušnou kladnou kapacitou. Konečná zátěž obvodu bude transformována na vyšší hodnotu.

4.1. ŘEŠENÍ POMOCÍ PRVNÍ NORTONOVY TRANSFORMACE

➤ kapacitor C1, transformátor v řezu A-A'

převod n transformátoru získáme z požadavku shodnosti cívek:

$$L'_2 = L_2 / n^2 = L_1 \quad (25)$$

$$n = \sqrt{L_2 / L_1} = 0,3176 \quad (26)$$

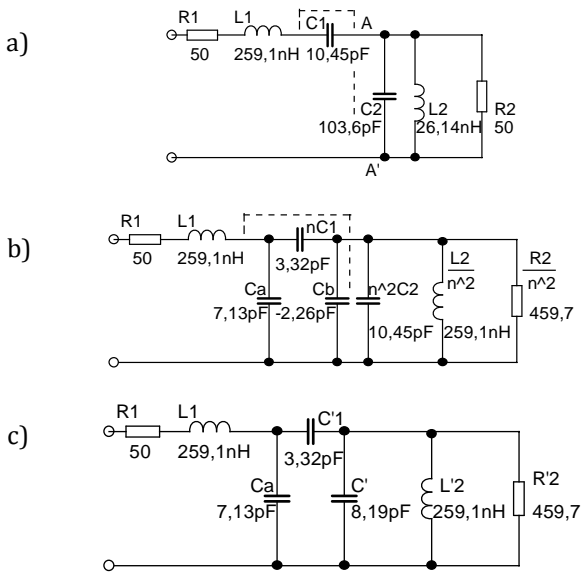
ostatní prvky vypočítáme takto:

$$C_A = (1-n) \cdot C_1 = (1-0,3176) \cdot 10,45 \cdot 10^{-12} = 7,13 \text{ pF} \quad (27)$$

$$C'_1 = n C_1 = 0,3176 \cdot 10,45 \cdot 10^{-12} = 3,32 \text{ pF} \quad (28)$$

$$C' = C_B + n^2 C_2 = n(n-1) C_1 + n^2 C_2 = 0,3176 \cdot (0,3176 - 1) \cdot 10,45 \text{ p} + 0,3176^2 \cdot 103,6 \text{ p} = 8,19 \text{ pF} \quad (29)$$

$$R'_2 = R_2 / n^2 = 50 / 0,3176^2 = 495,6 \Omega \quad (30)$$



Obr. č. 6: Optimalizace pásmové propusti pomocí první Nortonovy transformace (kapacitoru C1): a) původní obvod, b) odvod po transformaci C1, c) výsledný obvod

Nyní si popíšeme postup úpravy obvodu pomocí 1NT, který je patrný na obr.č.6. Můžeme říci, že jsem vycházel z navržené pásmové propusti, která je zobrazena na obr.č.6a. Tato pásmová propust má velký rozptyl součástek a to k_l a k_c přibližně 10 což je značně nevýhodné. Při použití 1NT budeme podélnou impedanci v našem případě kondenzátor transformovat pomocí fiktivního transformátoru s určitým převodem n na Π články kondenzátorů dle vztahů 25 až 30. Nesmíme ovšem také zapomenout na násobení všech hodnot součástek za fiktivním transformátorem, parametrem $1/n^2$ pro L a R a parametrem n^2 pro C , aby byl zachován přenos jako má původní obvod. Obvod po 1NT je patrný na obr.č.6b. Zde musíme provést ještě úpravu paralelní kombinace kondenzátorů kde kondenzátor C_b získal zápornou hodnotu kterou musíme sečíst s hodnotou kondenzátoru C_2 . Výsledný obvod je pak patrný na obr.č.6c, kde rozptyl součástek je mnohem menší, tedy $k_l = 1$ a k_c přibližně 2. Stejně se provádí i 2NT kde se zvolí pouze prvek v příčné větvi obvodu v našem případě kondenzátor C_2 a místo vzniku Π článku se vytvoří T článek. Konkrétní postup je uveden ve vztazích 31 až 34. Vše je uvedeno na obr.č.7.

Tabulka č.1 uvádí hodnoty zvolených pasivních prvků a hodnoty prvků po transformaci pomocí první Nortonovy transformace. Pro realizaci takového obvodu je nutné ještě součástky volit dle dostupných např. E6 nebo E12.

| Označení součástek | Původní hodnoty | Vypočtené hodnoty |
|--------------------|-----------------|-------------------|
| R_1 | 50 Ω | 50 Ω |
| R_2 | 50 Ω | 459,7 Ω |
| L_1 | 259,1nH | 259,1nH |
| L_2 | 26,14nH | 259,1nH |
| C_1 | 10,45pF | 3,32pF |
| C_2 | 103,6pF | --- |
| C_a | --- | 7,13pF |
| C' | --- | 8,19pF |

Tab. č. 1: Přehled součástek pro PP na obr.č.6

4.2. ŘEŠENÍ POMOCÍ DRUHÉ NORTONOVY TRANSFORMACE

➤ kapacitor C2, transformátor v řezu B-B'

Při stejném převodu $n=0,3176$ budeme realizovat daný požadavek pomocí druhé Nortonovy transformace.

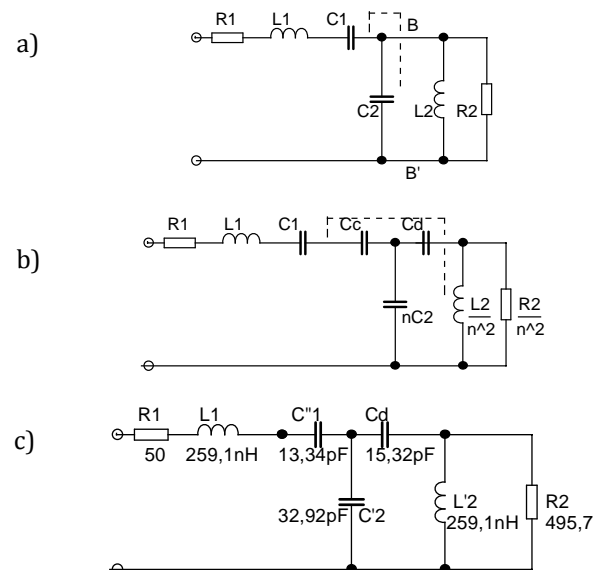
ostatní prvky vypočítáme takto:

$$C_c = n C_2 / (n-1) = 0,3176 \cdot 103,6 \cdot 10^{-12} / (0,3176 - 1) = -48,24 \text{ pF} \quad (31)$$

$$C'_2 = n C_2 = 0,3176 \cdot 103,6 \cdot 10^{-12} = 32,92 \text{ pF} \quad (32)$$

$$C_d = n^2 C_2 / (1-n) = 0,3176^2 \cdot 103,6 \cdot 10^{-12} / (1-0,3176) = 15,32 \text{ pF} \quad (33)$$

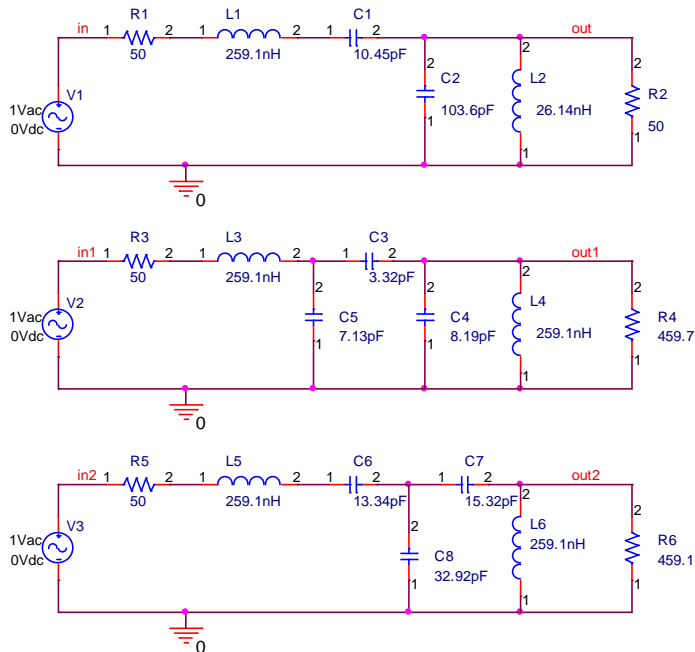
$$C''_1 = (C_1 C_c) / (C_1 + C_c) = (103,6 \text{ p} \cdot (-48,24 \text{ p})) / (103,6 \text{ p} - 48,24 \text{ p}) = 13,34 \text{ pF} \quad (34)$$



Obr. č. 7: Optimalizace pásmové propusti pomocí druhé Nortonovy transformace (kapacitoru C2): a) původní obvod, b) obvod po transformaci C2, c) výsledný obvod

| Označení součástek | Původní hodnoty | Vypočtené hodnoty |
|--------------------|-----------------|-------------------|
| R ₁ | 50Ω | 50Ω |
| R ₂ | 50Ω | 459.7Ω |
| L ₁ | 259.1nH | 259.1nH |
| L ₂ | 26.14nH | 259.1nH |
| C ₁ | 10.45pF | 13.34pF |
| C ₂ | 103.6pF | 32.92pF |
| C ₃ | --- | 15.32pF |

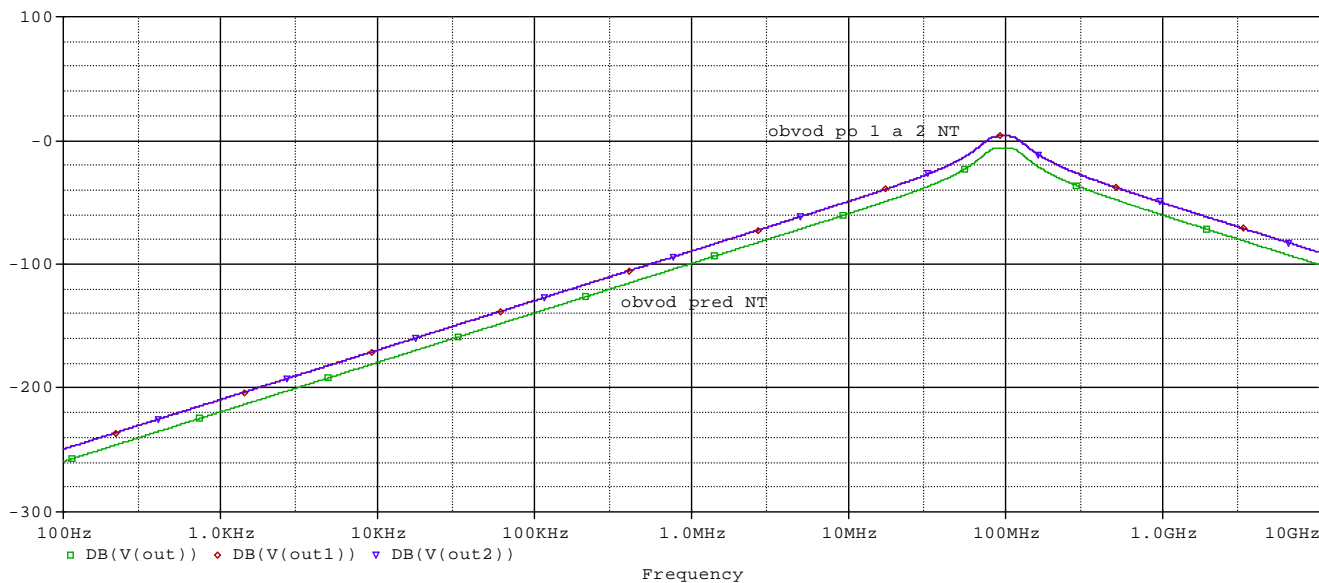
Tab. č. 2: Přehled součástek pro PP na obr.č.7



Obr. č. 9: Ukázky filtrů: a) původní obvod, b) obvod po 1.NT, c) obvod po 2. NT

5. SIMULACE OBVODŮ V PSPICE

V kapitolách 4.1 a 4.2 uvádím příklady úprav filtrů pomocí Nortonových transformací. Tyto úpravy by měly být ekvivalentní a pro důkaz, že tomu tak opravdu je, uvádím kmitočtové charakteristiky pro obvody na obr. č. 9. Tyto charakteristiky jsou patrné na následujícím obrázku č. 8.



Obr. č. 8: Průběh kmitočtových charakteristik pro obvody na obr.č.6 a 7. Graf zachycuje charakteristiky před Nortonovou transformací a také po první a druhé Nortonově transformaci

Jak jsem již podotkl v tomto článku, Nortonovy transformace mají být ekvivalentní úpravy pro původní obvody. Ovšem když se zaměříme na simulaci uváděnou na obr.č.8, můžeme říci, že mezi průběhem před NT a po NT je rozdíl v přenosu okolo 10dB. Tento rozdíl je způsoben vložením fiktivního transformátoru a následujícími transformačními vztahy které nejsou zcela ekvivalentní a způsobují tento rozdíl během transformace jednotlivých součástek.

6. REALIZACE UVEDENÝCH NORTONOVÝCH TRANSFORMACÍ V PROGRAMOVÉM PROSTŘEDÍ C++ BUILDER

6.1. POŽADAVKY NA NÁVRH PROGRAMU

Jestliže se budeme chtít zabývat Nortonovými transformacemi v širším pojetí je vhodné vytvořit si vhodné výpočtové algoritmy optimalizace filtrů s využitím navržených obvodových transformací a realizovat je ve vhodném programovém prostředí, který nám umožní okamžitý přepočítání hodnot součástek. Pro tento účel jsem si zvolil práci v programu C++ Builder. Je možné pracovat i s jinými programy např. Matlab, Excel, atd.

Před začátkem vytváření programu, jsem si musel stanovit podmínky, co má daný program obsahovat. Tyto požadavky jsem si rozdělil do několika fází:

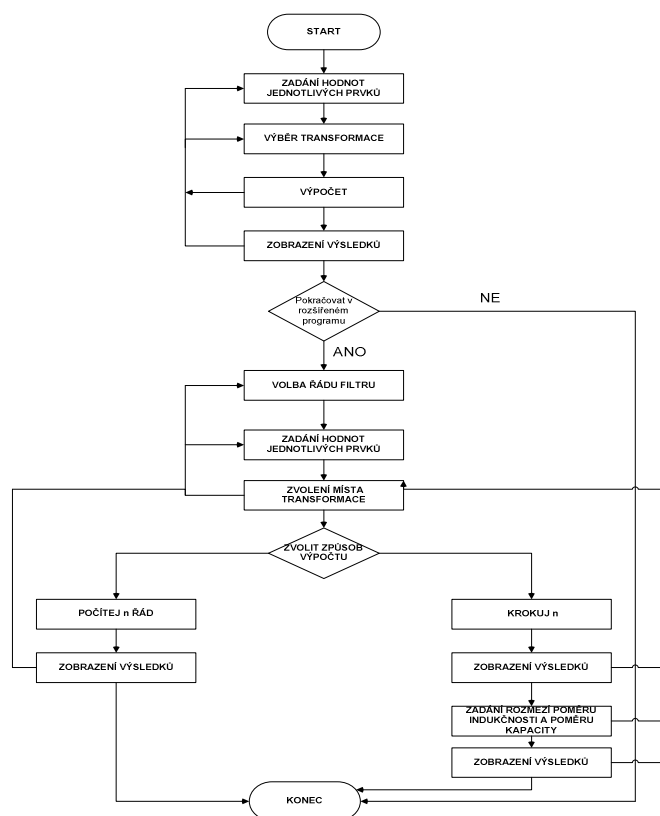
- V první fázi jsem vytvořil úvodní program, ve kterém jsou zachyceny ukázky Nortonových transformací, které jsou patrné na obrázcích č. 6 a 7. Tento program slouží jako úvodní část celého programu, která má zobrazovat vlastnosti Nortonových transformací a zároveň sloužit k osvojení si práce v C++ Builder obr. č. 11.
- Ve druhé fázi jsem vytvořil filtr typu pásmové propusti od 2. do 20. řádu a vhodně ho umístil do programu, aby bylo možné u tohoto filtru podle požadavku měnit řád filtru a kdekoli v obvodě bylo možné provést jednu nebo dvě Nortonovy transformace obr. č. 12, 13.
- Ve třetí fázi jsem provedl realizaci, aby program umožňoval automatické krokování „n“ a zobrazoval poměry kapacit a indukčností obr.č.14.
- Ve čtvrté fázi jsem se zaměřil na možnost vypsání jednoho z výsledků automatického krokování „n“ při zadání rozmezí poměrů kapacit nebo indukčností.
- V poslední fázi jsem v programu vytvořil stručnou informaci o tom, kdo a za jakým účelem daný program vytvořil a sestavil pro tento program nápovědu.

6.2. VÝVOJOVÝ DIAGRAM

Nejprve jsem si na základě požadavků uvedených v předchozí subkapitole vytvořil vývojový diagram viz obrázek č. 10. Podle vývojového diagramu jsem navrhl postup, jakým lze danou úlohu řešit.

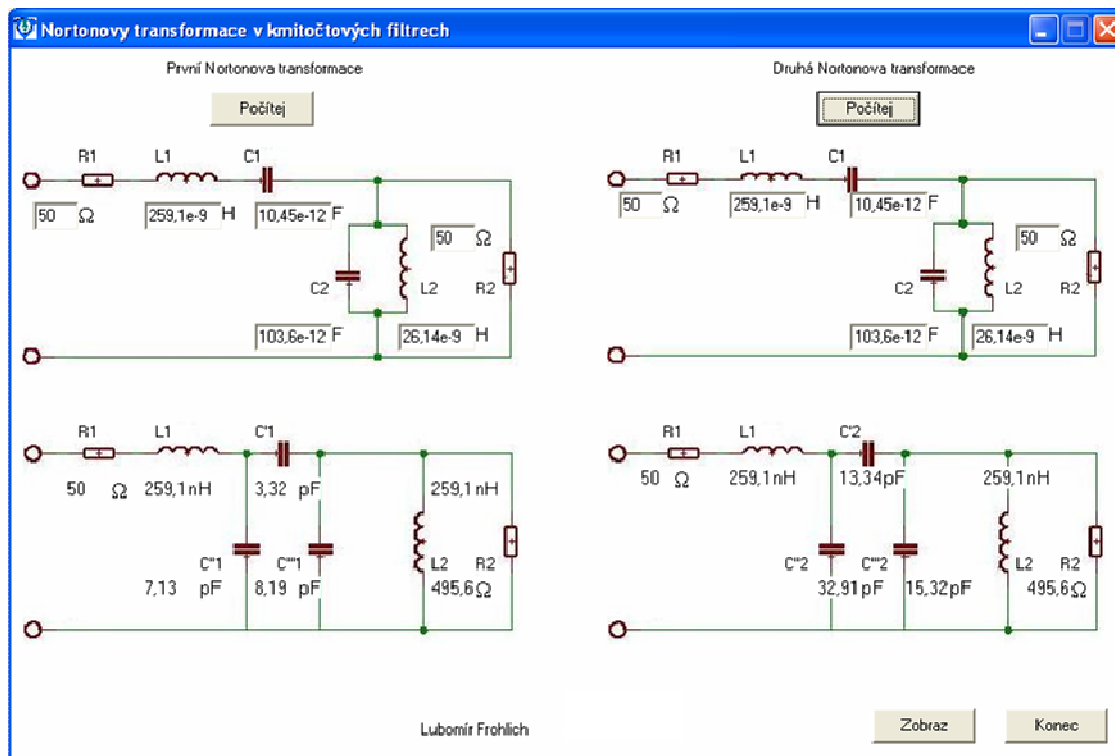
V programu je uveden vzhledem k velkému množství určitý filtr typu pásmové propusti 4. řádu viz. Obr.č.11. Pro zvolený filtr je nejprve nutné zadání jednotlivých prvků dle požadovaných parametrů na přenos. Když jsou u daného filtru zvoleny hodnoty součástek je zapotřebí

vybrat vhodnou transformaci v podélné či příčné větvi filtru. Následuje výpočet a zobrazení hodnot s poměrem k_1 a k_c , poté co jsme se seznámili s úvodní stránkou programu a budeme chtít navrhovat filtr vyššího řádu zmáčkneme tlačítko zobraz kde již máme na výběr 2 až 20 řád filtru viz. obr.č.12, pro který si zadáme hodnoty prvků a opět zvolíme místo transformace. Můžeme volit až dvě místa transformace v podélné nebo příčné větvi. Po zvolení způsobu výpočtu „počítej n řád“ nebo „krokuj n“ se dostaneme ve vývojovém diagramu do jedné ze dvou větví. Při zvolení „počítej n řád“ se nám pouze zobrazí výsledky a poměry jednotlivých prvků po zvolené transformaci viz. obr.č.13. Poté je možné se vrátit k volbě řádu nebo hodnotám prvků či program ukončit. Druhá větev vývojového diagramu umožňuje krokování n fiktivního transformátoru a tím zobrazení velkého množství výpočtů pro jednotlivé kroky n, si poté můžeme zadat rozmezí poměrů výsledků kapacit či kondenzátorů a nechat si automaticky vyhledat nejvhodnější výpočet poté můžeme opět program ukončit nebo se vrátit k novému zadávání vstupních dat viz. obr.č.14.

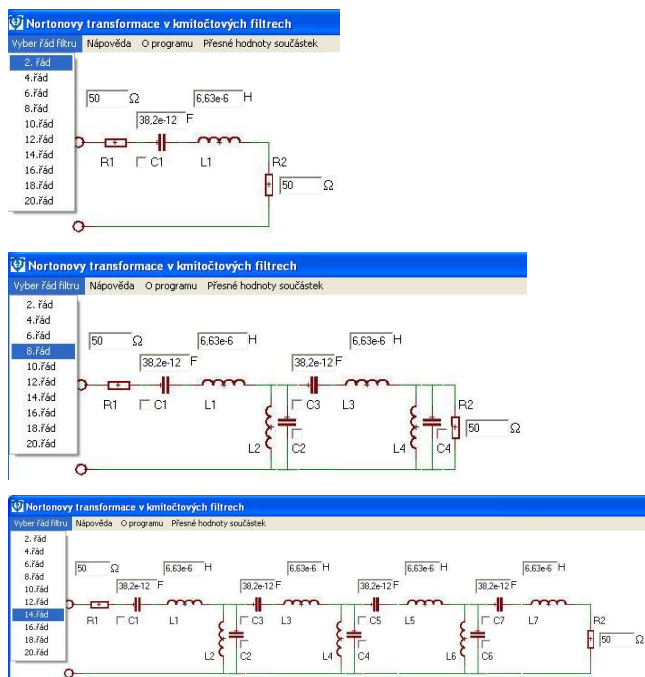


Obr. č. 10: Vývojový diagram

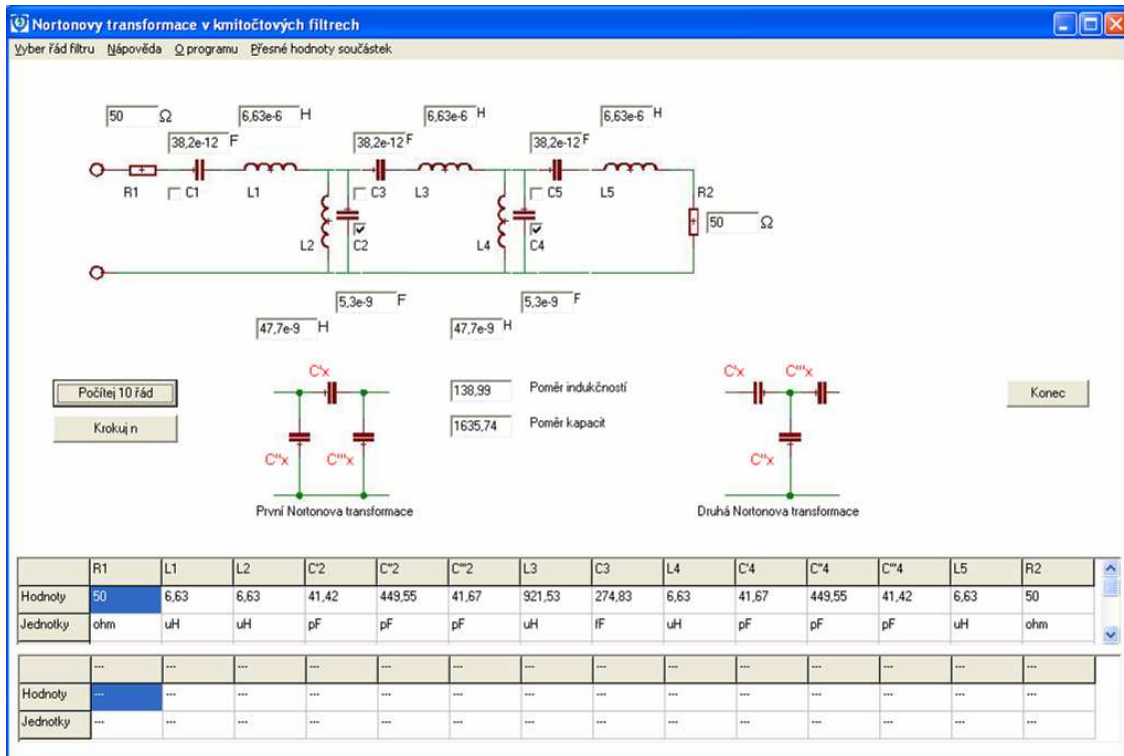
6.3. KOMPLETNÍ VYTVOŘENÍ PROGRAMU



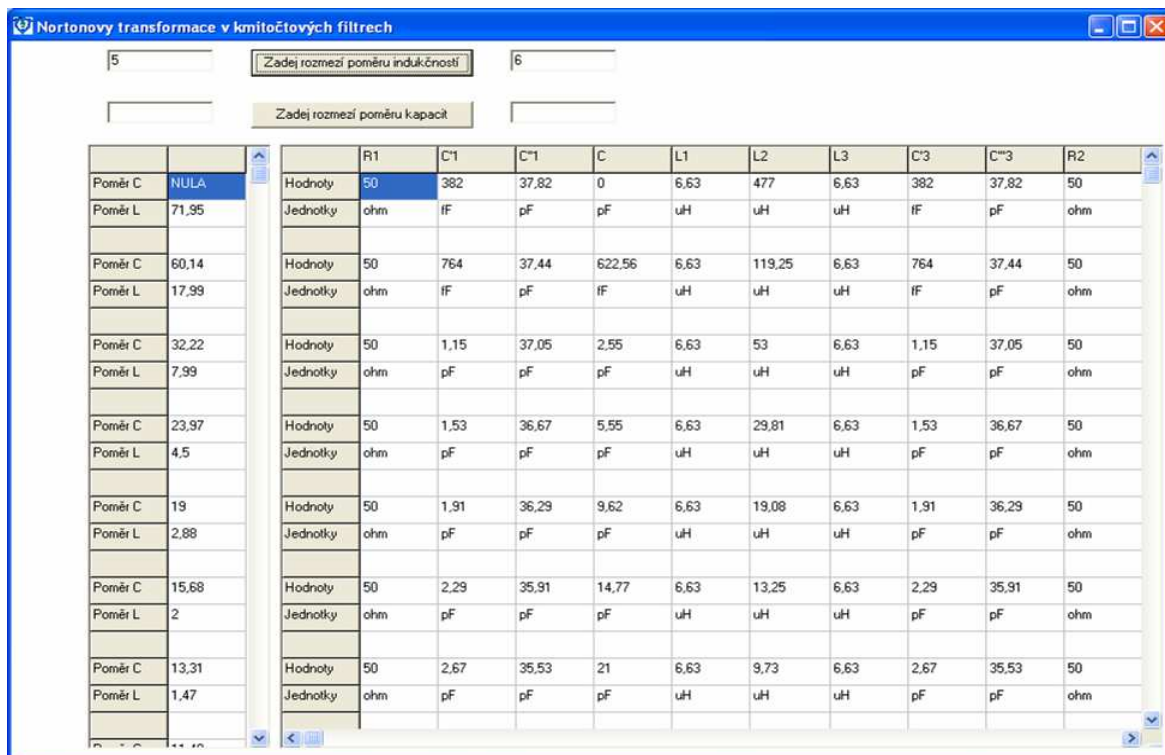
Obr. č. 11: Grafická podoba úvodního programu v C++ builder



Obr. č. 12: Ukázka zobrazení jednotlivých řádů filtru



Obr. č. 13: Ukázka grafického zobrazení rozšířeného programu v C++ Builder



Obr. č. 14: Ukázka rozšířeného programu. Pásmová propust 6. řádu, transformace kapacitoru C₁ a C₃. Zobrazení hodnot při volbě automatického krokování „n“. Zadáni rozmezí poměru indukčnosti od 5 do 6.

6.4. MOŽNOSTI PROGRAMU

Výše uvedený program umožňuje:

- volbu řádů filtru
- v jakémkoli místě v příčné větvi filtru volbu jedné nebo dvou Nortonových transformací
- v jakémkoli místě v podélné větvi filtru volbu jedné nebo dvou Nortonových transformací
- zobrazení výpočtů při „n“ braném pro shodnost cívek
- zobrazení výpočtů při automatickém krokování „n“
- zobrazení poměrů indukčností a kapacitorů
- vyhledání výsledků automatického krokování „n“ zadáním rozmezí poměrů indukčností nebo kapacit
- zobrazení informací o principu Nortonových transformací
- zobrazení údajů proč a kdo program vytvořil
- zobrazení nápovědy o programu

7. ZÁVĚR

Téma Nortonovy transformace jsem se snažil pojmut tak, aby vše bylo přehledně a logicky uspořádáno, přičemž hlavní důraz jsem kladl na snadnou orientaci ve vybrané problematice.

Práci jsem rozdělil do tří částí. V první části jsem se snažil co nejvíce prostudovat tematiku kmitočtových filtrů se zaměřením na Nortonovy obvodové transformace, kterou jsem poté stručně popsal.

V druhé části jsem popsal Nortonovy obvodové transformace, a to především princip první a druhé Nortonovy transformace. Tyto transformace mají velmi mnohostranné uplatnění při optimalizaci výsledné struktury filtru, jak jsem ukázal v jednotlivých příkladech. U složitějších struktur filtrů umožňují realizovat ze základní struktury filtru různou volbou transformačního poměru „n“, počtem a umístěním transformátorů velké množství ekvivalentních variant filtrů, které mohou být využity při optimalizaci. Jednotlivé transformace se také mohou různě kombinovat. Stává se, že optimálního řešení je dosaženo až po použití několika transformací. Cenou za zlepšení výsledných vlastností obvodu je komplikovanější návrh a většinou i zvýšení počtu součástí výsledné struktury. Proto je třeba vždy každou transformaci a její účelnost i celkový vliv na výsledné parametry filtru dobře ze všech hledisek zvážit.

Poslední část se již věnuje vytvářenému programu, který jsem realizoval v programu C++ Builder. Tvorba programu vycházela z určitých požadavků, které měl daný program umožňovat. Z těchto požadavků jsem si vytvořil vývojový diagram, který mi udával postup při programování. Při realizaci programu jsem nejprve

vytvořil grafickou podobu, jejíž součástí je i filtr typu pásmové propusti „n“ řádu, na kterém se realizuje použití Nortonových transformací. Po vytvoření grafické podoby jsem přešel k vlastnímu programování v jazyce C++. Zde jsem v prvním kroku naprogramoval posloupnost příkazů, aby program umožňoval zobrazovat daný filtr dle požadavku od 2. do 20. řádu. Pro tento filtr jsem poté vytvořil vhodné výpočtové algoritmy optimalizace těchto filtrů s využitím obvodových transformací, jednak při „n“ braném pro shodnost cívek, a také pro automatické krokování „n“ v rozmezí od 0,01 do 1 po kroku 0,01. Poté jsem jen určil místa v tabulce pro vypsání výsledků a nadefinoval, u jakých kondenzátorů se má v případě požadavku provádět Nortonova transformace. Vzhledem k velkému množství kombinací v daném filtru jsem se rozhodl, že by měl program umožňovat v jakémkoli místě v příčné, nebo podélné větvi filtru volbu jedné nebo dvou Nortonových transformací. V posledním kroku jsem vytvořil algoritmus, aby program zobrazoval poměry indukčností a kapacit z výsledných hodnot jednotlivých prvků, a také vyhledání výsledků automatického krokování „n“ zadáním potřebných rozmezí poměrů indukčností, nebo kapacit. Program také obsahuje informace o principu Nortonových transformací, dále údaje o nápovědě a údaje o tom, kdo a proč daný program vytvořil.

Na tomto programu je možné i dále pracovat, vzhledem k existenci velkého množství použití různých variant Nortonových transformací. Doporučil bych v programu vytvořit společné kombinace první i druhé Nortonovy transformace a zrealizovat možnost transformovat více prvků najednou a to nejen kondenzátory, ale i cívky. Bylo by také vhodné program doplnit o větší množství různých filtrů, které by se v daném programu zobrazovali v závislosti na zadaném tolerančním poli, typu filtru a řádu filtru. Doporučil bych daný program realizovat pomocí většího počtu funkcí pro jednotlivé problematiky programování např. zobrazování jednotlivých řádů filtru, výpočty Nortonových transformací

Závěrem bych dodal, že tato problematika nebyla ještě nikdy počítačově řešena vzhledem k téměř nekonečným možnostem různých kombinací použití Nortonových transformací.

LITERATURA

- [1] Hájek, K., Sedláček, J.: Kmitočtové filtry. BEN, technická literatura, Praha 2002.
- [2] Dostál, T., Axman, V.: Elektrické filtry. VUTUM, technická literatura, BRNO 2004.
- [3] Chen, W.K.: The circuits and filters handbook. CRC Press, Florida 2000.