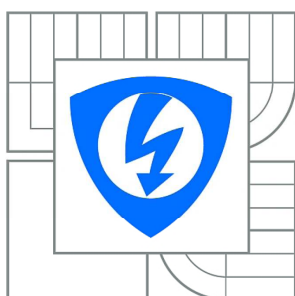


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

FÁZOVACÍ ČLÁNKY S RŮZNÝMI AKTIVNÍMI PRVKY

ALL-PASS FILTERS WITH VARIOUS ACTIVE DEVICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

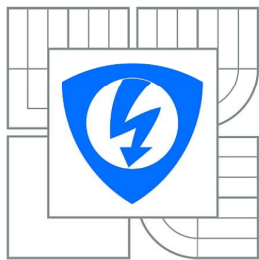
JAKUB NOVOTNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ PETRŽELA, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Jakub Novotný

ID: 125567

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Fázovací články s různými aktivními prvky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se jak z principem funkce analogových fázovacích článků, tak rovněž s jejich obvodovými realizacemi pomocí moderních aktivních funkčních bloků. Promyslete si strukturu laboratorní úlohy na téma všepropustné fázovací články.

Na základě předchozí etapy řešení projektu napište teoretický úvod a specifikujte jednotlivé body zadání laboratorní úlohy. Vycházejte z předpokladu, že bude vytvořen přípravek obsahující tři rozdílná zapojení. Tento přípravek vytvořte a experimentálně ověřte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DOSTÁL, T. Teorie elektronických obvodů. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.

[2] DOSTÁL, T. Elektrické filtry. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 1997.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tématem semestrálního projektu je podat přehled o funkci a využití analogových fázovacích článků. Zabývá se jejich konkrétní realizací pomocí aktivních funkčních bloků, tj. pomocí transadmitančního zesilovače LT1228 výrobce Linear Technology, pomocí transimpedančního zesilovače AD844 výrobce Analog Devices a pomocí negativního tříbranového proudového konveju druhé generace EL2082 výrobce Intersil (dříve Elantec). Dále načrtává koncepci laboratorní úlohy na téma všepropustné fázovací články s výše zmíněnými integrovanými obvody. Úloha bude sestávat ze tří samostatných celků.

KLÍČOVÁ SLOVA

LT1228, AD844, EL2082, laboratorní úloha, všepropustné fázovací články, aktivní prvky

ABSTRACT

The theme of the semester project is to provide an overview of the function and use of analogue all-pass filters. It deals with their specific implementation using active functional blocks, i. e. using LT1228 transconductance amplifier manufactured by Linear Technology, using transimpedance amplifier AD844 manufactured by Analog Devices and using negative three port second generation current conveyor EL2082 manufactured by Intersil (formerly Elantec). Further outlines the concept of laboratory exercises on all-pass filters with the aforementioned integrated circuits. The exercise will consist of three separate units.

KEYWORDS

LT1228, AD844, EL2082, laboratory exercise , all pass filters, active devices

NOVOTNÝ, J. *Fázovací články s různými aktivními prvky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 73s., 35 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: ing. Jiří Petržela, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Fázovací články s různými aktivními prvky* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu semestrální práce ing. Jiří Petržela, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

OBSAH

Obsah	vii
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	12
1 Úvod	13
2 Obvodové funkce a parametry	14
2.1 Základní obvodové funkce	14
2.2 Kmitočtové charakteristiky	15
2.3 Póly a nulové body	16
3 Fázovací články s běžnými prvky	22
3.1 Fázovací články prvního řádu	23
3.2 Fázovací články druhého řádu.....	24
3.3 Jednoduchý fázovací článek prvního řádu s prvky RC	25
3.4 Jednoduchý fázovací článek druhého řádu s prvky LCR.....	28
3.5 Fázovací článek prvního řádu s operačním zesilovačem	32
3.6 Fázovací článek s operačními zesilovači druhého řádu	35
4 Fázovací články s moderními aktivními prvky	39
4.1 Fázovací článek 1. řádu s pozitivním proudovým konvejorem	39
4.2 Fázovací článek 2. řádu s pozitivním proudovým konvejorem	46
4.3 Fázovací článek 1. řádu s transadmitančním zesilovačem.....	53
4.4 Fázovací článek 1. řádu s negativním proudovým konvejorem.....	62
Závěr	70
Literatura	71
Seznam symbolů, veličin a zkratk	72
Seznam příloh	73

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Lineární dvojbran.....	14
Obr. 2.2 Komplexní funkce.....	16
Obr. 2.3 Dolní propust prvního řádu.....	17
Obr. 2.4 Závislost modulu napět'ového přenosu dolní propusti 1. řádu na kmitočtu.....	18
Obr. 2.5 Závislost fáze napět'ového přenosu dolní propusti 1. řádu na kmitočtu	18
Obr. 2.6 Nulové body a póly dolní propusti 1. řádu.....	18
Obr. 2.7 Jiná varianta dolní propusti	19
Obr. 2.8 Závislost modulu napět'ového přenosu jiné dolní propusti 1. řádu na kmitočtu.....	19
Obr. 2.9 Závislost fáze napět'ového přenosu jiné dolní propusti 1. řádu na kmitočtu	19
Obr. 2.10 Nulové body a póly jiné dolní propusti 1. řádu.....	20
Obr. 2.11 Pásmová zadrž druhého řádu	20
Obr. 2.12 Závislost modulu napět'ového přenosu pásmové zadrž 2. řádu na kmitočtu	20
Obr. 2.13 Závislost fáze napět'ového přenosu pásmové zadrž 2. řádu na kmitočtu.....	21
Obr. 2.14 Nulové body a póly pásmové zadrž 2. řádu	21
Obr. 3.1 Možné rozložení nulových bodů a pólů FČ 1. řádu.....	23
Obr. 3.2 Možné rozložení nulových bodů a pólů FČ 2. řádu.....	24
Obr. 3.3 Fázovací členek 1. řádu.....	25
Obr. 3.4 Vzhled rovnice napět'ového přenosu fázovacího članku 1. řádu v programu SNAP	25
Obr. 3.5 Závislost modulu napět'ového přenosu fázovacího članku 1. řádu na kmitočtu.....	26
Obr. 3.6 Závislost fáze napět'ového přenosu fázovacího članku 1. řádu na kmitočtu	26
Obr. 3.7 Nulové body a póly fázovacího članku 1. řádu.....	27
Obr. 3.8 Fázovací členek 2. řádu.....	28
Obr. 3.9 Vzorec napět'ového přenosu fázovacího članku 2. řádu z programu SNAP.....	28
Obr. 3.10 Nulové body a póly fázovacího članku 2. řádu.....	29
Obr. 3.11 Modul napět'ového přenosu FČ s prvky RCL.....	29
Obr. 3.12 Fáze napět'ového přenosu FČ s prvky RCL.....	30
Obr. 3.13 Vzhled schématu fázovacího članku 2. řádu při simulaci programem PSpice.	30
Obr. 3.14 Závislost modulu a fáze napět'ového přenosu fázovacího članku 2. řádu na kmitočtu.....	31
Obr. 3.15 Fázovací členek 1. řádu s OZ.....	32
Obr. 3.16 Vzorec napět'ového přenosu fázovacího članku 1. řádu s OZ z programu SNAP..	32
Obr. 3.17 Nulové body a póly fázovacího članku 2. řádu.....	33
Obr. 3.18 Závislost modulu a fáze napět'ového přenosu fázovacího članku 1. řádu s OZ na kmitočtu.....	33

Obr. 3.19 Fázovací členek druhého řádu s operačními zesilovači	35
Obr. 3.20 Symbolický vzorec napětového přenosu	35
Obr. 3.21 Semisymbolický vzorec napětového přenosu	36
Obr. 3.22 Rozložení nulových bodů a pólů.....	36
Obr. 3.23 Modul napětového přenosu	37
Obr. 3.24 Fáze napětového přenosu	37
Obr. 3.25 Závislost modulu a fáze napětového přenosu fázovacího članku 2. řádu pro $C=10\text{nF}$ s operačními zesilovači na kmitočtu	38
Obr. 3.26 Závislost modulu a fáze napětového přenosu fázovacího članku 2. řádu pro $C=500\text{nF}$ s operačními zesilovači na kmitočtu	38
Obr. 4.1 Fázovací členek 1. řádu s pozitivním proudovým konvejorem	39
Obr. 4.2 Koeficienty CCII+ v programu SNAP (Převzato z [8]).....	39
Obr. 4.3 Nulové body a póly fázovacího članku 1. řádu s pozitivním proudovým konvejorem	40
Obr. 4.4 Vzorec napětového přenosu fázovacího članku 1. řádu s CCII+ z programu SNAP	40
Obr. 4.5 Závislost modulu napětového přenosu fázovacího članku 1. řádu s CCII+ na kmitočtu.....	41
Obr. 4.6 Závislost fáze napětového přenosu fázovacího članku 1. řádu s CCII+ na kmitočtu.	41
Obr. 4.7 Fázovací členek 1. řádu s pozitivním proudovým konvejorem AD844	42
Obr. 4.8 Závislost modulu a fáze napětového přenosu fázovacího članku 1. řádu s pozitivním konvejorem na kmitočtu.	42
Obr. 4.9 Závislost modulu a fáze napětového přenosu fázovacího članku 1. řádu s pozitivním konvejorem na kmitočtu pro různé kapacity C_2	43
Obr. 4.10 Změřený a vypočtený modul napětového přenosu FČ 1. řádu s AD844.....	44
Obr. 4.11 Změřená a vypočtená fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s AD844.....	45
Obr. 4.12 Modul a fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s AD844.....	45
Obr. 4.13 Fázovací členek druhého řádu s CCII+ v programu Snap	46
Obr. 4.14 Vzorec napětového přenosu FČ 2. řádu se dvěma CCII+	46
Obr. 4.15 Semisymbolický vzorec napětového přenosu FČ 2. řádu se dvěma CCII+	47
Obr. 4.16 Nulové body a póly FČ 2. řádu se dvěma CCII	47
Obr. 4.17 Modul napětového přenosu	48
Obr. 4.18 Fáze napětového přenosu	48
Obr. 4.19 Fázovací členek druhého řádu s CCII+ v programu PSpice	49
Obr. 4.20 Modul a fáze napětového přenosu FČ 2. řádu s AD844 pro různé hodnoty $C_1=C_2$	49
Obr. 4.21 Změřený a vypočtený modul napětového přenosu FČ 2. řádu s AD844.....	51
Obr. 4.22 Změřená a vypočtená fáze napětového přenosu FČ 2. řádu s AD844.....	51

Obr. 4.23 Modul a fáze napětového přenosu FČ 2. řádu s AD844 pro $C_1=C_2=10\text{nF}$	52
Obr. 4.24 Fázovací článek 1. řádu s prvkem OTA (VCCS) a CFA v programu Snap	53
Obr. 4.25 Symbolický vzorec napětového přenosu FČ 2. řádu s OTA + CFA	54
Obr. 4.26 Semisymbolický vzorec napětového přenosu FČ 2. řádu s OTA + CFA.....	54
Obr. 4.27 Fázovací článek 1. řádu s prvkem OTA (VCCS) a CFA v programu PSpice	56
Obr. 4.28 Modul a fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s LT1228 pro $C_1=10\text{nF}$	57
Obr. 4.29 Modul a fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s LT1228 pro různé hodnoty C_1	57
Obr. 4.30 Doporučený odporový dělič	58
Obr. 4.31 Modul a fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s LT1228 pro různé hodnoty R_x	58
Obr. 4.32 Změřený a vypočtený modul napětového přenosu FČ 1. řádu s LT1228	60
Obr. 4.33 Změřená a vypočtená fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s LT1228	60
Obr. 4.34 Modul a fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s LT1228 pro $C=10\text{nF}$ a $R_x=10\text{k}\Omega$.	61
Obr. 4.35 Koeficienty CCII- v programu SNAP (Převzato z [8]).....	62
Obr. 4.36 Fázovací článek 1. řádu s negativním proudovým konvejorem.....	62
Obr. 4.37 Vzorec napětového přenosu fázovacího článku 1. řádu s negativním proudovým konvejorem.....	63
Obr. 4.38 Nulové body a póly fázovacího článku 1. řádu s negativním proudovým konvejorem.....	63
Obr. 4.39 Modul napětového přenosu fázovacího článku 1. řádu s negativním proudovým konvejorem.....	64
Obr. 4.40 Fáze fázovacího článku 1. řádu s negativním proudovým konvejorem.....	64
Obr. 4.41 Fázovací článek 1. řádu s EL2082	65
Obr. 4.42 Závislost modulu a fáze napětového přenosu fázovacího článku 1. řádu s EL2082 na kmitočtu	65
Obr. 4.43 Závislost modulu a fáze napětového přenosu fázovacího článku 1. řádu s EL2082 na kmitočtu pro různé hodnoty C	66
Obr. 4.44 Závislost modulu a fáze napětového přenosu fázovacího článku 1. řádu s EL2082 na kmitočtu pro různé hodnoty V_{GAIN}	67
Obr. 4.45 Změřený a vypočtený modul napětového přenosu FČ 1. řádu s EL2082	68
Obr. 4.46 Změřená a vypočtená fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s EL2082	68
Obr. 4.47 Závislost modulu a fáze napětového přenosu fázovacího článku 1. řádu s EL2082 na kmitočtu pro $C_2=22\text{nF}$	69
Obr. 4.48 Měřicí přípravek.....	74
Obr. 4.49 Automatické měření rozdílu fáze osciloskopem Hewlett Packard 54603B	75
Obr. 4.50 Automatické měření rozdílu fáze osciloskopem Agilent 54624A	75
Obr. 4.51 Přední strana měřicího přípravku	76
Obr. 4.52 Zadní strana měřicího přípravku	76

Obr. 4.53 Možné rozložení nulových bodů a pólů FČ 1. řádu	83
Obr. 4.54 FČ 1. řádu s pasivními prvky Obr. 4.55 FČ 1. řádu s operačním zesilovačem...	84
Obr. 4.56 FČ 1. řádu s IO AD844 (CCII+) Obr. 4.57 FČ 1. řádu s IO LT1228 (OTA+CFA)	84
Obr. 4.58 Možné rozložení nulových bodů a pólů FČ 2. řádu	85
Obr. 4.59 FČ 2. řádu s pasivními prvky	85
Obr. 4.60 FČ 2. řádu s běžnými operačními zesilovači	85
Obr. 4.61 FČ 2. řádu se dvěma prvky CCII+	86
Obr. 4.62 Výpočet fázového přenosu.....	88
Obr. 4.63 Graf fázových charakteristik FČ s AD844.....	89
Obr. 4.64 Graf fázových charakteristik FČ s LT1228.....	91
Obr. 4.65 Graf fázových charakteristik FČ se dvěma AD844	93
Obr. 4.66 Celkové schéma	94
Obr. 4.67 Předloha	95
Obr. 4.68 Skutečný vzhled	95
Obr. 4.69 Možné rozložení nulových bodů a pólů FČ 1. řádu.....	97
Obr. 4.70 FČ 1. řádu s pasivními prvky Obr. 4.71 FČ 1. řádu s operačním zesilovačem..	98
Obr. 4.72 FČ 1. řádu s IO AD844 (CCII+) Obr. 4.73 FČ 1. řádu s IO LT1228 (OTA+CFA)	98
Obr. 4.74 Možné rozložení nulových bodů a pólů FČ 2. řádu.....	99
Obr. 4.75 FČ 2. řádu s pasivními prvky	99
Obr. 4.76 FČ 2. řádu s běžnými operačními zesilovači	99
Obr. 4.77 FČ 2. řádu se dvěma prvky CCII+	100
Obr. 4.78 Výpočet fázového přenosu.....	102
Obr. 4.79 Graf fázových charakteristik FČ s AD844.....	103
Obr. 4.80 Graf fázových charakteristik FČ s LT1228.....	104
Obr. 4.81 Graf fázových charakteristik FČ s LT1228.....	104
Obr. 4.82 Graf fázových charakteristik FČ se dvěma AD844	106
Obr. 4.83 Celkové schéma	107
Obr. 4.84 Předloha	108
Obr. 4.85 Skutečný vzhled	108

SEZNAM TABULEK

Tab. 4.2 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ s AD844	44
Tab. 4.3 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika 2. řádu FČ s AD844.....	50
Tab. 4.4 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika 1. řádu FČ s LT1228.....	59
Tab. 4.6 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ 1. řádu s EL2082.....	67
Tab. 4.7 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ s AD844	88
Tab. 4.8 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ s LT1228.....	90
Tab. 4.9 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ se dvěma AD844.....	92
Tab. 4.10 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ s AD844	102
Tab. 4.11 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ s LT1228.....	104
Tab. 4.12 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ se dvěma AD844.....	105

1 ÚVOD

Ve sdělovací technice i jinde bývá často nutno upravit fázové poměry zpracovávaných signálů. Všepropustné fázovací články umožňují upravovat průběh argumentové charakteristiky určité soustavy a to beze změny modulové charakteristiky.

Používají se při návrhu zpožďovacích článků, fázovacích korektorů, dále ve filtrech, místo integrátorů, což dovoluje zlepšit jejich stabilitu a rozšířit přenášené kmitočtové pásmo. V dnešní době narůstá význam těchto filtrů, což je i důvod k napsání této práce. Pro tvorbu fázovacích článků lze využít pasivní prvky RCL, nebo aktivní prvky, tedy operační zesilovače a jim příbuzné integrované obvody.

V laboratorní úloze budou použity tři nezávislé fázovací články s integrovanými obvody LT1228, AD844 a EL2082.

Obvod **LT1228** od výrobce Linear Technology [13] obsahuje v jednom pouzdru transadmitanční zesilovač (OTA) s šířkou pásma 75 MHz a transimpedanční zesilovač (CFA) s šířkou pásma 100 MHz. Transkonduktanci g_m prvku OTA lze nastavit pomocí vhodného proudu přivedeného na vývod I_{SET} .

Obvod **AD844** od výrobce Analog Device [11] představuje transimpedanční zesilovač s šířkou pásma 60 MHz, což je zdroj napětí řízený proudem označovaný zkratkou CFA nebo CCVS. Vzhledem k vyvedené kompenzační svorce ho lze využít jako pozitivní proudový konvektor druhé generace (CCII+).

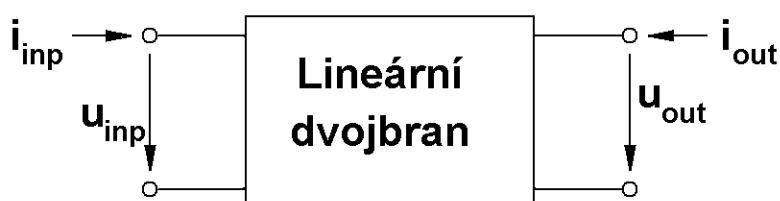
Obvod **EL2082** od výrobce Intersil (dříve Elantec) [12] je negativní proudový konvektor druhé generace, který bývá označován zkratkou CCII-. Jeho šířka pásma činí 150MHz. Parametr γ lze nastavovat pomocí napětí přivedeného na vývod V_{gain} .

2 OBVODOVÉ FUNKCE A PARAMETRY

V této kapitole bylo čerpáno především z [5].

2.1 Základní obvodové funkce

Na elektronický obvod zpracovávající určitý signál většinou nahlížíme jako na dvojbran. Dvojbranem nazýváme soustavu obvodů, která je s vnějšími obvody spojena dvěma páry svorek a přitom je zaručeno, že každý z těchto párů tvoří jednu bránu [5]. Na vstupní bránu je zpravidla přiveden zdroj signálu a na výstupní bránu je připojena zátěž. Pokud je daný dvojbran lineární, tak vstupní a výstupní napětí jsou dána jako rozdíl příslušných uzlových napětí (Obr. 2.1). Rovněž proudy protékající oběma póly jedné brány jsou až na znaménko shodné.



Obr. 2.1 Lineární dvojbran

Rozeznáváme šest **obvodových funkcí** dvojbranu. Nejprve dvě **přenosové funkce**:

Přenos napětí při výstupu naprázdno

$$K_u = \frac{U_{out}}{U_{inp}} \text{ pro } I_{out} = 0 \quad (2.1)$$

Přenos proudu při výstupu nakrátko

$$K_i = \frac{-I_{out}}{I_{inp}} \text{ pro } U_{out} = 0 \quad (2.2)$$

Dále známe čtyři imitanční funkce, z nichž dvě nazýváme bránové a dvě přenosové imitance.

Vstupní impedance naprázdno

$$Z_{inp} = \frac{U_{inp}}{I_{inp}} \text{ pro } I_{out} = 0 \quad (2.3)$$

Vstupní impedance nakrátko

$$Z_{inp} = \frac{U_{inp}}{I_{inp}} \text{ pro } U_{out} = 0 \quad (2.4)$$

Přenosová impedance při výstupu naprázdno

$$Z_T = \frac{U_{out}}{I_{inp}} \text{ pro } I_{out} = 0 \quad (2.5)$$

Každou obvodovou funkci libovolné soustavy linearizovaných obvodů lze vyjádřit jako racionální lomenou funkci, čili podíl dvou polynomů, tj. čitatele (**N**) a jmenovatele (**D**), které jsou funkcemi zobecněné kmitočtové proměnné **s** (někdy značené jako **p**) a příslušných obvodových parametrů **x** [5].

$$F(s, x) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{N(s, x)}{D(s, x)} = \frac{\sum_{j=0}^m a_j(x)s^j}{\sum_{k=0}^n b_k(x)s^k} \quad (2.6)$$

Funkce **F(s)** představují zobecnění funkcí **F(jω)**, jež popisují obvod v kmitočtové oblasti. Obecně jsou definovány podílem Laplaceových obrazů odezvy **Y(s)** a buzení obvodu **X(s)** [5].

Z předchozího vztahu lze snadno určit obraz odezvy obvodu **Y(s)**, pokud je známo známo buzení **X(s)** a obvodová funkci **F(s)**. S využitím inverzní Laplaceovy transformace potom lze vypočítat odezvu obvodu v časové oblasti [5].

$$Y(s) = F(s) \cdot X(s) \Rightarrow y(t) = LT^{-1}[Y(s)] \quad (2.7)$$

Uvedené obvodové funkce lze získat počítačem podporovanou analýzou, například programem SNAP. Je možno tyto funkce vypočítat i ručně pomocí algebraických doplňků admitanční matice obvodu [5].

2.2 Kmitočtové charakteristiky

Každá obvodová funkce **F** je komplexní funkcí (Obr. 2.2) reálného kmitočtu **f** nebo **ω**, kde $\omega = 2\pi f$ [5]. Lze ji vyjádřit následujícím vztahem

$$\hat{F}(\omega) = \text{Re}[\hat{F}(\omega)] + j \cdot \text{Im}[\hat{F}(\omega)] = F(\omega) \cdot e^{j \cdot \varphi(\omega)} = F(\omega) \angle \varphi(\omega) \quad (2.8)$$

Z něj vyplývají čtyři **druhy kmitočtových charakteristik**. Kmitočtovou závislost reálné a imaginární složky využíváme jen málokdy, například pro vyšetřování stability podle Nyquistova kritéria [5]. Většinou k popisu obvodů využíváme **modulovou charakteristiku** **F(ω)** a **argumentovou charakteristiku** **φ(ω)**.

Nejpoužívanější obvodovou funkcí je **přenos napětí**. Modulová kmitočtová charakteristika přenosu napětí je definována vztahem

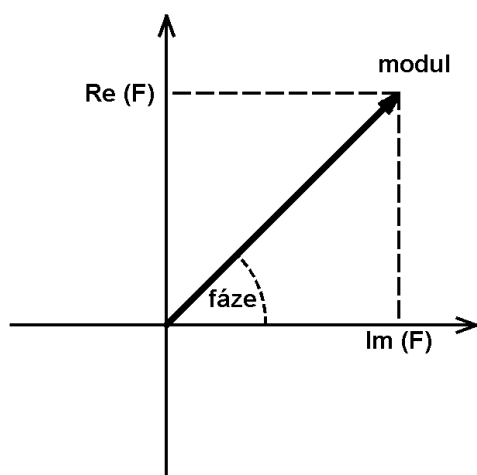
$$K(\omega) = |\hat{K}(\omega)| = \sqrt{\text{Re}(\hat{K}(\omega))^2 + \text{Im}(\hat{K}(\omega))^2} \quad (2.9)$$

Zisk v decibelech (dB) definujeme vztahem

$$k(\omega) = K(\omega)_{dB} = 20 \log K(\omega) \quad (2.10)$$

Argumentovou (fázovou) kmitočtovou charakteristiku lze vypočítat ze vztahu

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im} \hat{K}(\omega)}{\text{Re} \hat{K}(\omega)} \quad (2.11)$$



Obr. 2.2 Komplexní funkce

2.3 Póly a nulové body

Libovolnou obvodovou funkci vyššího řádu je možno postupně sestavovat z dílčích obvodových funkcí, nebo-li realizovat ji skládáním odpovídajících dílčích jednodušších podobvodů [5]. Původní funkce je rozložena na kořenové činitele

$$F(s) = \frac{\sum_{j=0}^m a_j s^j}{\sum_{k=0}^n b_k s^k} = F_0 \frac{(s-z_1)(s-z_2)(s-z_3)\dots(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)(s-p_3)\dots(s-p_n)} = \frac{\prod_{j=1}^m (s-z_m)}{\prod_{k=1}^n (s-p_n)} \quad (2.12)$$

V předchozím vztahu je počáteční hodnota obvodové funkce (počáteční přenos) dána

$$F_0 = \frac{a_0}{b_0} \quad (2.13)$$

Kořeny čitatele ve vztahu z_j nazýváme nulovými body a kořeny jmenovatele p_k jsou póly obvodové funkce. Odborník z jejich počtu, polohy a případně migrace dovede odvodit chování a vlastnosti obvodu [5].

Nyní bude uvedeno několik příkladů [9].

Nulový bod v počátku

Jedná se o induktor, pokud předpokládáme, že obvodovou funkcí je impedance.

$$\text{Přenos bude } K(s) = K_0 s. \quad (2.14)$$

$$\text{Kmitočtová charakteristika bude } K(j\omega) = K_0 j\omega. \quad (2.15)$$

$$\text{Modulová kmitočtová charakteristika bude } K(\omega) = K_0 \omega \text{ a zisk bude} \quad (2.16)$$

$$k(\omega) = 20\log(K_0) + 20\log(\omega). \quad (2.17)$$

$$\text{Argumentová charakteristika bude } \varphi(\omega) = \varphi_0 + \pi/2. \quad (2.18)$$

Pól v počátku

Jedná se o kapacitor, pokud předpokládáme, že obvodovou funkcí je impedance.

$$\text{Přenos bude } K(s) = K_0/s. \quad (2.19)$$

$$\text{Kmitočtová charakteristika bude } K(j\omega) = K_0/j\omega. \quad (2.20)$$

$$\text{Modulová kmitočtová charakteristika bude } K(\omega) = K_0/\omega \text{ a zisk bude} \quad (2.21)$$

$$k(\omega) = 20\log(K_0) - 20\log(\omega). \quad (2.22)$$

$$\text{Argumentová charakteristika bude } \varphi(\omega) = \varphi_0 - \pi/2 \quad (2.23)$$

Reálný záporný nulový bod

$$\text{Přenos bude } K(s) = 1 + s/z_1 = (s + z_1)/z_1 = K_0(s + z_1). \quad (2.24)$$

$$\text{Kmitočtová charakteristika bude } K(j\omega) = 1 + j\omega/z_1. \quad (2.25)$$

$$\text{Modulová kmitočtová charakteristika bude } k(\omega) = 20 \log \left(\sqrt{z_1^2 + \omega^2} \right) - 20 \log(z_1) \quad (2.26)$$

$$\text{Argumentová charakteristika bude } \varphi(\omega) = \arctg(\omega/z_1) \quad (2.27)$$

Reálný kladný nulový bod

$$\text{Přenos bude } K(s) = 1 - s/z_1 = (z_1 - s)/z_1. \quad (2.28)$$

$$\text{Kmitočtová charakteristika bude } K(j\omega) = 1 - j\omega/z_1. \quad (2.29)$$

$$\text{Modulová kmitočtová charakteristika bude } k(\omega) = 20 \log \left(\sqrt{z_1^2 + \omega^2} \right) - 20 \log(z_1) \quad (2.30)$$

$$\text{Argumentová charakteristika bude } \varphi(\omega) = \arctg(-\omega/z_1) \quad (2.31)$$

Reálný záporný pól

$$\text{Přenos bude } K(s) = (1 + s/p_1)^{-1} = p_1 / (s + p_1). \quad (2.32)$$

$$\text{Kmitočtová charakteristika bude } K(j\omega) = (1 + j\omega/p_1)^{-1}. \quad (2.33)$$

$$\text{Modulová kmitočtová charakteristika bude } k(\omega) = 20 \log \left(p_1 / \sqrt{p_1^2 + \omega^2} \right) \quad (2.34)$$

$$\text{Argumentová charakteristika bude } \varphi(\omega) = \arctg(-\omega/p_1) \quad (2.35)$$

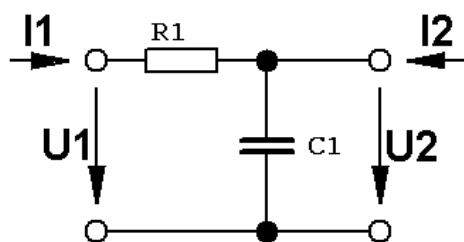
Reálný kladný pól

$$\text{Přenos bude } K(s) = (1 - s/p_1)^{-1} = p_1 / (p_1 - s). \quad (2.36)$$

$$\text{Kmitočtová charakteristika bude } K(j\omega) = (1 - j\omega/p_1)^{-1}.$$

$$\text{Modulová kmitočtová charakteristika bude } k(\omega) = 20 \log \left(p_1 / \sqrt{p_1^2 + \omega^2} \right) \quad (2.37)$$

$$\text{Argumentová charakteristika bude } \varphi(\omega) = \arctg(\omega/p_1) \quad (2.38)$$

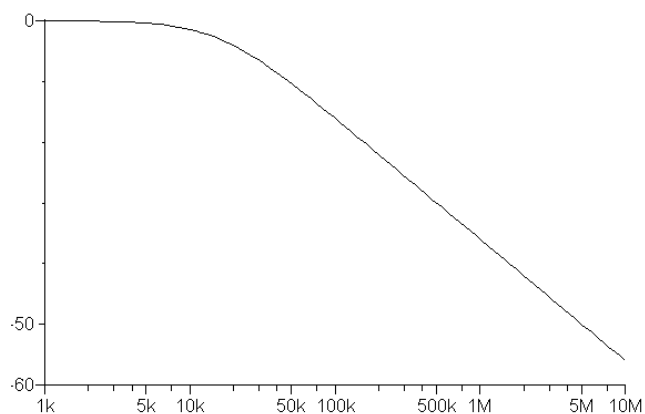
Dolní propust prvního řádu

Obr. 2.3 Dolní propust prvního řádu

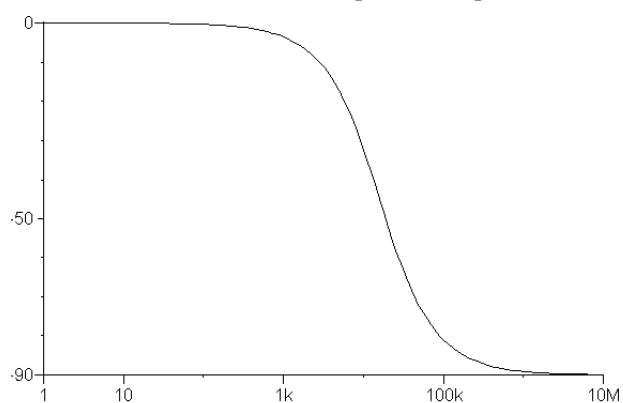
Vzorec napěťového přenosu byl získán programem SNAP.

$$K(s) = \frac{1}{1 + s \cdot R_1 \cdot C_1}, \text{ kde } s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f. \quad (2.39)$$

Byl získán modul a fáze napěťového přenosu pro $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ a $C_1 = 10 \text{ nF}$ (Obr. 2.4 a 2.5).

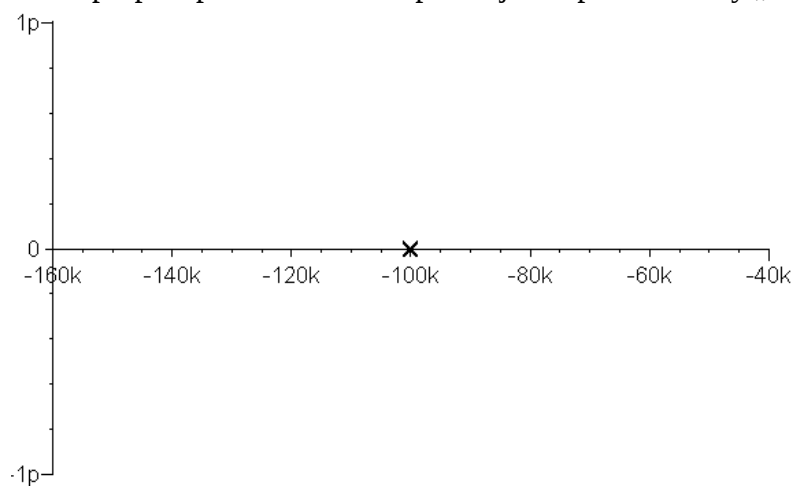


Obr. 2.4 Závislost modulu napěťového přenosu dolní propusti 1. řádu na kmitočtu



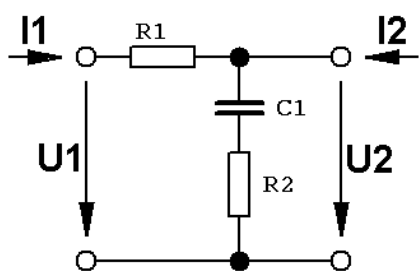
Obr. 2.5 Závislost fáze napěťového přenosu dolní propusti 1. řádu na kmitočtu

Dolní propust prvního řádu má pouze jeden pól označený „x“.



Obr. 2.6 Nulové body a póly dolní propusti 1. řádu

Dolní propust prvního řádu, jiná varianta

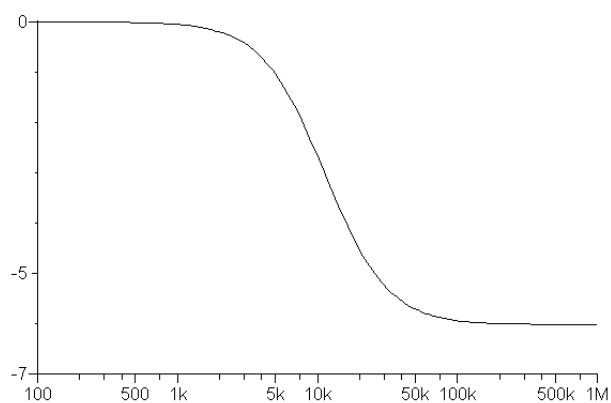


Obr. 2.7 Jiná varianta dolní propusti

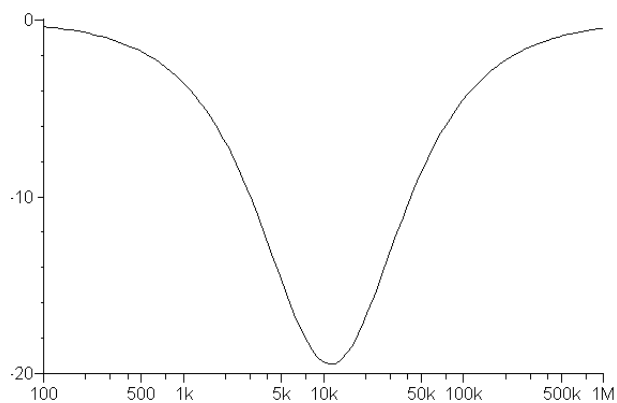
Vzorec napětového přenosu byl získán programem SNAP.

$$K(s) = \frac{1 + s \cdot C_1 \cdot R_2}{1 + s \cdot (C_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot C_1)}, \text{ kde } s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f. \quad (2.40)$$

Byl získán modul a fáze napětového přenosu pro $R_1=1\text{k}\Omega$ a $C_1=C_2=10\text{nF}$ (Obr. 2.8 a 2.9).

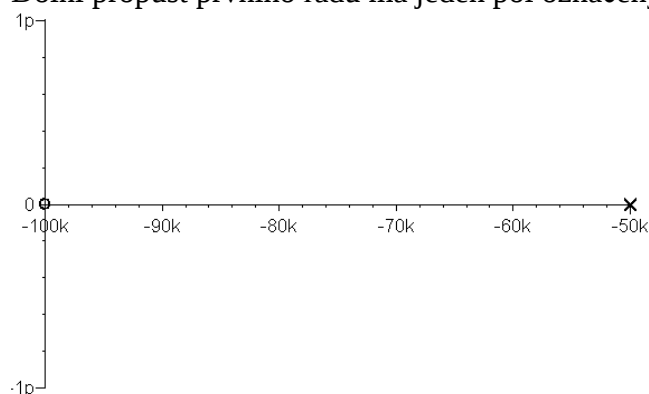


Obr. 2.8 Závislost modulu napětového přenosu jiné dolní propusti 1. řádu na kmitočtu



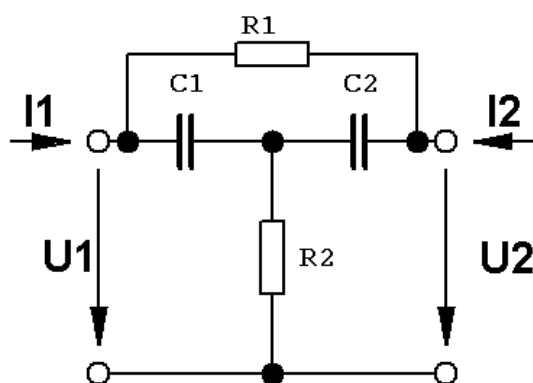
Obr. 2.9 Závislost fáze napětového přenosu jiné dolní propusti 1. řádu na kmitočtu

Dolní propust prvního řádu má jeden pól označený „×“ a jeden nulový bod „○“.



Obr. 2.10 Nulové body a póly jiné dolní propusti 1. řádu

Pásmová zadrž druhého řádu

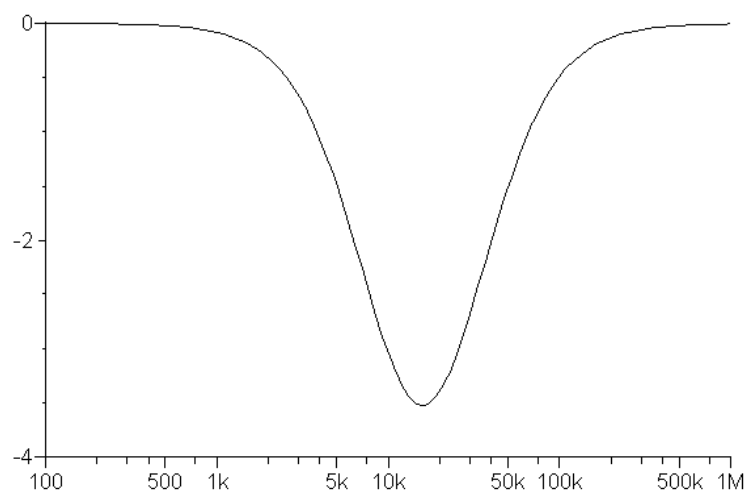


Obr. 2.11 Pásmová zadrž druhého řádu

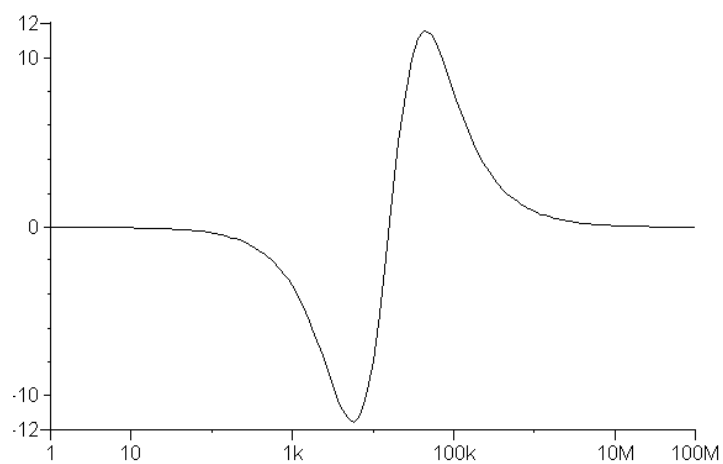
Vzorec napěťového přenosu byl získán programem SNAP.

$$K(s) = \frac{1 + s \cdot (C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_2) + s^2 \cdot (C_2 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot R_1)}{1 + s \cdot (C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_2 + C_2 \cdot R_1) + s^2 \cdot (C_2 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot R_1)} \quad (2.41)$$

Byl získán modul a fáze napěťového přenosu pro $R_1 = R_2 = 1\text{k}\Omega$ a $C_1 = C_2 = 10\text{nF}$ (Obr. 2.12 a 2.13)

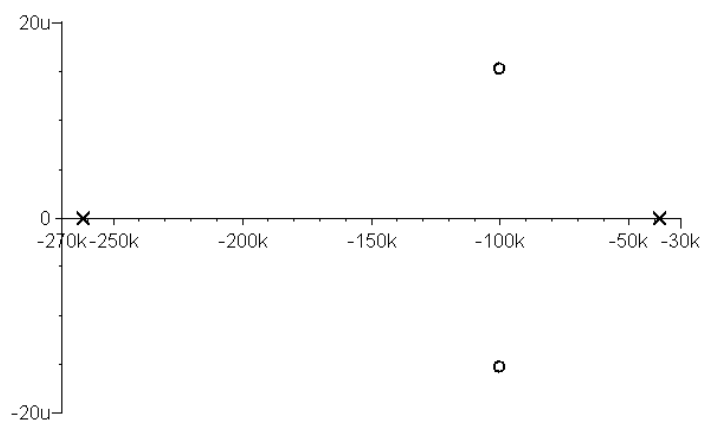


Obr. 2.12 Závislost modulu napěťového přenosu pásmové zadrž 2. řádu na kmitočtu



Obr. 2.13 Závislost fáze napěťového přenosu pásmové zadržky 2. řádu na kmitočtu

Dolní propust prvního řádu má dva póly označené „x“ a dva nulové body „o“.



Obr. 2.14 Nulové body a póly pásmové zadržky 2. řádu

3 FÁZOVACÍ ČLÁNKY S BĚŽNÝMI PRVKY

Jak již bylo řečeno, všepropustné fázovací články umožňují upravovat průběh argumentové charakteristiky určité soustavy a to beze změny modulové charakteristiky. Nacházejí využití v syntéze zpožďovacích článků, fázovacích korektorů nebo místo integrátorů ve filtrech. V poslední době narůstá význam těchto filtrů.

Přenos fázovacího článku n -tého řádu lze vyjádřit ve tvaru [9].

$$K(s) = K_0 \frac{\prod_{n=1}^N (s^2 - b_{1n}s + b_{0n})}{\prod_{n=1}^N (s^2 + b_{1n}s + b_{0n})} \quad (3.1)$$

Pro polohu nulových bodů a pólů fázovacího článku n -tého řádu platí

$$\begin{aligned} n_1 + n_2 = b_1 & \quad p_1 + p_2 = -b_1 \\ n_1 \cdot n_2 = b_0 & \quad p_1 \cdot p_2 = b_0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

V komplexní rovině dostaneme

$$\begin{aligned} (\operatorname{Re} \hat{n})^2 + (\operatorname{Im} \hat{n})^2 &= (\operatorname{Re} \hat{p})^2 + (\operatorname{Im} \hat{p})^2 \\ \operatorname{Re} \hat{n} &= -\operatorname{Re} \hat{p} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Je požadován stabilní obvod. Proto musí póly ležet v levé polorovině komplexní roviny a nulové body se musí nacházet v pravé polorovině symetricky vzhledem k imaginární ose komplexní roviny [9]. Fázovací články n -tého řádu mají konstantní modulovou kmitočtovou charakteristiku.

$$K(\omega) = K_0 \quad (3.4)$$

Fázová charakteristika fázovacího článku n -tého řádu je tvořena příspěvky všech nulových bodů a pólů přenosové funkce.

$$\varphi(\omega) = \sum_n \varphi_n = -2 \sum_n \arctan \frac{b_{1n}\omega}{1 - b_{2n}\omega^2} \quad (3.5)$$

Pro skupinové zpoždění fázovacího článku n -tého řádu bude platit

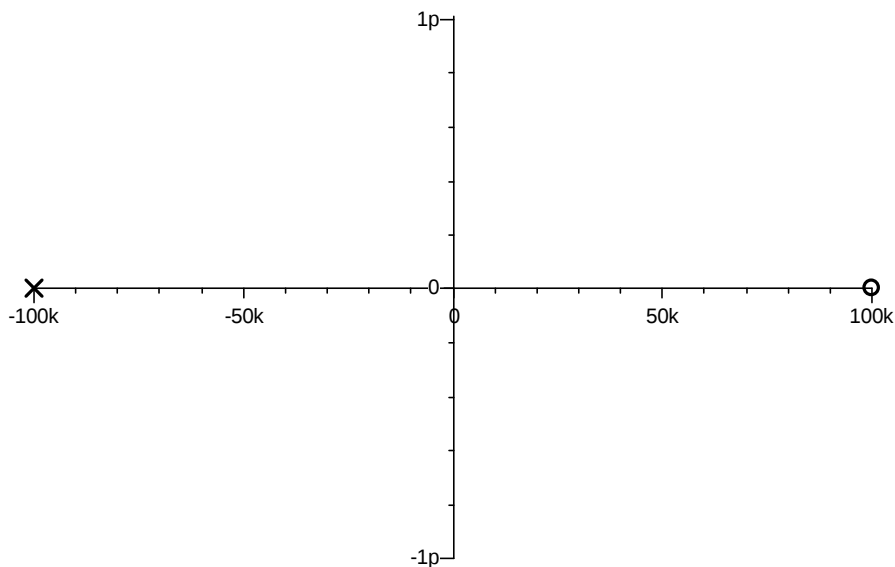
$$\tau(\omega) = \frac{1}{\pi} \sum_n \frac{b_{1n}(1 + b_{2n}\omega^2)}{1 + (b_{1n}^2 - 2b_{2n})\omega^2 + b_{2n}^2\omega^4} \quad (3.6)$$

3.1 Fázovací články prvního řádu

Fázovací články prvního řádu lze popsat rovnicí napět'ového přenosu [2]

$$K(s) = K_0 \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} \quad (3.7)$$

Rozložení nulových bodů „○“ a pólů „×“ proto musí být symetrické podle imaginární osy v komplexní rovině. Pro zajištění stability obvodu musí být pól v záporné polorovině a nulový bod v kladné. Rozložení může být následující.



Obr. 3.1 Možné rozložení nulových bodů a pólů FČ 1. řádu

Argumentová charakteristika je

$$\varphi(\omega) = -2 \cdot \arctg \frac{\omega}{b_0} \quad (3.8)$$

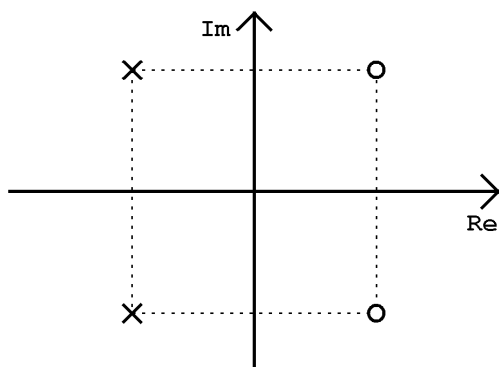
Jakost Q u těchto fázovacích článků není definovaná. Fázovací články prvního řádu lze realizovat mj. pomocí pasivních součástek nebo běžných operačních zesilovačů. V laboratorní úloze popsané později je použit IO AD844, který zde funguje jako pozitivní proudový konvektor druhé generace (CCII+) a dále LT1228, jenž představuje spojení transadmitančního zesilovače (OTA) a transimpedančního zesilovače (CFA) v jednom pouzdru.

3.2 Fázovací články druhého řádu

Fázovací články druhého řádu lze popsat rovnicí napětového přenosu [2], kde Q_p je činitel jakosti.

$$K(s) = K_0 \frac{s^2 - b_1 \cdot s + b_0}{s^2 + b_1 \cdot s + b_0} = \frac{s^2 - \frac{\omega_p}{Q_p} \cdot s + \omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} \cdot s + \omega_p^2} \quad (3.9)$$

Čítecitel a jmenovatel jsou shodné až na znaménko u druhého členu polynomu. Nulové body jsou umístěny v pravé polorovině symetricky ku dvěma komplexně sdruženým pólům.



Obr. 3.2 Možné rozložení nulových bodů a pólů FČ 2. řádu

Argumentová charakteristika je

$$\varphi(\omega) = -2 \cdot \arctg \frac{b_1 \cdot \omega}{b_0 - \omega^2} \quad (3.10)$$

Fázovací články druhého řádu lze realizovat mj. pomocí pasivních součástek RLC. Tyto zapojení se však nepoužívají kvůli značné citlivosti na velikost zátěže a kvůli snaze omezit používání drahých a obtížně realizovatelných přesných indukčností. Dále lze využít běžné operační zesilovače, tady ale bývá složitější postup návrhu. V laboratorní úloze je použit dvakrát IO AD844, který zde funguje jako pozitivní proudový konvektor druhé generace (CCII+).

3.3 Jednoduchý fázovací členek prvního řádu s prvky RC

Přenos fázovacího članku je vyjádřen ve tvaru [9]

$$K(s) = K_0 \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} \quad (3.11)$$

Je zřejmé, že přenos na nízkých kmitočtech bude $K_0 = 1$ a na vysokých kmitočtech $K_\infty = -1$. (3.12)

Fázový posuv bude dvojnásobný ve srovnání s obdobným obvodem s minimálním argumentem [9].

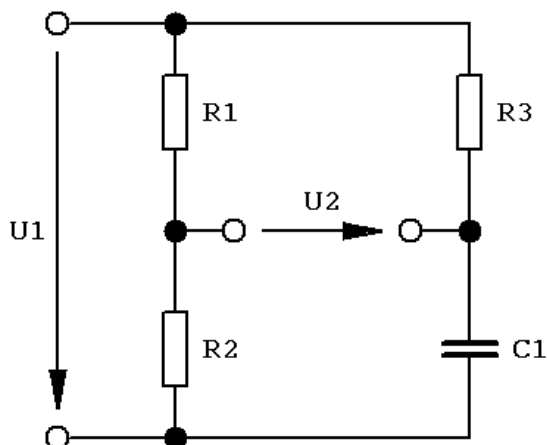
$$\varphi(\omega) = -2 \cdot \arctan(\omega) \quad (3.13)$$

Tomu odpovídá i dvojnásobné skupinové zpoždění, jehož počáteční hodnota je rovna

$$\tau(0) = \frac{b_1}{\pi} \quad (3.14)$$

Nulový bod a pól musí ležet symetricky na reálné ose.

Schéma jednoduchého pasivního fázovacího članku může vypadat následovně (Obr. 3.1).



Obr. 3.3 Fázovací členek 1. řádu.

Vzorec přenosu je získán z programu Snap (Obr. 3.2)

```

Voltage gain (open output)

Full matrix created.
Entering symbolic analysis...
Symbolic analysis OK.
Entering numeric analysis...
Matrix analysis OK.

-----symbolic-----

-R1
+s*( R2*R3*C1 )

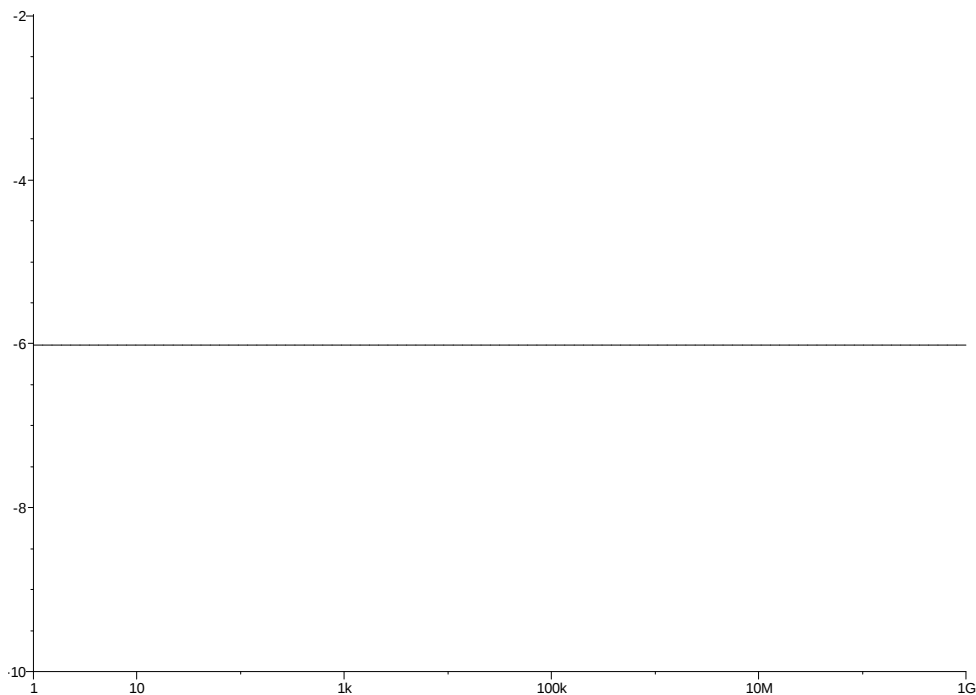
-----
R2 +R1
+s*( R2*R3*C1 +R1*R3*C1 )
    
```

Obr. 3.4 Vzhled rovnice napětového přenosu fázovacího članku 1. řádu v programu SNAP

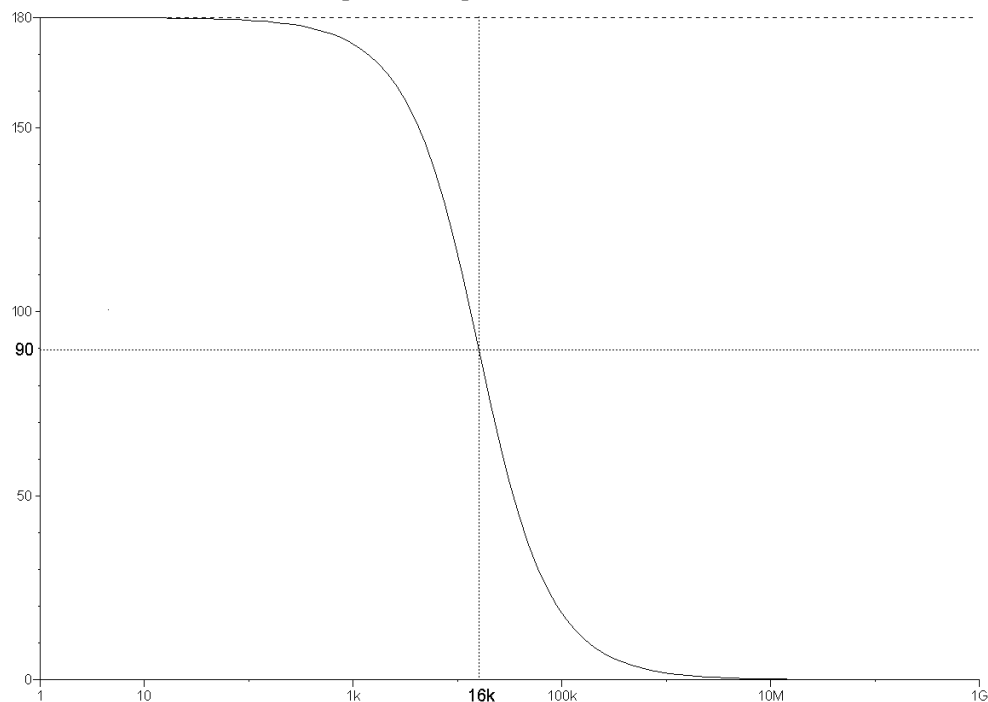
Vzorec přenosu lze přepsat do vhodnějšího tvaru. Platí, že $s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f$. (3.15)

$$K(s) = \frac{s \cdot R_2 R_3 C_1 - R_1}{s \cdot (R_2 R_3 C_1 + R_1 R_3 C_1) + R_1 + R_2} \quad (3.16)$$

Z programu Snap byl získán rovněž modul a fáze napětového přenosu pro výchozí hodnoty součástek, tj. $R_1=R_2=R_3=1\text{k}\Omega$ a $C_1=10\text{nF}$ (Obr. 3.5 a 3.6) U grafů přenosu z programu Snap se na osu **x** vynáší kmitočet a na osu **y** se vynáší modul přenosu v **dB** nebo fáze přenosu ve **stupních (°)**.

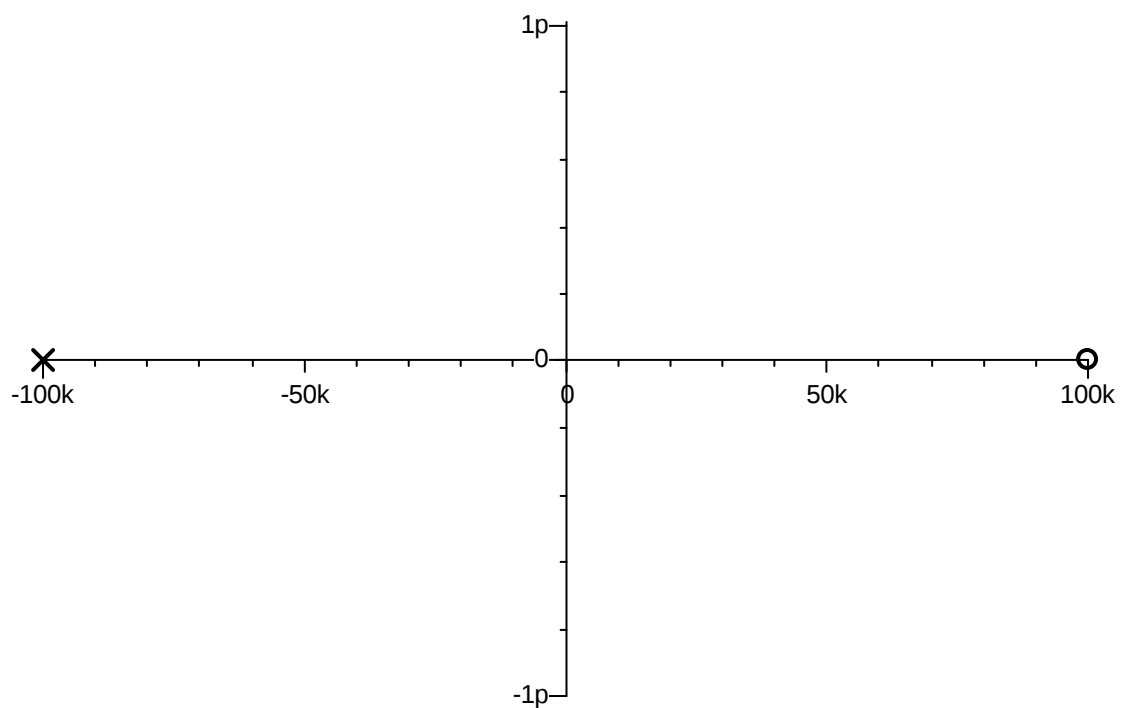


Obr. 3.5 Závislost modulu napětového přenosu fázovacího článku 1. řádu na kmitočtu



Obr. 3.6 Závislost fáze napětového přenosu fázovacího článku 1. řádu na kmitočtu
Mezní kmitočet fázovacího článku je asi 16kHz pro úhel přenosu $\varphi = 90^\circ$ (Obr. 3.6).

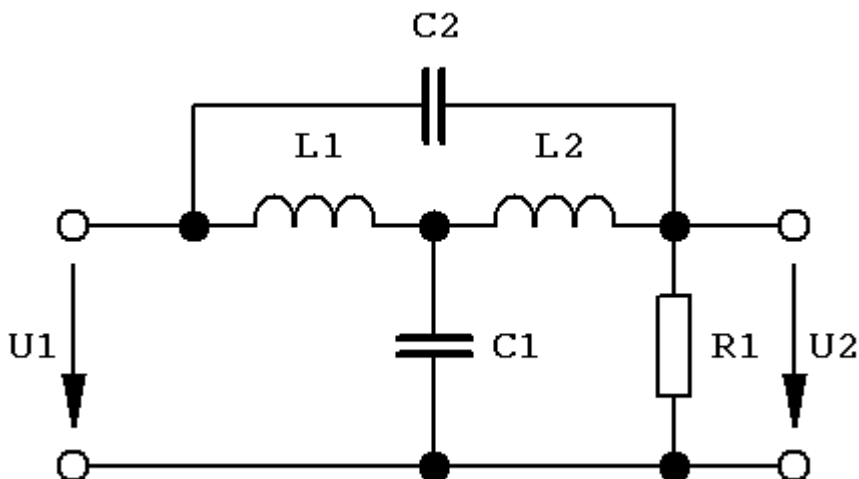
Poloha nulového body a pólu odpovídá předpokladu. Nulový bod je značen „**O**“ a pól značen „**X**“



Obr. 3.7 Nulové body a póly fázovacího članku 1. řádu

3.4 Jednoduchý fázovací členek druhého řádu s prvky LCR

Tyto fázovací články se moc nepoužívají pro svoji nadměrnou citlivost na parazitní vlastnosti použitých součástek [9]. Výhodná je pouze skutečnost, že při impedančním přizpůsobení se chovají jako ideální přenosová vedení, takže je lze libovolně kaskádně řadit bez nežádoucího ovlivňování. Pro ukázkou bude použito následující zapojení.



Obr. 3.8 Fázovací členek 2. řádu.

Budou uvažovány hodnoty $C_1=40\text{n}$, $C_2=10\text{n}$, $L_1=L_2=10\text{ }\mu\text{H}$ a $R_1=22,5\text{ }\Omega$. Pro správnou činnost obvodu je nutné dodržet hodnoty $C_1=4\times C_2$ a $L_1=L_2$.

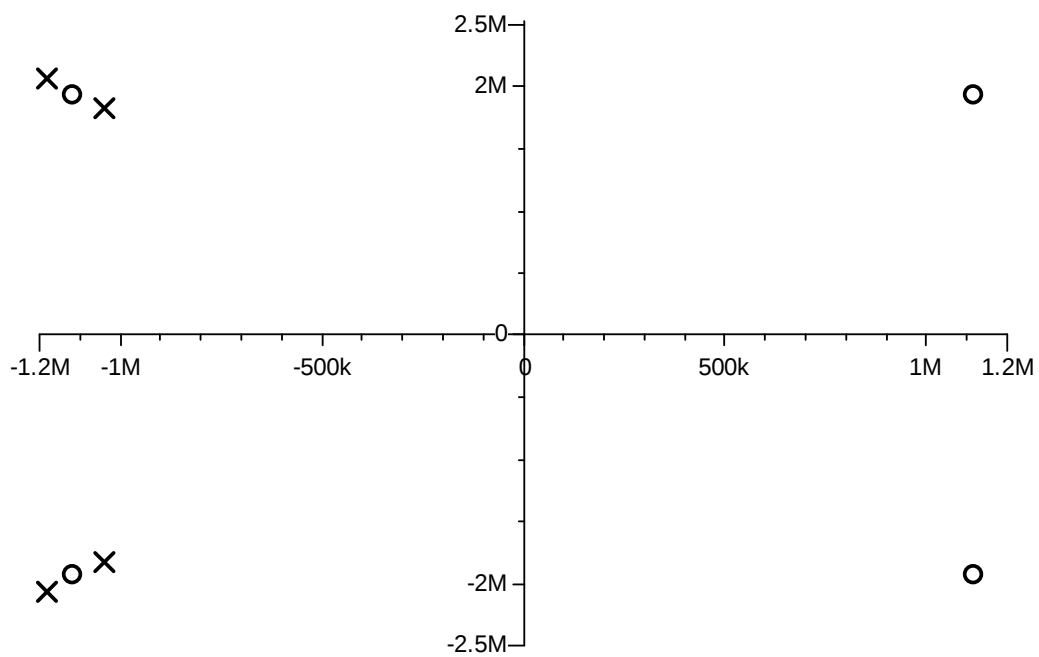
Z programu Snap byl získán vzorec pro napěťový přenos, nulové body „O“ a póly „X“, dále také modul a fáze napěťového přenosu.

```

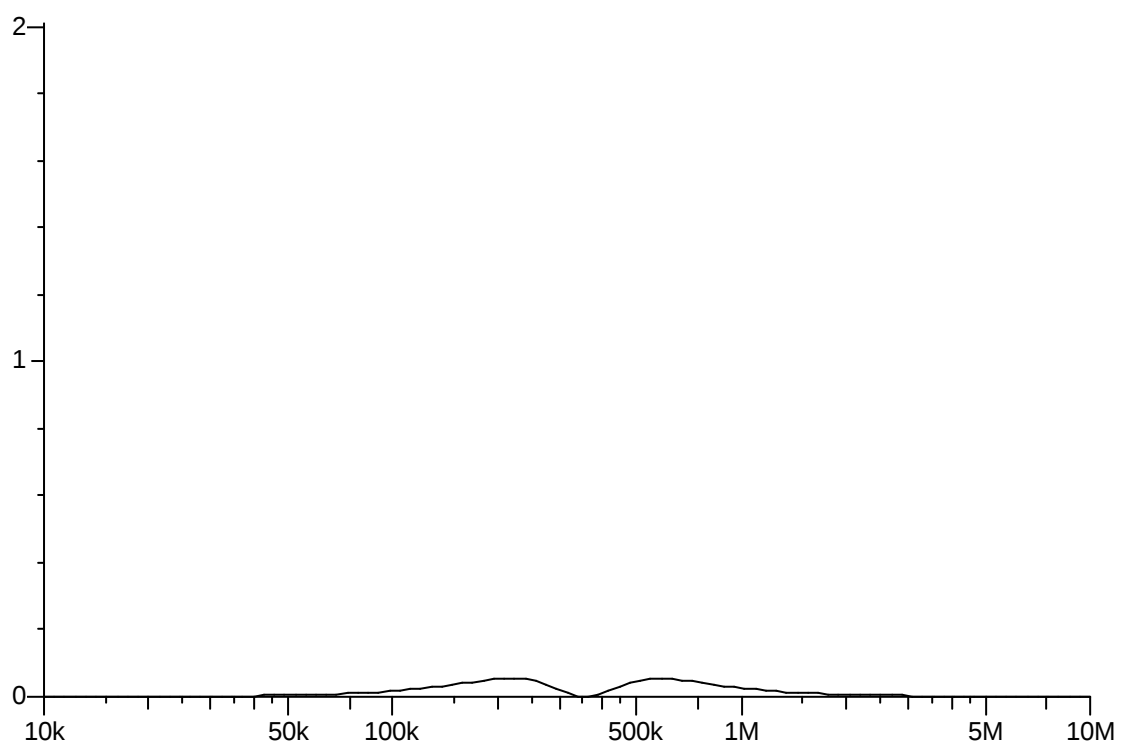
-----symbolic-----
R1
+s^(2)*( C2*L1*R1 +C2*L2*R1 )
+s^(4)*( C1*C2*L1*L2*R1 )
-----
R1
+s*( L2 +L1 )
+s^(2)*( C2*L1*R1 +C1*L1*R1 +C2*L2*R1 )
+s^(3)*( C1*L1*L2 )
+s^(4)*( C1*C2*L1*L2*R1 )

```

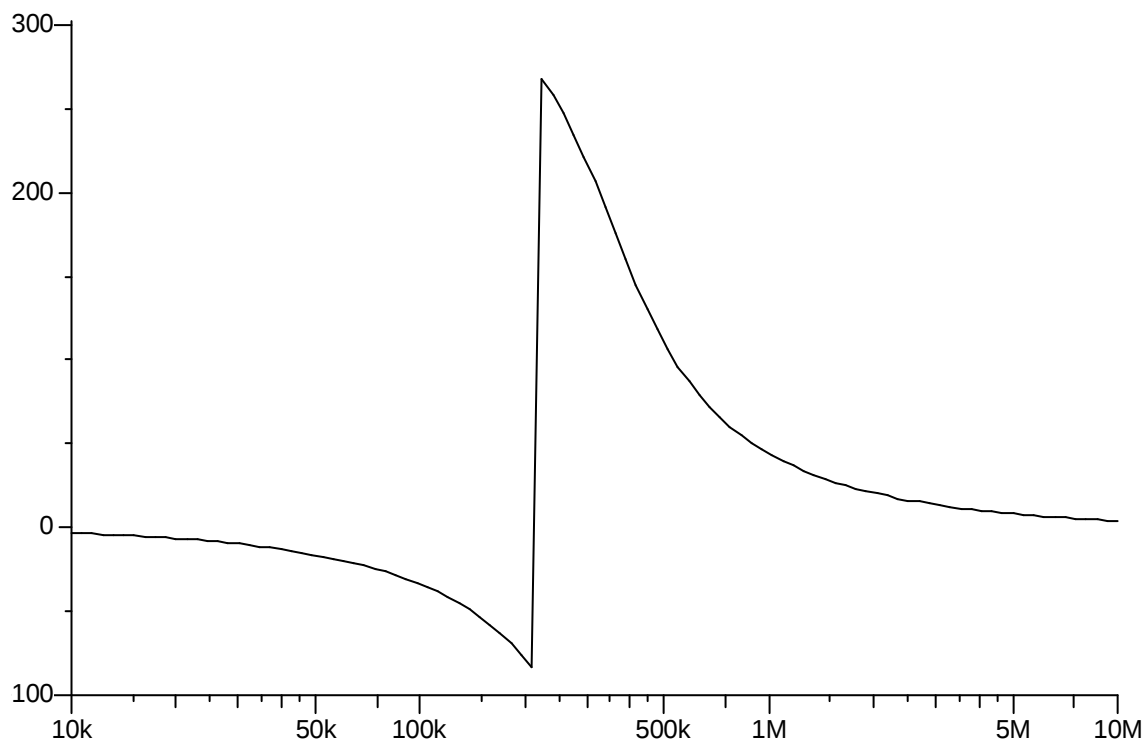
Obr. 3.9 Vzorec napěťového přenosu fázovacího članku 2. řádu z programu SNAP



Obr. 3.10 Nulové body a póly fázovacího článku 2. řádu.

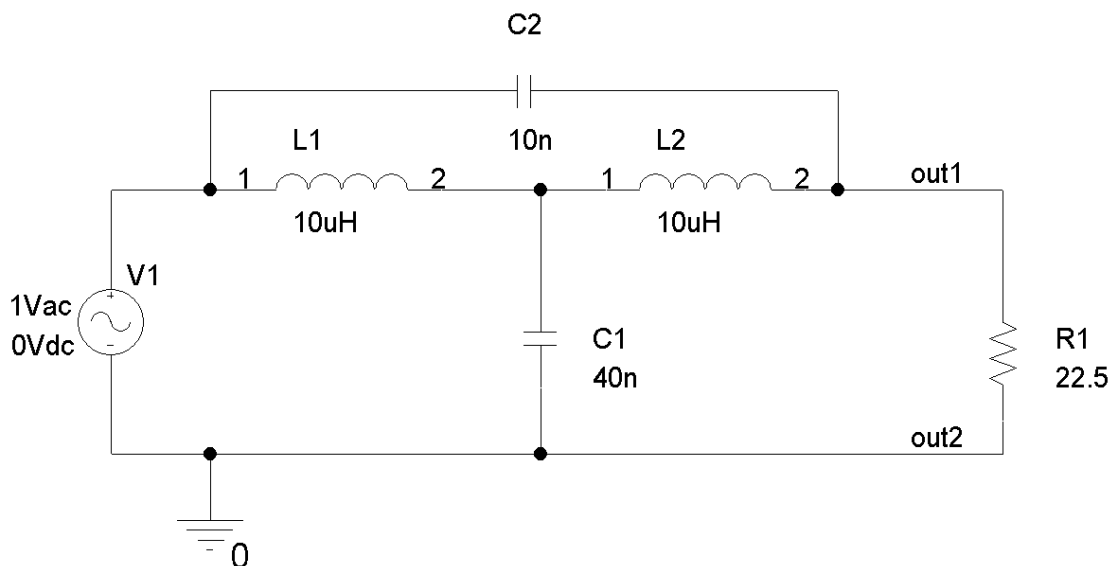


Obr. 3.11 Modul napět'ového přenosu FČ s prvky RCL



Obr. 3.12 Fáze napětíového přenosu FČ s prvky RCL

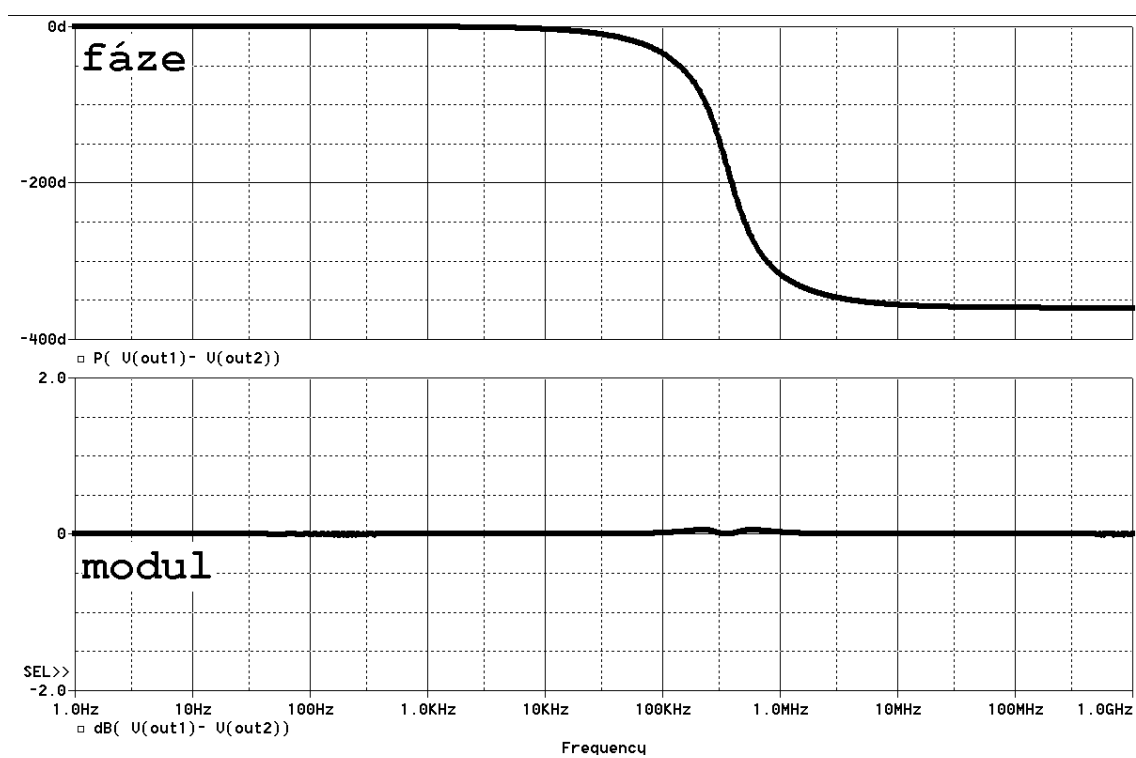
Fázovací členek bude simulován programem PSpice (Obr. 3.12). Napětíový zdroj V1 o stálé amplitudě je logaritmicke rozmítán od kmitočtu 1Hz do 1GHz.



Obr. 3.13 Vzhled schématu fázovacího članku 2. řádu při simulaci programem PSpice.

Hodnota $R_1 = 22.5 \Omega$ byla určena experimentálně tak, aby byl zaručen co nejvíce konstantní modul přenosu.

Modul a fáze napětíového přenosu je na Obr 3.10. Mezní kmitočet je asi 371kHz pro úhel přenosu $\varphi = -180^\circ$ (Obr. 3.10) .



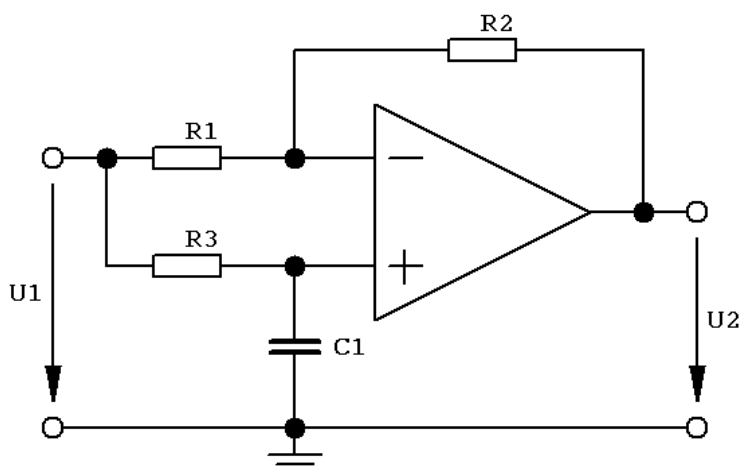
Obr. 3.14 Závislost modulu a fáze napěťového přenosu fázovacího článku 2. řádu na kmitočtu.

3.5 Fázovací členek prvního řádu s operačním zesilovačem

Mezi nejpoužívanější fázovací články patří bezesporu následující typ s operačním zesilovačem (Obr. 3.15). Oproti pasivním filtrům mají jisté výhody, jako je menší počet součástek, nesymetrický výstup a možnost oddělení zátěže [5]. Potřebují ovšem stejnosměrné napájení.

Použijeme operační zesilovač, jednu kmitočtově nezávislou cestu s R_1 a R_2 a s pasivním dvojbranem R_3C_1 . Přenos $K(s)$ celého obvodu lze vyjádřit následovně.

$$K(s) = -[M + (M+1) \cdot K_{R_3C_1}(s)], \text{ kde } M = R_2/R_1. \quad (3.17)$$



Obr. 3.15 Fázovací členek 1. řádu s OZ

-----symbolic-----

$$R1$$

$$-s \times (R3 \times C1 \times R2)$$

$$R1$$

$$+s \times (R1 \times R3 \times C1)$$

Obr. 3.16 Vzorec napětíového přenosu fázovacího článku 1. řádu s OZ z programu SNAP

Přenos získaný programem Snap (Obr. 3.12) lze přepsat do vhodnějšího tvaru. Platí, že $s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f$. (3.18)

$$K(s) = \frac{R_1 - s \cdot (R_3 \cdot C_1 \cdot R_2)}{R_1 + s \cdot (R_1 \cdot R_3 \cdot C_1)} \text{ neboli } K(\omega) = \frac{R_1 - j \cdot \omega \cdot (R_3 \cdot C_1 \cdot R_2)}{R_1 + j \cdot \omega \cdot (R_1 \cdot R_3 \cdot C_1)} \quad (3.19)$$

Pro $R_1=R_2=R_3=1\text{k}\Omega$, $f=15940\text{Hz}$ a $C_1=10\text{nF}$ dostaneme výpočtem na kalkulačce

$$K(\omega) = \frac{1000 - j \cdot 2\pi \cdot 15940 \cdot (1000 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 1000)}{1000 + j \cdot 2\pi \cdot 15940 \cdot (1000 \cdot 1000 \cdot 10 \cdot 10^{-9})} \doteq \underline{\underline{1 \angle -90,1^\circ}} \quad (3.20)$$

Pro mezní kmitočet $f=15940\text{Hz}$ je tedy skutečně modul přenosu roven 1 a fáze přenosu rovna cca -90° .

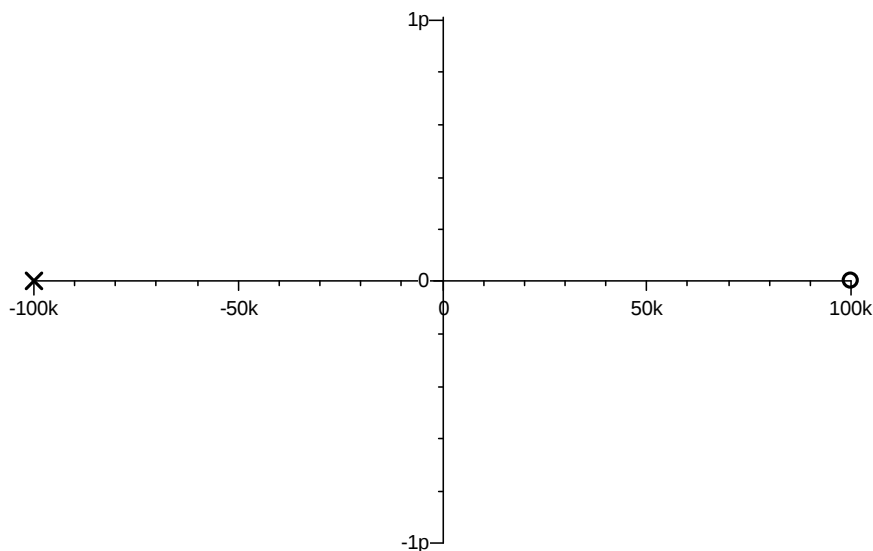
Dále vypočítáme přenos pro $R_1=R_2=R_3=1\text{k}\Omega$, $C_1=10\text{nF}$ a vysoký kmitočet $f=100\text{MHz}$.

$$K(\omega) = \frac{1000 - j \cdot 2\pi \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot (1000 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 1000)}{1000 + j \cdot 2\pi \cdot 100 \cdot 10^6 \cdot (1000 \cdot 1000 \cdot 10 \cdot 10^{-9})} \doteq \underline{\underline{1 \angle -179,98^\circ}} \quad (3.21)$$

Dále vypočítáme přenos pro $R_1=R_2=R_3=1\text{k}\Omega$, $C_1=10\text{nF}$ a nízký kmitočet $f=10\text{Hz}$.

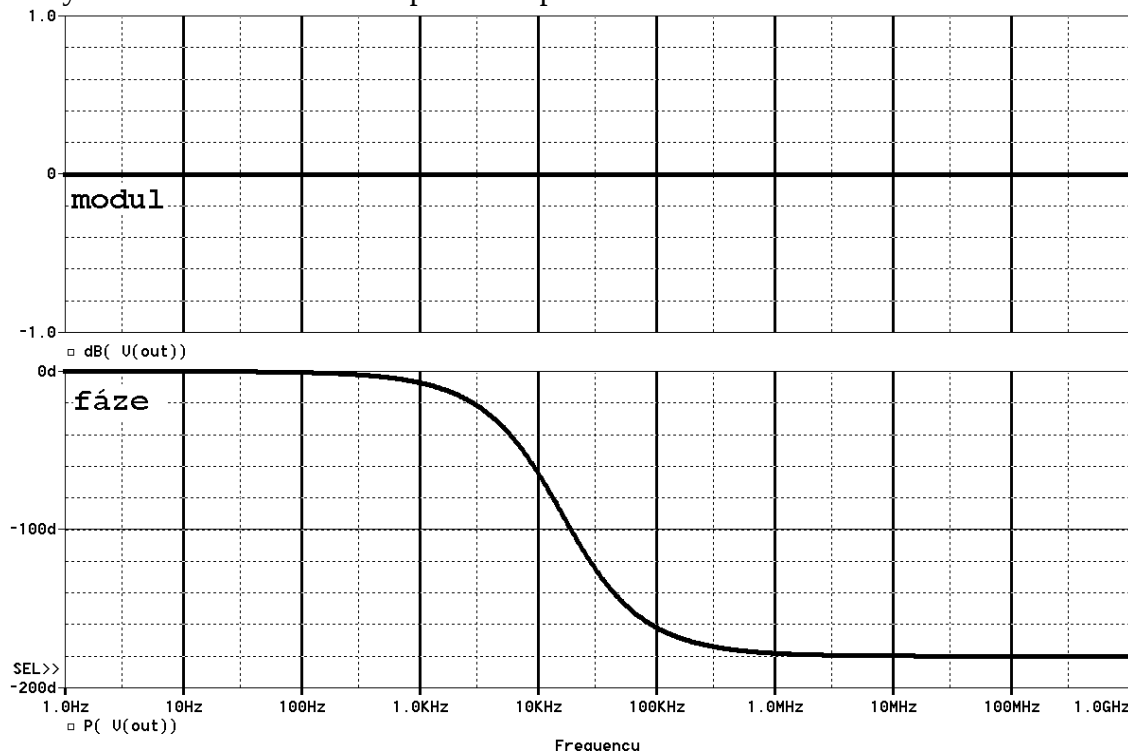
$$K(\omega) = \frac{1000 - j \cdot 2\pi \cdot 10 \cdot (1000 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 1000)}{1000 + j \cdot 2\pi \cdot 10 \cdot (1000 \cdot 1000 \cdot 10 \cdot 10^{-9})} \doteq \underline{\underline{1 \angle -0,072^\circ}} \quad (3.22)$$

Dále bylo získáno rozložení nulových bodů a pólů pro výchozí hodnotu $R_1=R_2=R_3=1\text{k}\Omega$ a $C_1=10\text{nF}$.



Obr. 3.17 Nulové body a póly fázovacího článku 2. řádu.

Fázovací článek s ideálním operačním zesilovačem byl rovněž simulován programem PSpice. Byl obdržén modul a fáze napěťového přenosu.



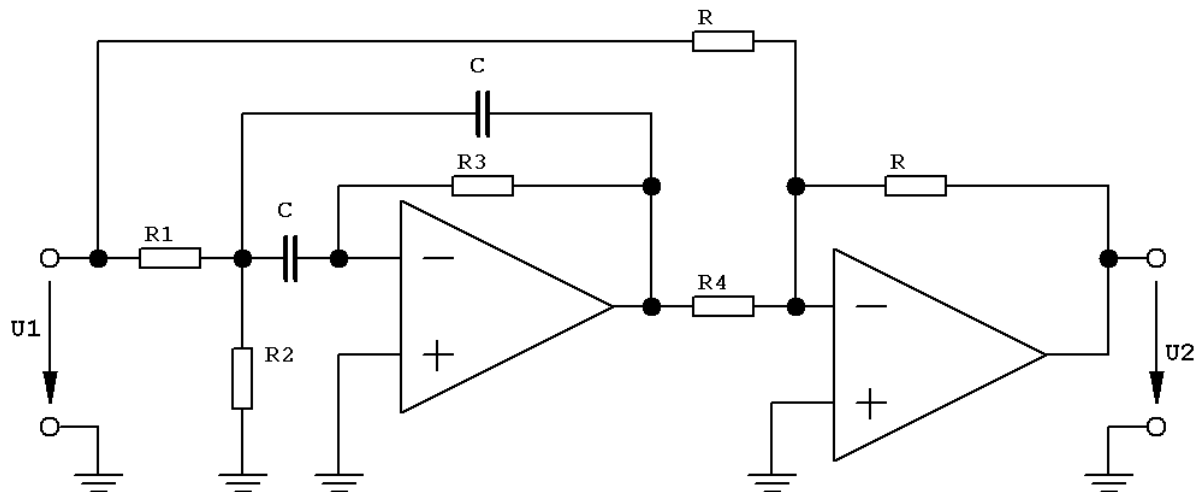
Obr. 3.18 Závislost modulu a fáze napěťového přenosu fázovacího článku 1. řádu s OZ na

kmitočtu.

Z grafu bylo pomocí kurzorů zjištěno, že mezní kmitočet je asi 15,94 kHz pro úhel přenosu $\varphi = -90^\circ$. Grafy rovněž odpovídají předchozím výpočtům.

3.6 Fázovací členek s operačními zesilovači druhého řádu

Fázovací členek druhého řádu uvádí pramen [14] včetně návrhových vztahů.



Obr. 3.19 Fázovací členek druhého řádu s operačními zesilovači

Zvolíme $C=10\text{nF}$, $R=10\text{k}\Omega$, $f=10\text{kHz}$ a jakost filtru $Q=5$. Dále vypočteme:

$$R_4 = \frac{R}{2} = \frac{10000}{2} = \underline{\underline{5\text{k}\Omega}} \quad (3.23)$$

$$R_3 = \frac{Q}{\omega \cdot C} = \frac{Q}{2\pi f \cdot C} = \frac{5}{2\pi \cdot 10000 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} \doteq \underline{\underline{7957,7\Omega}} \quad (3.24)$$

$$R_1 = \frac{R_3}{2} = \frac{7957,7}{2} \doteq \underline{\underline{3978,9\Omega}} \quad (3.25)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{2 \cdot Q^2 - 1} = \frac{3978,9}{2 \cdot 5^2 - 1} \doteq \underline{\underline{81,2\Omega}} \quad (3.26)$$

Pro dané hodnoty součástek je fázovací členek simulován programem Snap. Byl získán vzorec napět'ového přenosu, rozložení nulových bodů a pólů a graf modulu a fáze napět'ového přenosu.

```

symbolic
-----
-R4*R2*R0 -R4*R1*R0
-s*( C1*R4*R1*R2*R0 +C2*R4*R1*R2*R0 -R*C2*R3*R2*R0 )
-s^(2)*( C2*C1*R4*R1*R3*R2*R0 )
-----
R*R4*R1 +R*R4*R2
+s*( R*C1*R4*R1*R2 +R*C2*R4*R1*R2 )
+s^(2)*( R*C2*C1*R4*R1*R3*R2 )

```

Obr. 3.20 Symbolický vzorec napět'ového přenosu

Pro dané hodnoty součástek lze vzorec zjednodušit.

```

_____semisymbolic_____

K = -1

Numerator:
 1.58314209082185E+0010
-2.51414196959740E+0004 * s^(1)
 1.00000000000000E+0000 * s^(2)

Denominator:
 1.58314209082185E+0010
 2.51351011687822E+0004 * s^(1)
 1.00000000000000E+0000 * s^(2)

```

Obr. 3.21 Semisymbolický vzorec napět'ového přenosu

Neboli

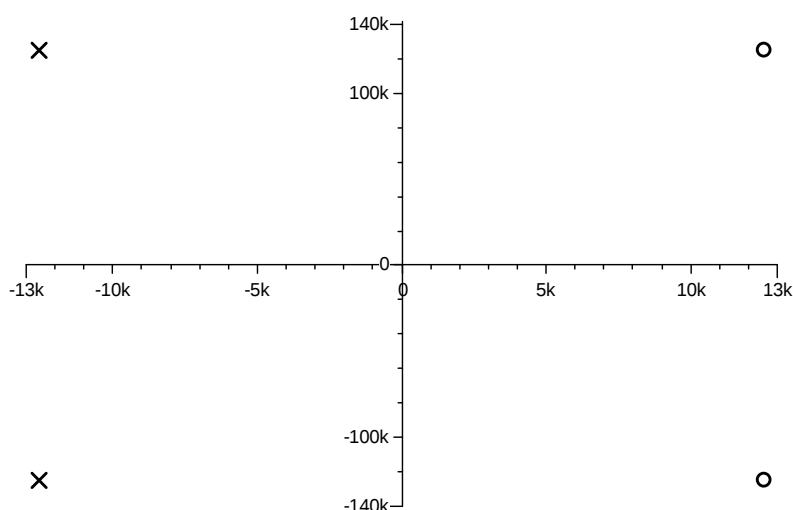
$$K(s) = -\frac{1,58314 \cdot 10^{10} - s \cdot 2,51414 \cdot 10^4 + s^2}{1,58314 \cdot 10^{10} + s \cdot 2,51414 \cdot 10^4 + s^2} \quad \text{kde } s = j \cdot 2\pi f \quad (3.28)$$

Obecně platí

$$K(s) = K_0 \frac{s^2 - b_1 \cdot s + b_0}{s^2 + b_1 \cdot s + b_0} = \frac{s^2 - \frac{\omega_p}{Q_p} \cdot s + \omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} \cdot s + \omega_p^2} \quad (3.29)$$

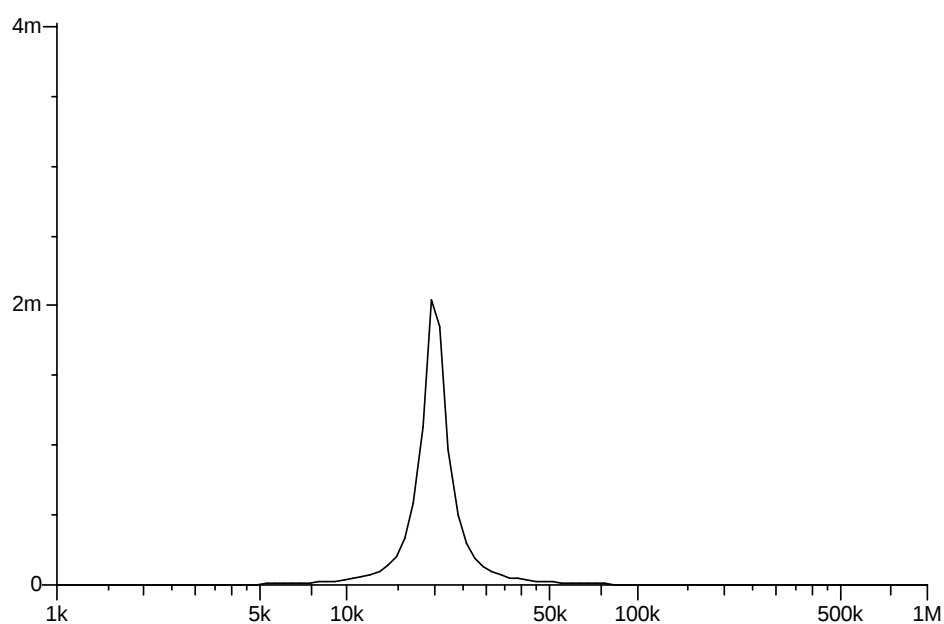
Odtud plyne, že $\omega_p = \sqrt{1,58314 \cdot 10^{10}} \doteq \underline{\underline{125822,9}}$ a $\frac{\omega_p}{Q_p} = 2,51351 \cdot 10^4$, takže

$Q_p \doteq 5,0059 \doteq \underline{\underline{5}}$ Jde tedy skutečně o fázovací členek s jakostí 5, jak bylo zprvu zvoleno

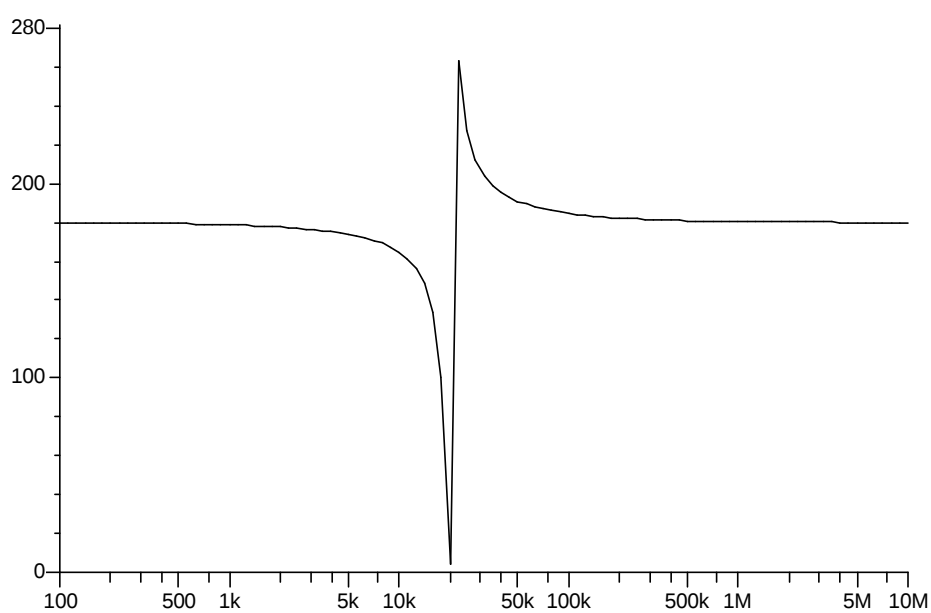


Obr. 3.22 Rozložení nulových bodů a pólů

Zvlnění modulu přenosu dosahuje pouhých 2m dB.

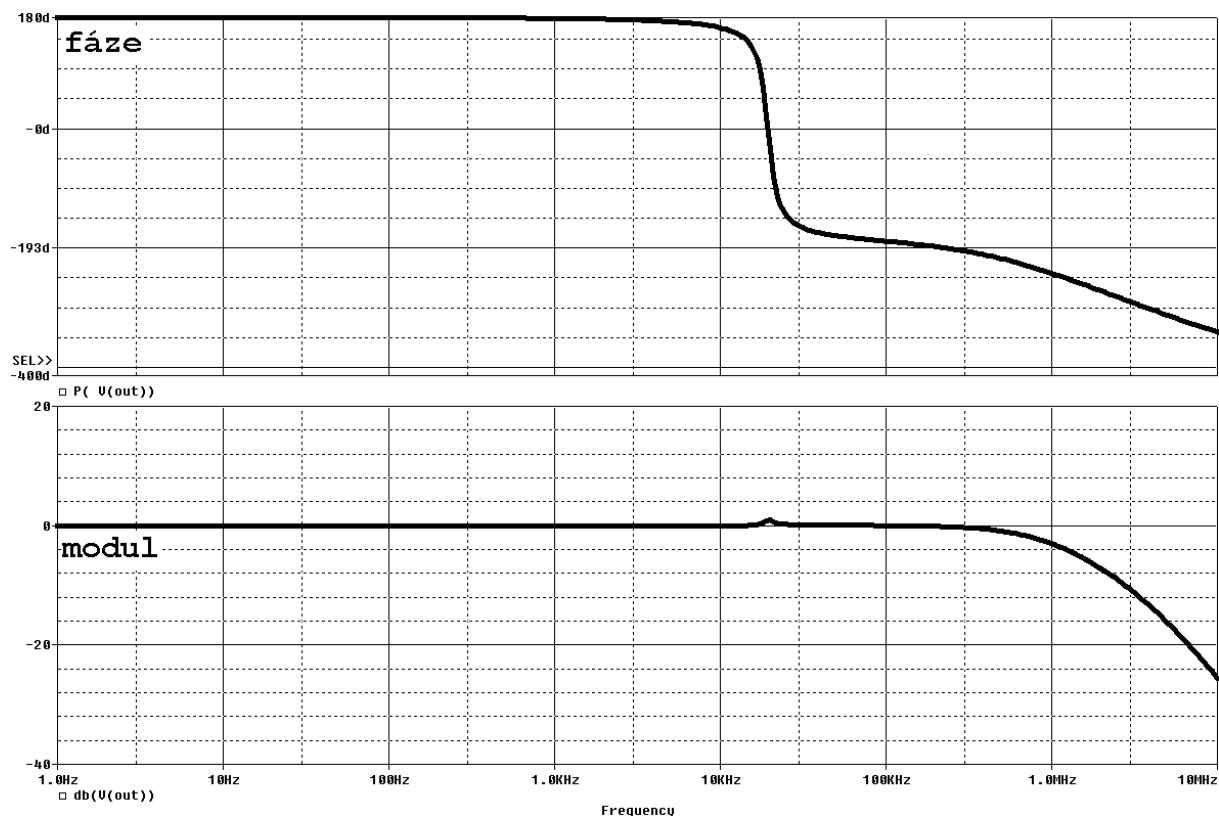


Obr. 3.23 Modul napět'ového přenosu

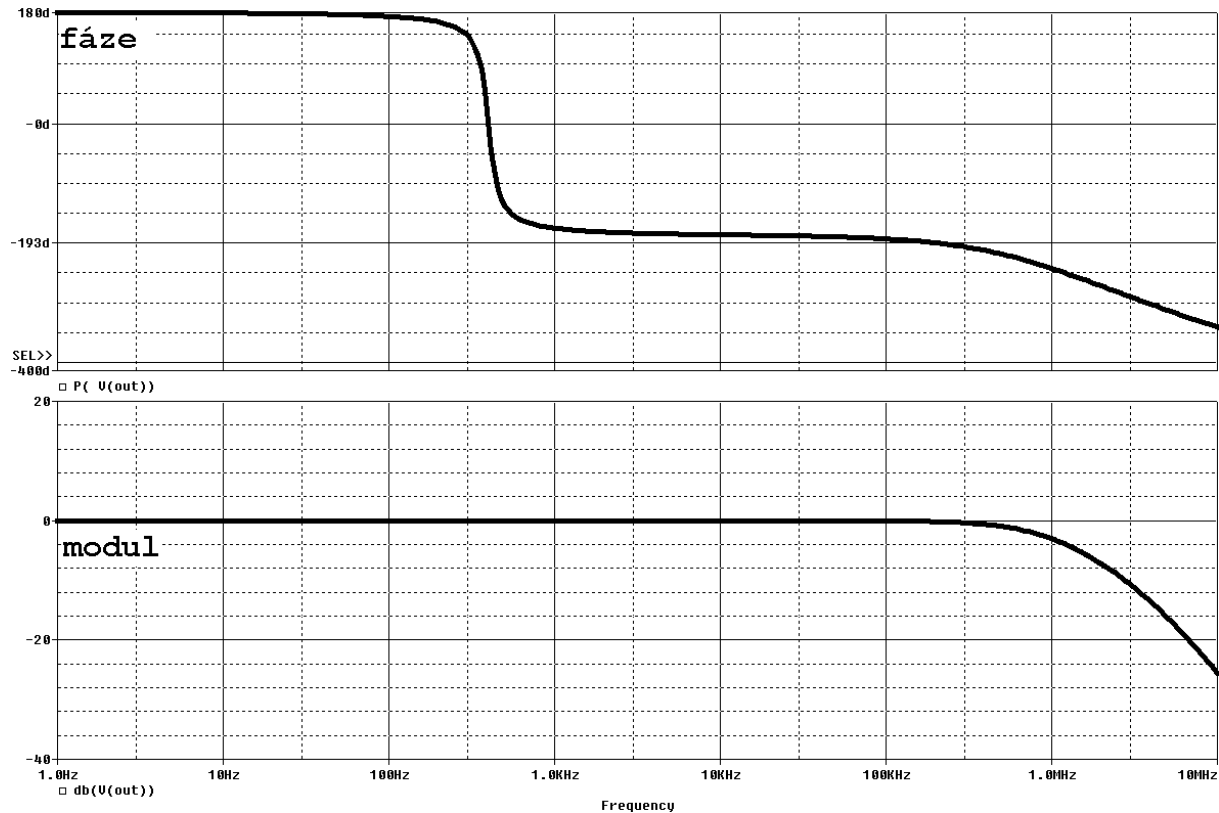


Obr. 3.24 Fáze napět'ového přenosu

Fázovací článek s operačním zesilovačem byl simulován i v programu PSPice (Obr. 3.25 a 3.26) pro dříve zmíněné hodnoty součástek s operačními zesilovači TL082. Tyto jsou v daném použitelné pouze do kmitočtu cca 1 MHz. Fázovací článek lze přelad'ovat změnou kondenzátorů C.



Obr. 3.25 Závislost modulu a fáze napět'ového přenosu fázovacího článku 2. řádu s operačními zesilovači na kmitočtu pro $C=10\text{nF}$



Obr. 3.26 Závislost modulu a fáze napět'ového přenosu fázovacího článku 2. řádu s operačními zesilovači na kmitočtu pro $C=500\text{nF}$

4 FÁZOVACÍ ČLÁNKY S MODERNÍMI AKTIVNÍMI PRVKY

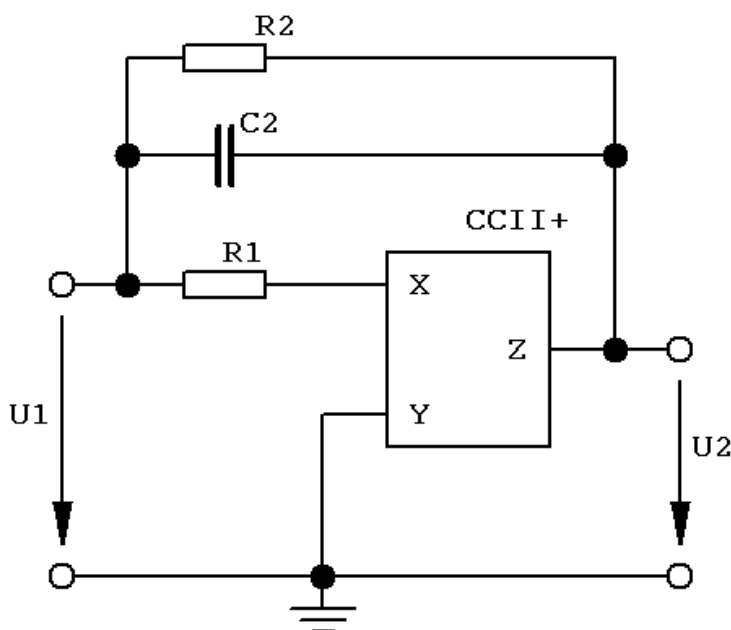
4.1 Fázovací členek 1. řádu s pozitivním proudovým konvejozem

Obvod **AD844** od výrobce Analog Device [11] představuje transimpedanční zesilovač s šířkou pásma 60 MHz, což je zdroj napětí řízený proudem označovaný zkratkou CCVS. Někdy se nazývá pozitivní proudový konvejoz druhé generace nebo CFA (current feedback amplifier). Mezi ceněné vlastnosti CFA patří velká rychlost přeběhu a značný tranzitní kmitočet. Díky vyvedené kompenzační svorce TZ může být využit jako tříbranový proudový konvejoz (GCC - General Current Conveyor). GCC lze popsat branovými rovnicemi.

$$U_x = \alpha U_y \quad I_y = \beta I_x \quad I_z = \gamma I_x \quad (4.1)$$

V případě použitého integrovaného obvodu AD844 platí $\alpha=1$, $\beta=0$, $\gamma=1$, jedná se tedy o konvejoz CCII+.

Fázovací členek s ideálním pozitivním proudovým konvejozem [9] druhé generace bude simulován pomocí programu Snap pro $R_1=1\text{k}\Omega$, $R_2=2\text{k}\Omega$ a $C_2=10\text{nF}$. Pro simulaci v programu Snap nastavíme parametry konvejozu jako $A_1=1$, $A_2=0$, $B_1=0$, $B_2=1$.



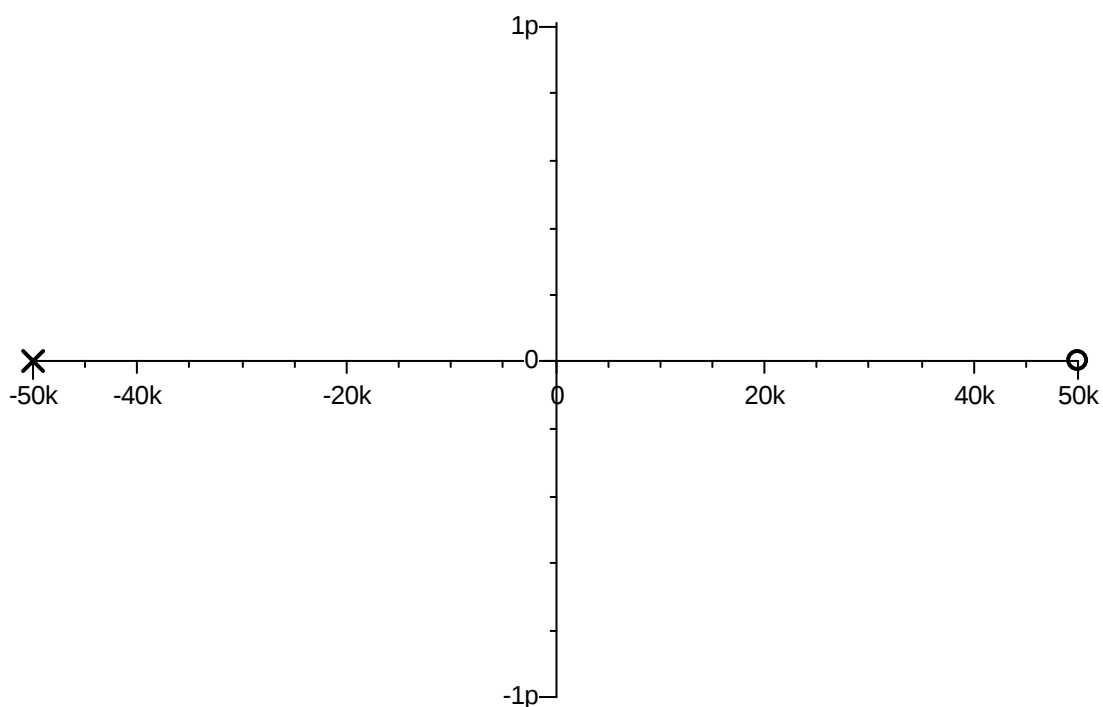
Obr. 4.1 Fázovací členek 1. řádu s pozitivním proudovým konvejozem

Koeficienty A_1 , A_2 , B_1 , B_2 prvku CCII+ byly vyčteny z manuálu k programu Snap [8]

Obr. 4.2 Koeficienty CCII+ v programu SNAP (Převzato z [8])

prvek	značka	model	parametry
proudový konvejoz 2. generace +	CCII+	GCC3	$A_1=1$ $A_2=0$ $B_1=0$ $B_2=1$

Nulový bod a pól jsou rozmístěny následovně.



Obr. 4.3 Nulové body a póly fázovacího článku 1. řádu s pozitivním proudovým konvejorem

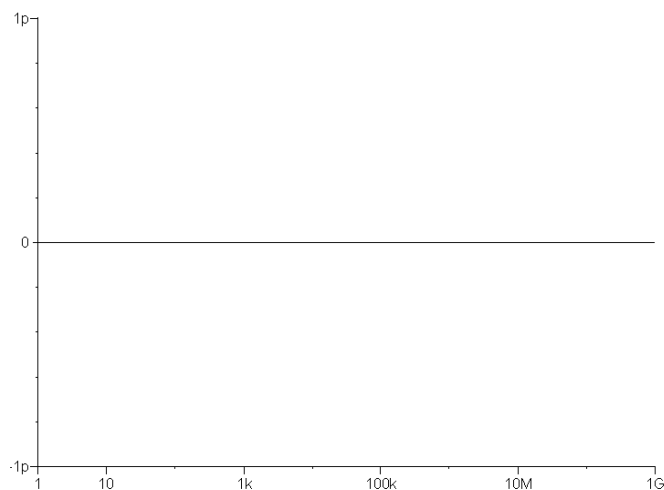
Byla získán vzorec pro napěťový přenos. Z něho vyplývá, že pro správnou funkci fázovacího článku je třeba dodržet $R_2=2 \times R_1$.

$$\frac{R_1 - R_2}{s(R_2 C_2 R_1)} \quad \text{symbolic}$$

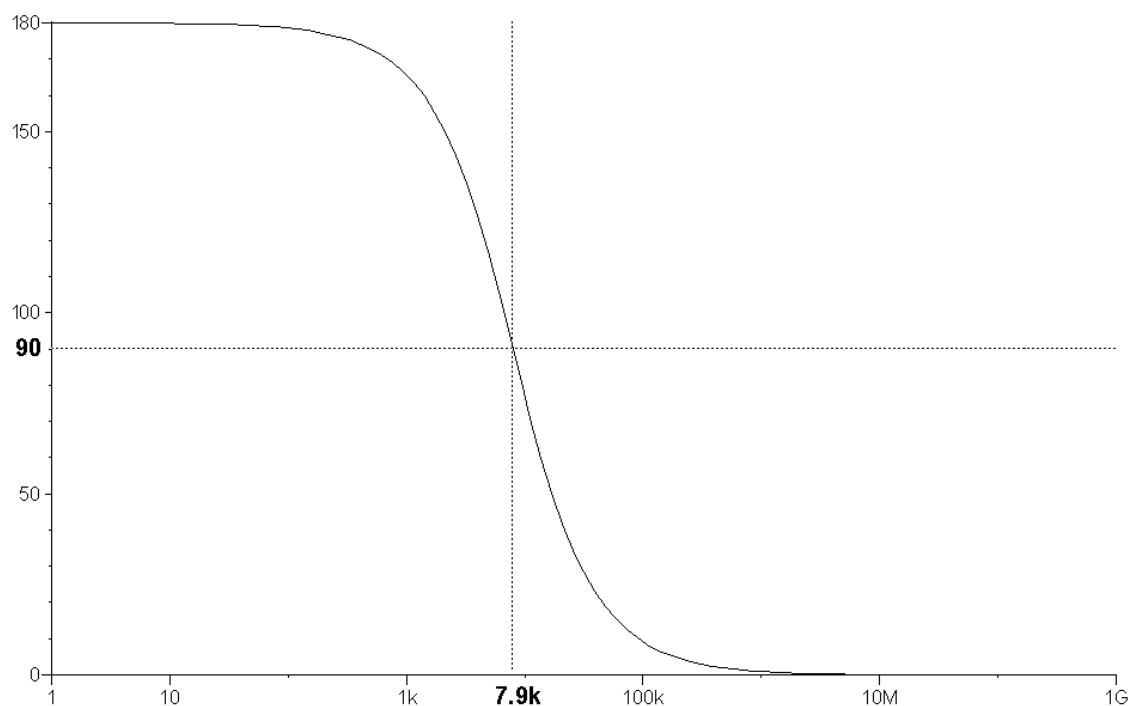
$$\frac{R_1}{s(R_2 C_2 R_1)}$$

Obr. 4.4 Vzorec napěťového přenosu fázovacího článku 1. řádu s CCII+ z programu SNAP

Modul přenosu je konstantní a fáze přenosů také odpovídá předpokladům (Obr. 4.4 a 4.5).



Obr. 4.5 Závislost modulu napětového přenosu fázovacího článku 1. řádu s CCII+ na kmitočtu



Obr. 4.6 Závislost fáze napětového přenosu fázovacího článku 1. řádu s CCII+ na kmitočtu.

Mezní kmitočet je asi 7,9 kHz pro úhel přenosu $\varphi = 90^\circ$.

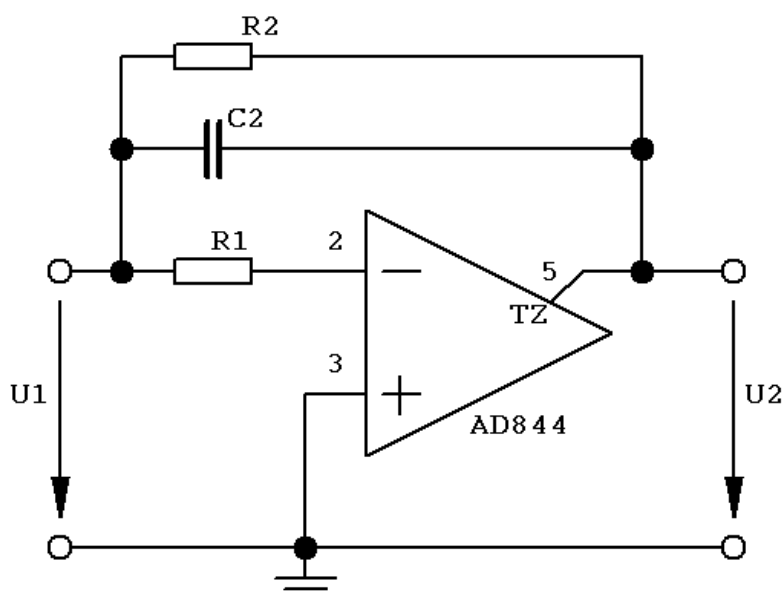
Fázovací článek s AD844 byl simulován i programem PSpice pro $R_1=5k\Omega$, $R_2=10k\Omega$, $C_2=82pF$. Pro tyto hodnoty součástek vypočítáme přenos fázovacího článku pomocí rovnice přenosu z programu Snap. Platí, že $s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f$. (4.2)

$$K(s) = \frac{R_1 - R_2 + s \cdot (R_2 \cdot C_2 \cdot R_1)}{R_1 + s \cdot (R_2 \cdot C_2 \cdot R_1)} \quad (4.3)$$

Pro mezní kmitočet $f=186,14$ kHz je přenos $K(\omega) \doteq \underline{\underline{1\angle 92,4^\circ}}$

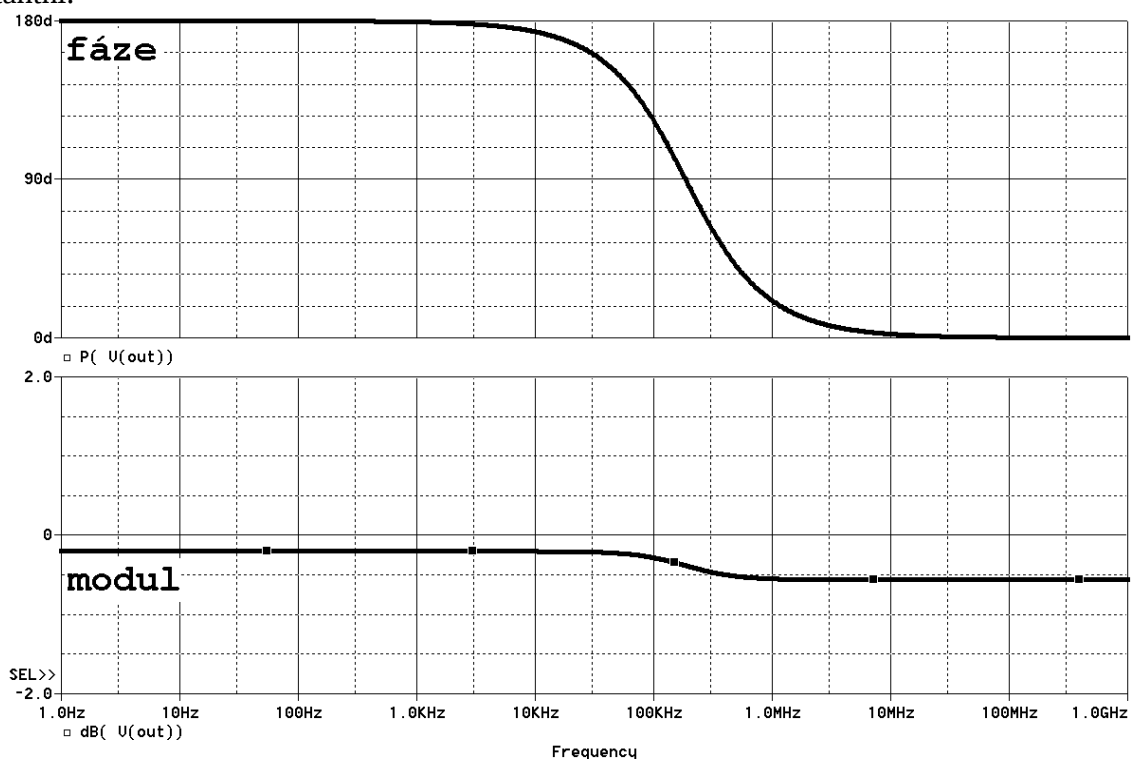
Pro malý kmitočet $f=10$ Hz je přenos $K(\omega) \doteq \underline{\underline{1\angle 179,99^\circ}}$

Pro velký kmitočet $f=500$ MHz je přenos $K(\omega) \doteq \underline{\underline{1\angle 0,044^\circ}}$



Obr. 4.7 Fázovací členek 1. řádu s pozitivním proudovým konvejorem AD844

Graf fáze a modulu napětového přenosu splňuje předpoklady. Modul přenosu je téměř konstantní.

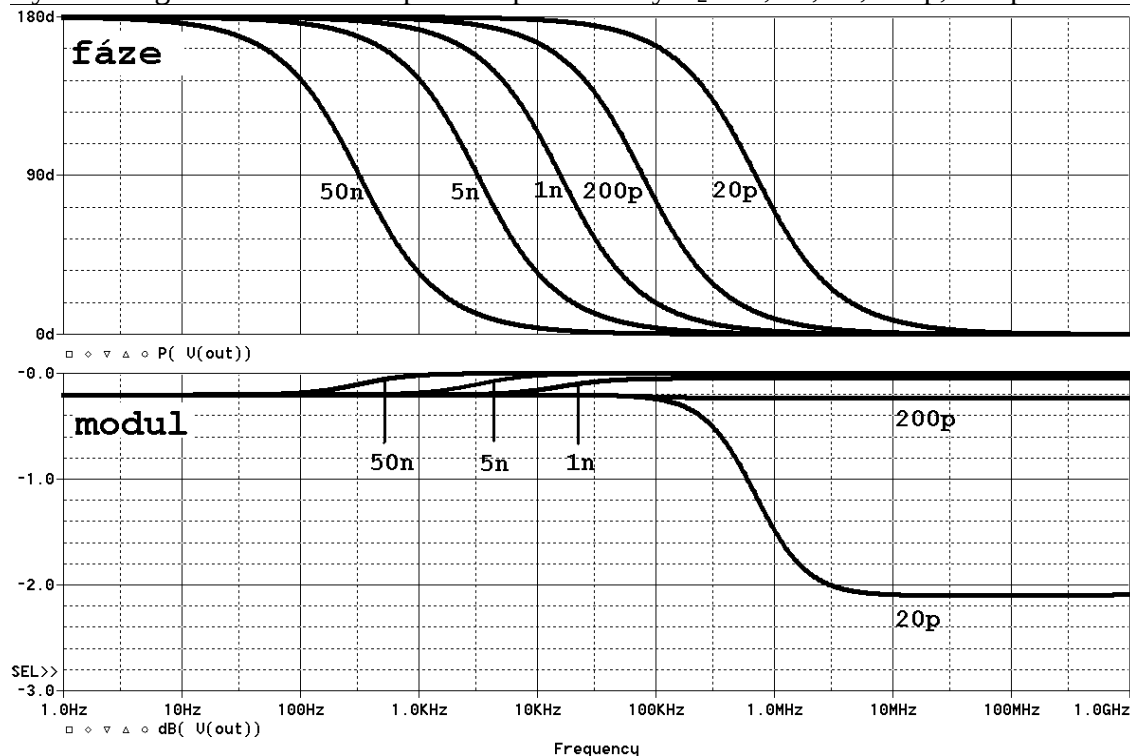


Obr. 4.8 Závislost modulu a fáze napětového přenosu fázovacího članku 1. řádu s pozitivním konvejorem na kmitočtu.

Z grafu bylo pomocí kurzorů zjištěno, že mezní kmitočet je asi 186,14 kHz pro úhel přenosu $\varphi = 90^\circ$. Grafy jsou v souladu s předchozími výpočty.

Fázovací členek lze přeladovat pomocí změny hodnoty R_1 a R_2 při zachování podmínky $R_2 = 2 \times R_1$, ale vhodnější je měnit kapacitu C_2 , což bude předmětem simulace.

Byl získán graf fáze a modulu přenosu pro hodnoty C_2 50n, 5n, 1n, 200p, a 20p.



Obr. 4.9 Závislost modulu a fáze napětového přenosu fázovacího článku 1. řádu s pozitivním konvejorem na kmitočtu pro různé kapacity C_2 .

Při změně kapacity C_2 dochází k nežádoucím změnám modulu napětového přenosu. Pro $C_2 = 20\text{pF}$ se již objevuje nadměrná nelinearita. Podle grafů by se zdálo, že fázovací článek s AD844 bude fungovat až do kmitočtu 1GHz i výše, ale ve skutečnosti výrobce doporučuje použití do 60 MHz [12].

Fázovací článek s AD844 podle obr. 4.6 byl realizován na univerzální DPS s hodnotami $R_1=5\text{k}\Omega$, $R_2=10\text{k}\Omega$, $C_2=4\text{nF}$. Byl změřen modul i fáze jeho přenosu a porovnán s výpočtem ze vzorce (4.2 a 4.3) získaného programem Snap.

$$s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f. \quad (4.4)$$

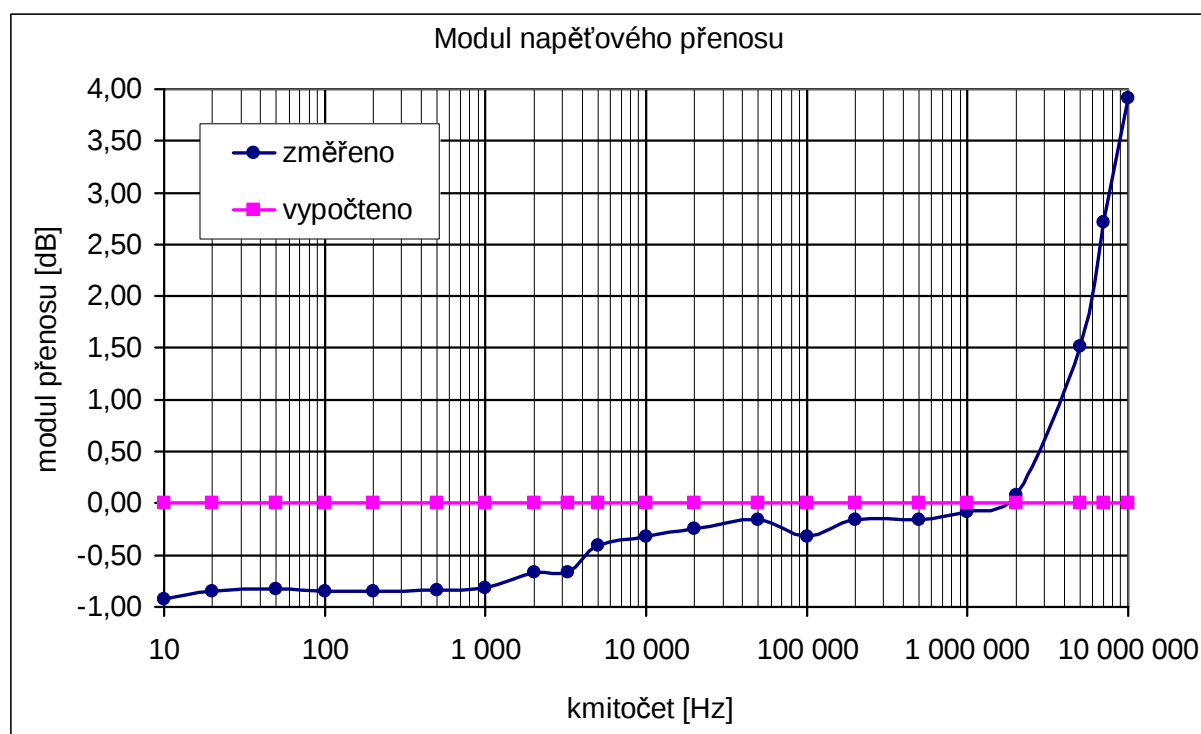
$$K(s) = \frac{R_1 - R_2 + s \cdot (R_2 \cdot C_2 \cdot R_1)}{R_1 + s \cdot (R_2 \cdot C_2 \cdot R_1)} \quad (4.5)$$

Z obdržených grafů je zřejmé, že daný fázovací článek je použitelný pro kmitočty 10 Hz až 5 MHz. V tabulce platí, že

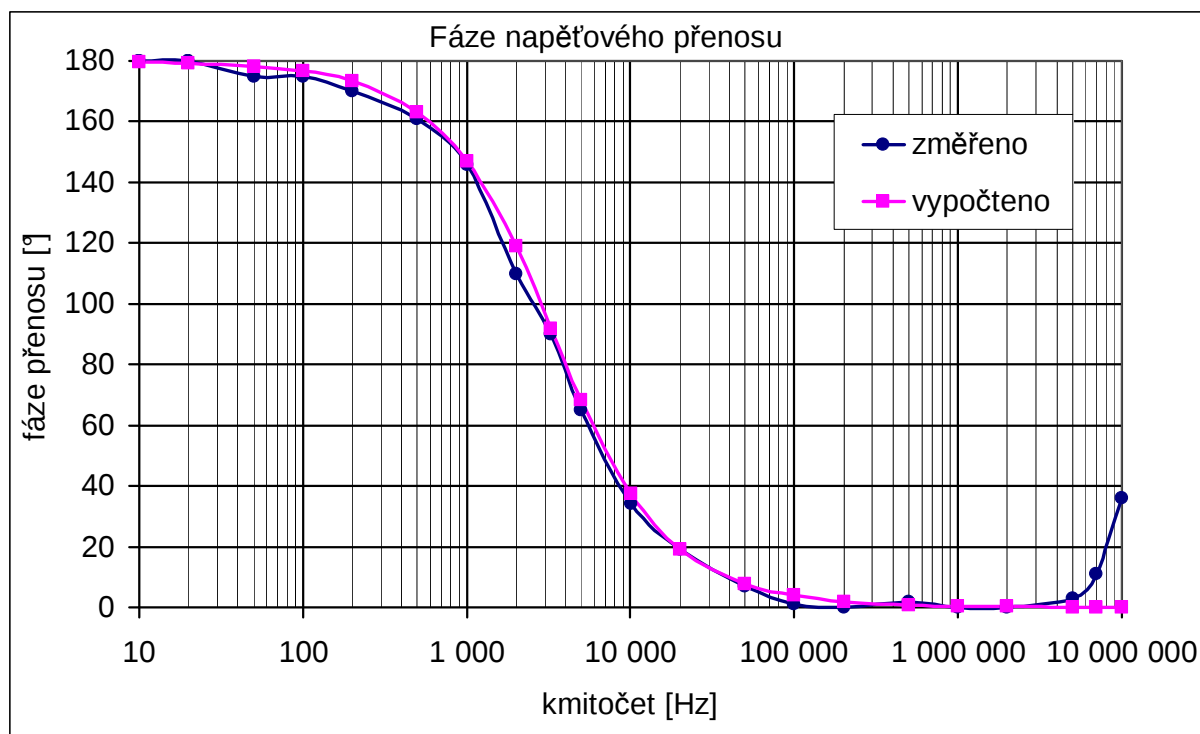
$$K[\text{dB}] = 20 \cdot \log \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (4.6)$$

Tab. 4.1 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ s AD844

kmitočet [Hz]	změřený napěťový přenos				vypočteno	
	U_{in} [V]	U_{out} [V]	fáze [°]	K [dB]	K [dB]	fáze [°]
10	1,09	0,980	180	-0,924	0	179,66
20	1,09	0,989	180	-0,845	0	179,32
50	1,09	0,991	175	-0,827	0	178,31
100	1,09	0,988	175	-0,853	0	176,62
200	1,09	0,988	170	-0,853	0	173,24
500	1,09	0,990	161	-0,836	0	163,20
1 000	1,09	0,992	146	-0,818	0	147,10
2 000	1,09	1,01	110	-0,662	0	118,87
3 274	1,09	1,01	90	-0,662	0	91,93
5 000	1,09	1,04	65	-0,408	0	68,22
10 000	1,09	1,05	34	-0,325	0	37,42
20 000	1,09	1,06	19	-0,242	0	19,22
50 000	1,08	1,06	7	-0,162	0	7,75
100 000	1,09	1,05	1	-0,325	0	3,88
200 000	1,09	1,07	0	-0,161	0	1,94
500 000	1,09	1,07	2	-0,161	0	0,776
1 000 000	1,07	1,06	0	-0,082	0	0,388
2 000 000	1,09	1,10	0	0,079	0	0,194
5 000 000	1,10	1,31	3	1,518	0	0,078
7 000 000	1,09	1,49	11	2,715	0	0,055
10 000 000	1,09	1,71	36	3,911	0	0,039

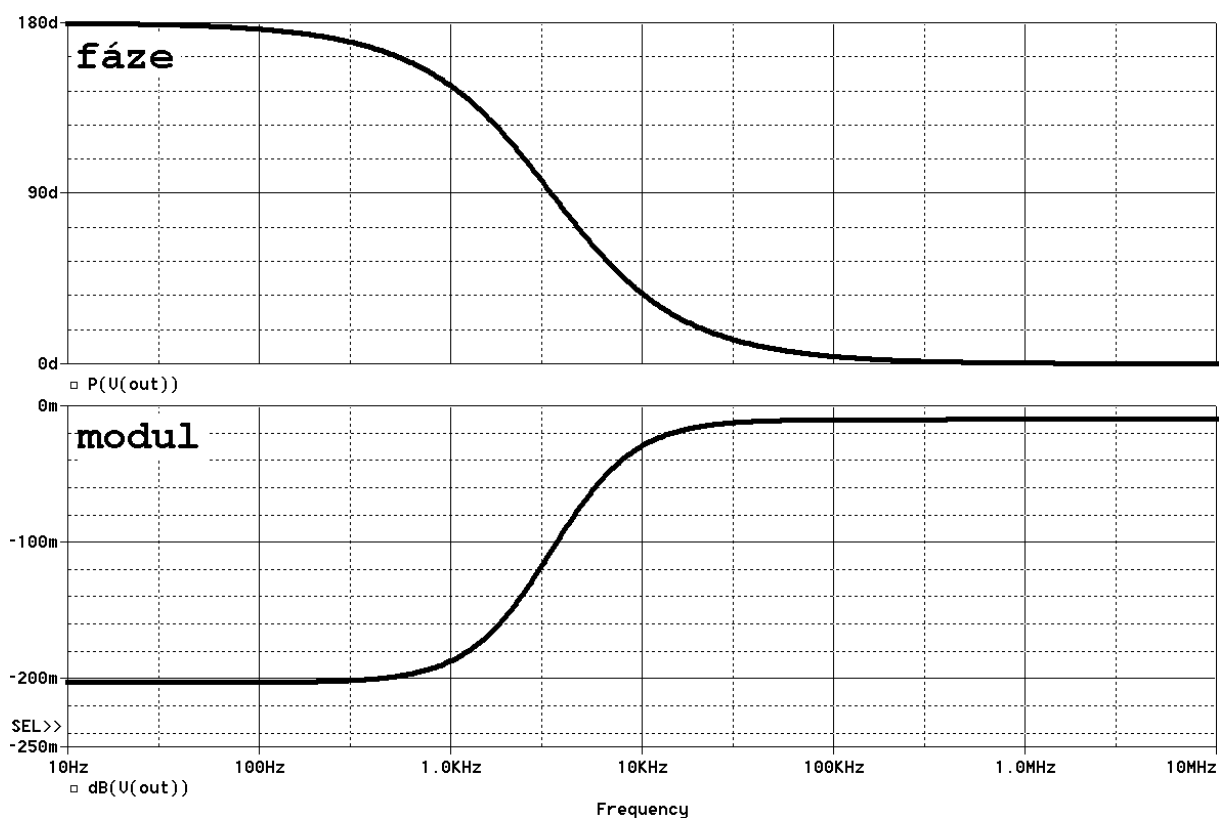


Obr. 4.10 Změřený a vypočtený modul napěťového přenosu FČ 1. řádu s AD844



Obr. 4.11 Změřená a vypočtená fáze napětového přenosu FČ 1. řádu AD844

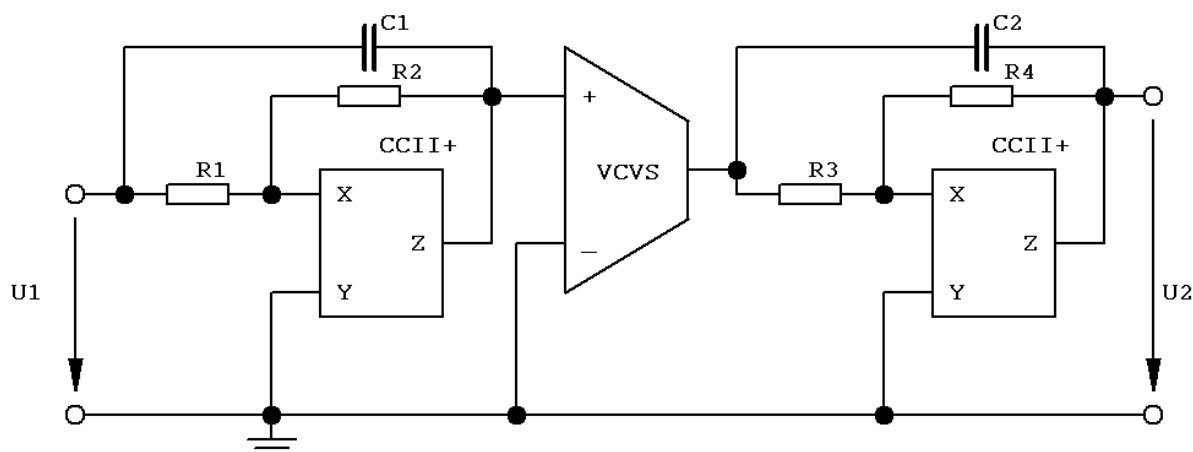
Předchozí grafy se téměř shodují s průběhy získanými z programu PSpice.



Obr. 4.12 Modul a fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s AD844

4.2 Fázovací členek 2. řádu s pozitivním proudovým konvejem

Fázovací články prvního řádu s pozitivním proudovým konvejem CCII+ [9] lze řadit za sebe a získat tak fázovací členek druhého řádu. Pro impedanční přizpůsobení byl použit prvek VCVS, tj. zdroj napětí řízený napětím.



Obr. 4.13 Fázovací členek druhého řádu s CCII+ v programu Snap

Zapojení bylo simulováno programem Snap pro $R_1=R_3=1\text{k}\Omega$, $R_2=R_4=2\text{k}\Omega$ a $C_1=C_2=10\text{n}$. Byl získán poměrně vzorec napětíového přenosu, dále rozložení nulových bodů a pólů a průběhy modulu a fáze napětíového přenosu.

```

-----symbolic-----
E1.A*R2*R4
-s*( E1.A*R1*R2*R4*C1 +E1.A*R2*R3*R4*C2 )
+s^(2)*( E1.A*R1*R2*R3*R4*C1*C2 )
-----
4*R1*R3
+s*( 2*R1*R3*R4*C2 +2*R1*R2*R3*C1 )
+s^(2)*( R1*R2*R3*R4*C1*C2 )

```

Obr. 4.14 Vzorec napětíového přenosu FČ 2. řádu se dvěma CCII+

Při dosazení $R_1=R_3=1\text{k}\Omega$, $R_2=R_4=2\text{k}\Omega$ a $C_1=C_2=10\text{n}$ obdržíme jednodušší semisymbolický vzorec. Ze semisymbolického vzorce vyplývá, že jakost fázovacího článku

$$Q=0,5, \text{ protože } \omega_p = \sqrt{1 \cdot 10^{10}} \doteq \underline{\underline{100000}} \text{ a } \frac{\omega_p}{Q_p} = 2 \cdot 10^5, \text{ takže } Q_p \doteq \underline{\underline{0,5}}$$

-----semisymbolic-----

K = 1

Numerator:

1.00000000000000E+0010
 -2.00000000000000E+0005 * s^(1)
 1.00000000000000E+0000 * s^(2)

Denominator:

1.00000000000000E+0010
 2.00000000000000E+0005 * s^(1)
 1.00000000000000E+0000 * s^(2)

Zeros:

100000
 100000

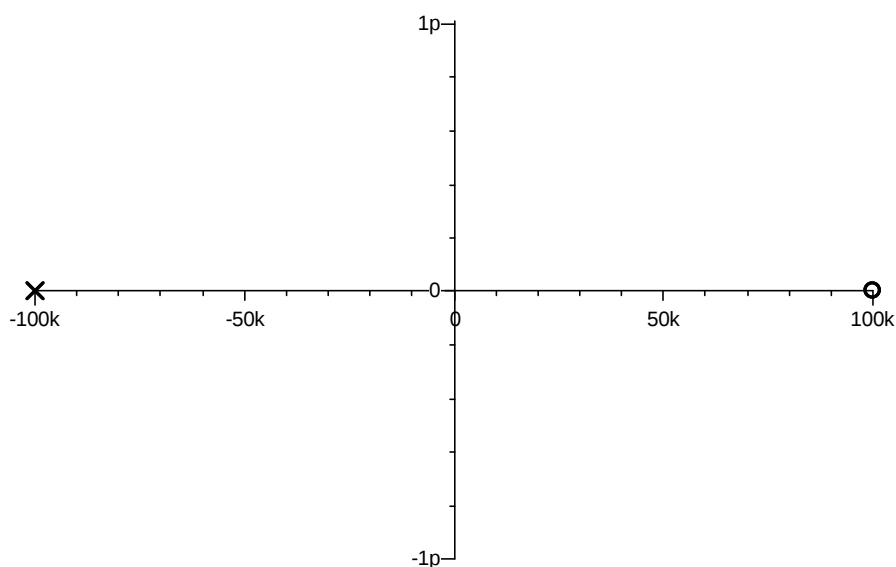
Poles:

-100000
 -100000

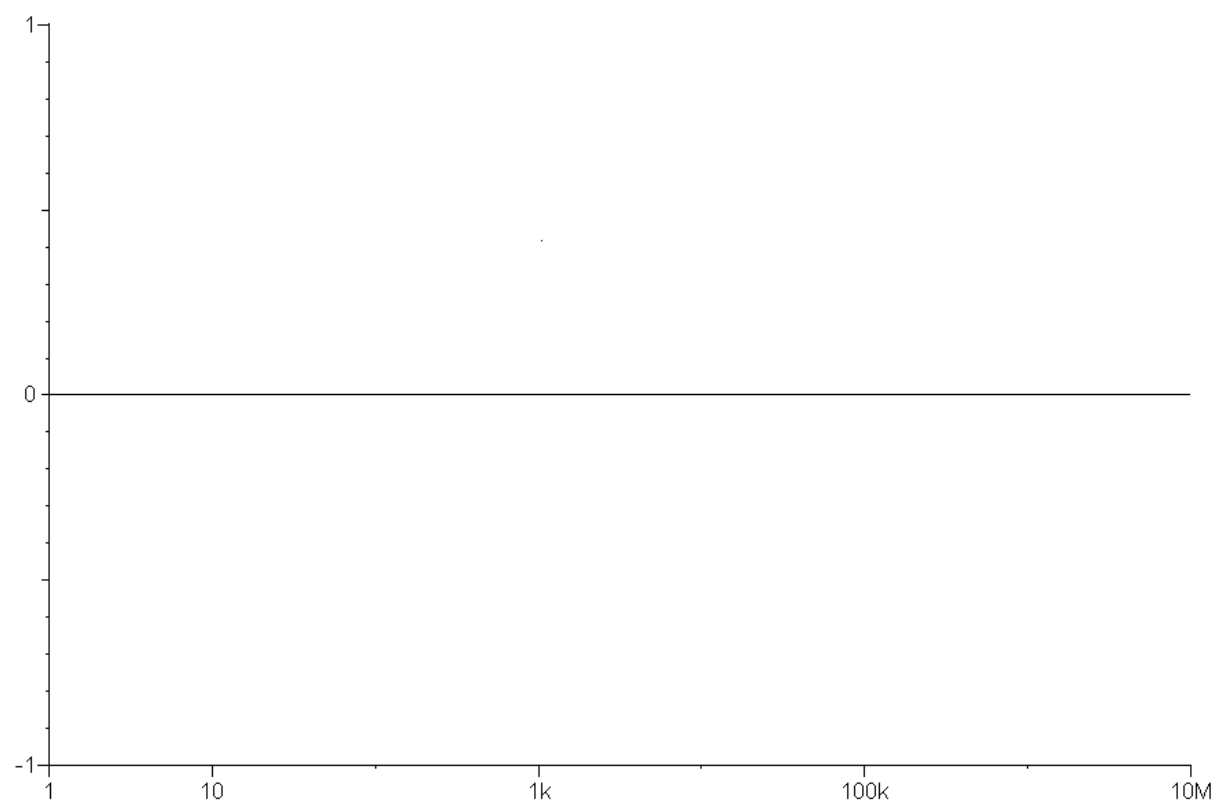
Obr. 4.15 Semisymbolický vzorec napětového přenosu FČ 2. řádu se dvěma CCII+

Je vidět, že fázovací členek druhého řádu má dvojnásobný překrývající se nulový bod a pól. Vzorec napětového přenosu pro zvolené hodnoty součástí lze vyjádřit takto:

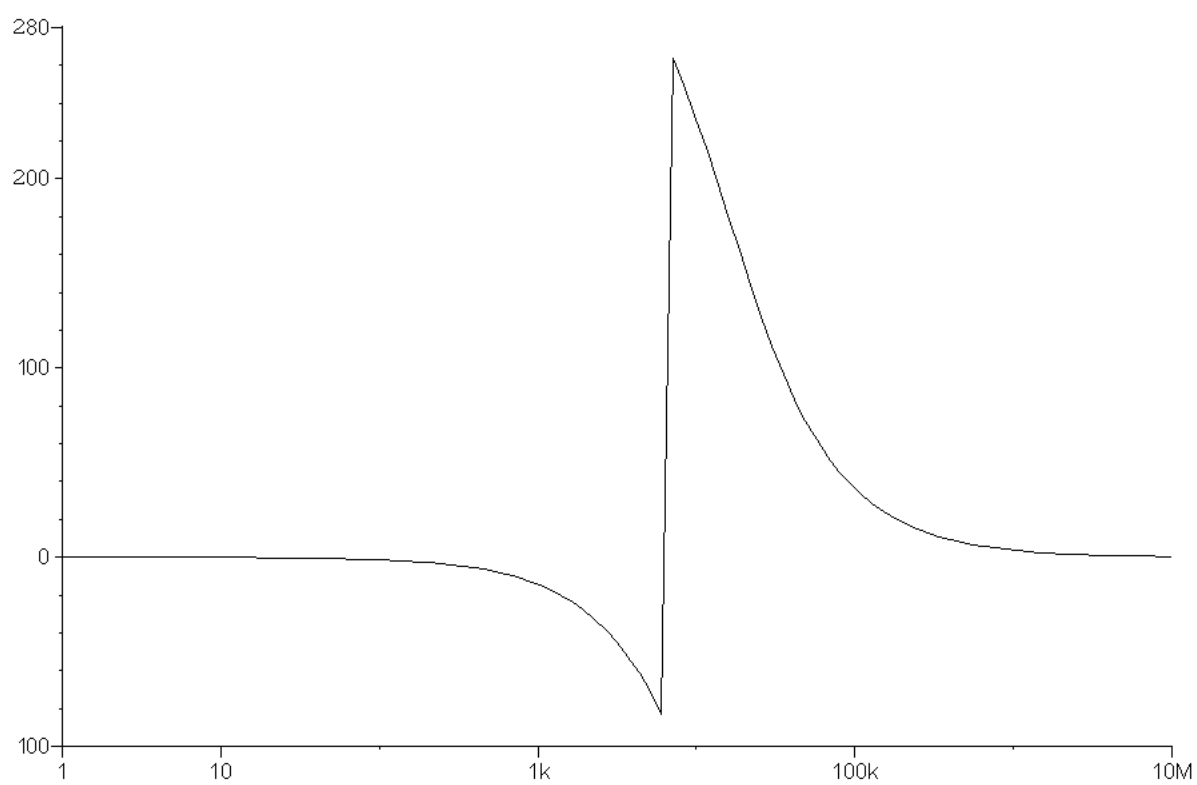
$$K(s) = \frac{1 \cdot 10^{10} - s \cdot 2 \cdot 10^5 + s^2}{1 \cdot 10^{10} + s \cdot 2 \cdot 10^5 + s^2} \quad \text{kde } s = j \cdot 2\pi f \quad (4.7)$$



Obr. 4.16 Nulové body a póly FČ 2. řádu se dvěma CCII

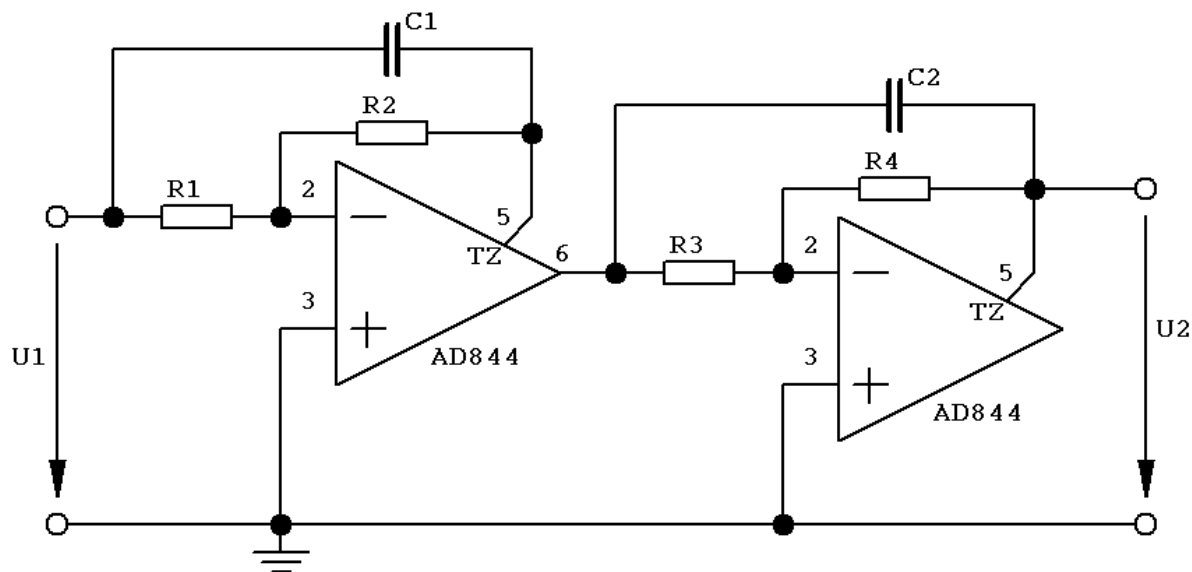


Obr. 4.17 Modul napět'ového přenosu

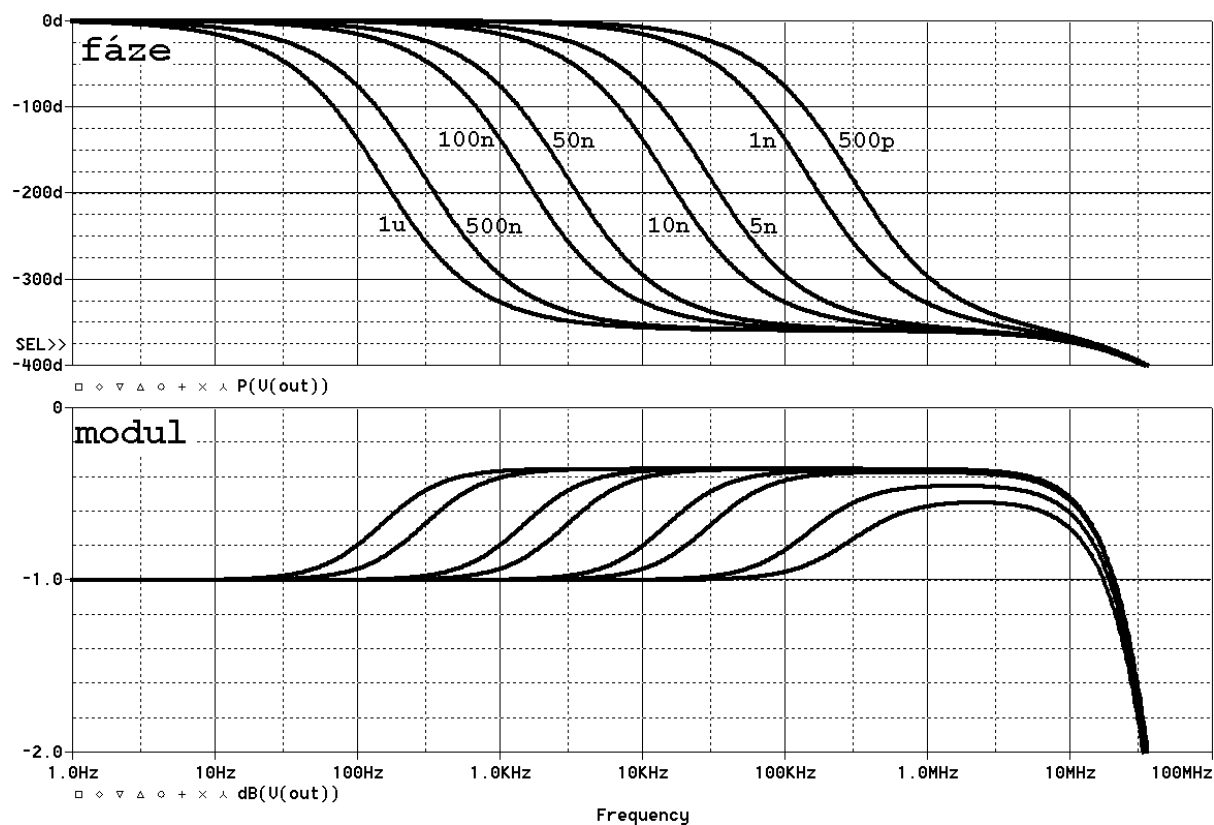


Obr. 4.18 Fáze napět'ového přenosu

Zapojení bylo simulováno programem PSpice pro $R_1=R_3=1\text{ k}\Omega$, $R_2=R_4=2\text{ k}\Omega$ a pro různé hodnoty $C_1=C_2$. Jako pozitivní proudový konvektor byl použit integrovaný obvod AD844. Pro impedanční přizpůsobení byl využit napěťový výstup prvního IO.



Obr. 4.19 Fázovací členek druhého řádu s CCII+ v programu PSpice



Obr. 4.20 Modul a fáze napěťového přenosu FČ 2. řádu s AD844 pro různé hodnoty $C_1=C_2$

Z grafu vyplývá, že dochází k drobné nežádoucí změně modulu napěťového přenosu a že fázovací členek by měl být použitelný pro kmitočty 1 Hz až 10 MHz.

Fázovací člunek s AD844 podle obr. 57 byl realizován na univerzální DPS s hodnotami $R_1 = R_3 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = R_4 = 2\text{k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 10\text{n}$. Byl změřen modul i fáze jeho přenosu a porovnán s výpočtem ze vzorce (4.2 a 4.3b) získaného programem Snap.

$$s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f. \quad (4.8)$$

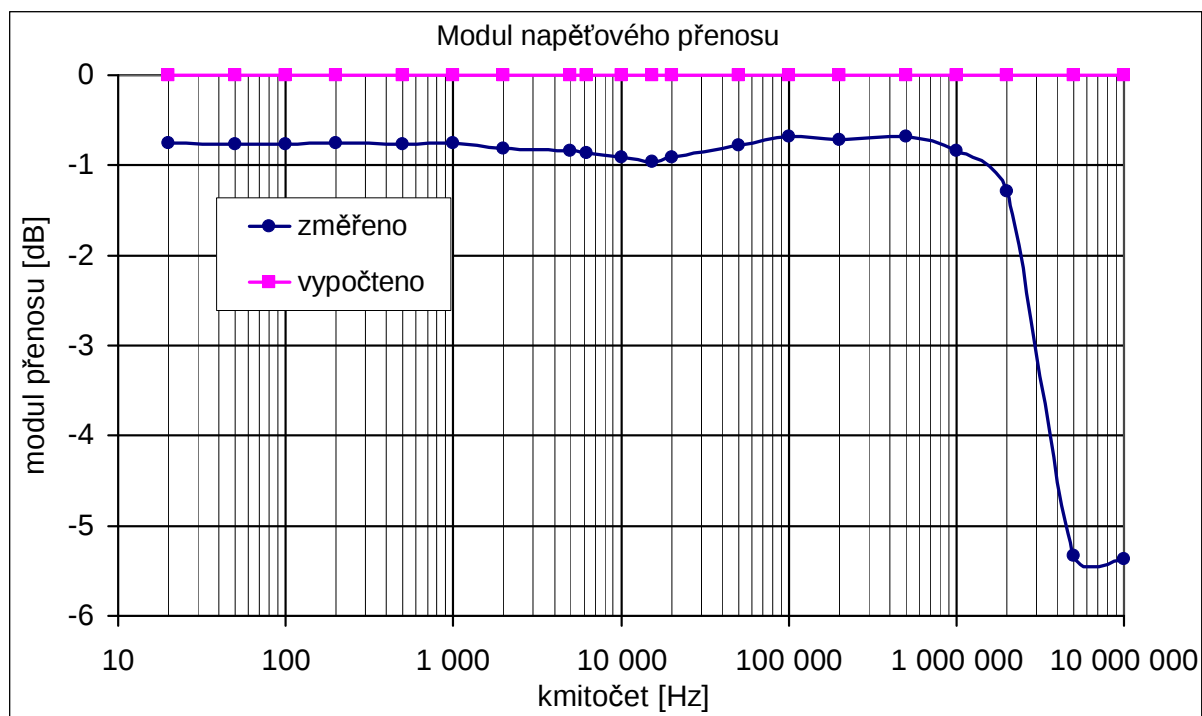
$$K(s) = \frac{1 \cdot 10^{10} - s \cdot 2 \cdot 10^5 + s^2}{1 \cdot 10^{10} + s \cdot 2 \cdot 10^5 + s^2} \quad (4.9)$$

Z obdržených grafů je zřejmé, že daný fázovací člunek je použitelný pro kmitočty 20 Hz až 1 MHz. V tabulce platí, že

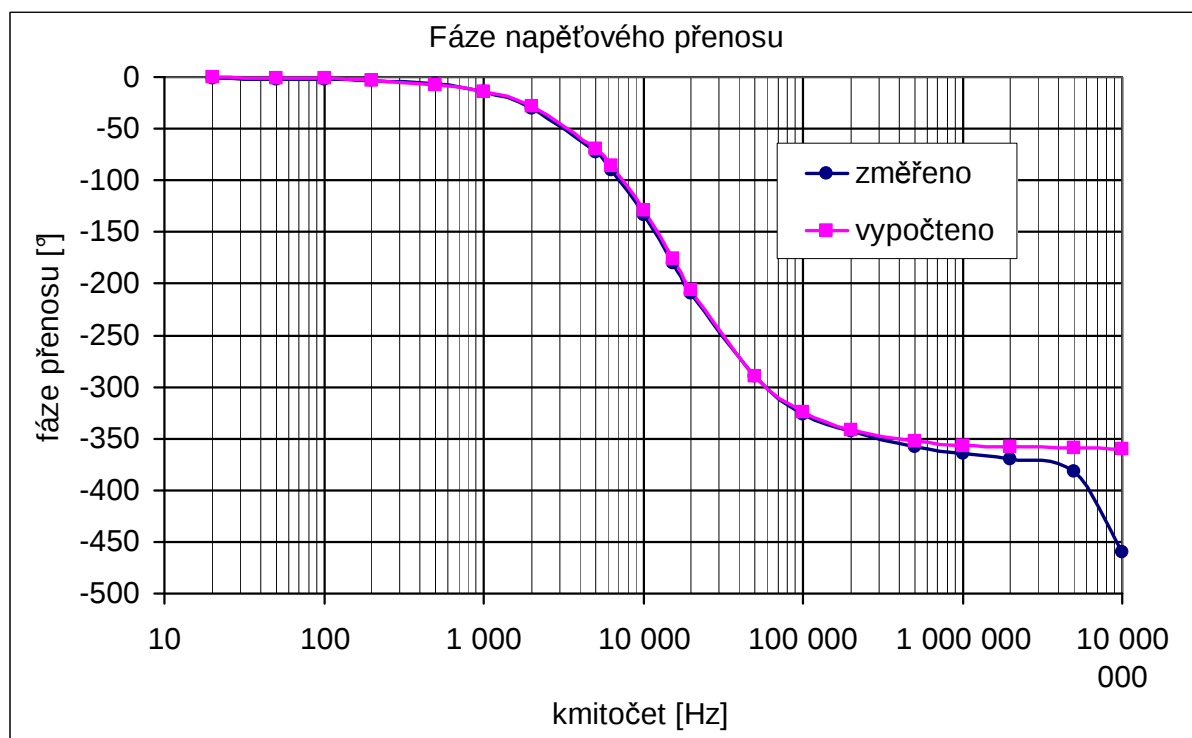
$$K[\text{dB}] = 20 \cdot \log \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} \quad (4.10)$$

Tab. 4.2 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika 2. řádu FČ s AD844

kmitočet [Hz]	změřený napěťový přenos				vypočteno	
	U_{in} [V]	U_{out} [V]	fáze [°]	K [dB]	K [dB]	fáze [°]
20	1,07	0,981	-1	-0,754	0	-0,29
50	1,07	0,980	-2	-0,763	0	-0,72
100	1,07	0,980	-2	-0,763	0	-1,40
200	1,07	0,981	-3	-0,754	0	-2,90
500	1,07	0,980	-7	-0,763	0	-7,20
1 000	1,07	0,981	-14	-0,754	0	-14,40
2 000	1,07	0,974	-30	-0,816	0	-28,60
5 000	1,07	0,971	-73	-0,843	0	-69,70
6 262	1,07	0,969	-90	-0,861	0	-85,90
10 000	1,07	0,964	-133	-0,906	0	-128,60
15 295	1,07	0,958	-180	-0,960	0	-175,40
20 000	1,07	0,964	-209	-0,906	0	-206,00
50 000	1,07	0,978	-290	-0,781	0	-289,40
100 000	1,07	0,990	-326	-0,675	0	-323,80
200 000	1,07	0,985	-343	-0,719	0	-341,80
500 000	1,07	0,989	-358	-0,684	0	-352,70
1 000 000	1,07	0,971	-364	-0,843	0	-356,40
2 000 000	1,07	0,922	-370	-1,293	0	-358,20
5 000 000	1,07	0,579	-382	-5,334	0	-359,30
10 000 000	1,07	0,577	-460	-5,364	0	-359,60

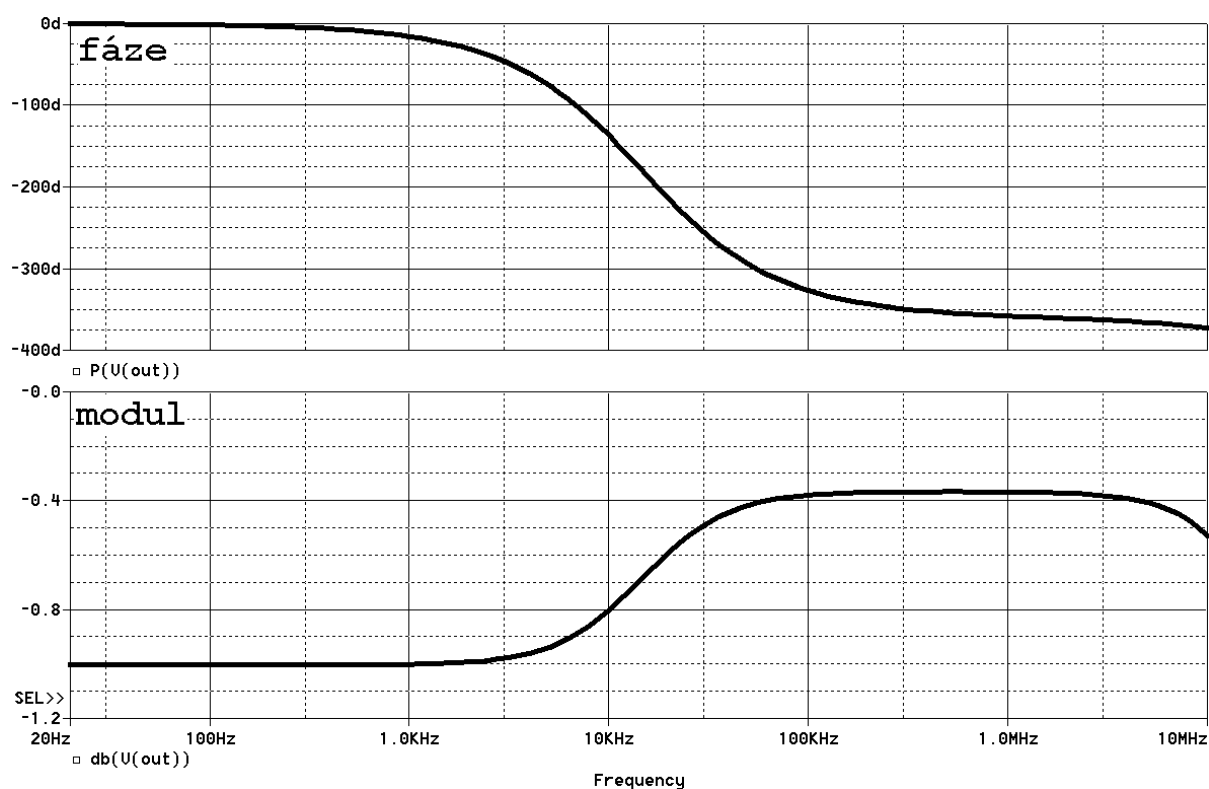


Obr. 4.21 Změřený a vypočtený modul napětového přenosu FČ 2. řádu AD844



Obr. 4.22 Změřená a vypočtená fáze napětového přenosu FČ 2. řádu AD844

Předchozí grafy se téměř shodují s průběhy získanými z programu PSpice. Zde se opět projevuje drobná nežádoucí změna modulu přenosu.



Obr. 4.23 Modul a fáze napět'ového přenosu FČ 2. řádu s AD844 pro $C_1=C_2=10\text{nF}$

4.3 Fázovací členek 1. řádu s transadmitančním zesilovačem

Obvod LT1228 od výrobce Linear Technology [13] je transadmitanční zesilovač označovaný zkratkou OTA. Jedná se o zdroj proudu řízený napětím (VCCS). Šířka jeho pásma činí 75MHz. Jeho základním parametrem je transkonduktance g_m , kterou lze nastavit v rozmezí $10\mu S$ až $10mS$ pomocí změny proudu přivedeného na vývod I_{SET} . Platí

$$g_m = 10 \cdot I_{SET} \quad (4.11)$$

Typický vstupní odpor OTA je cca $1000M\Omega$ a typický výstupní odpor je cca $8M\Omega$. Ideální prvek OTA lze popsat rovnicí

$$I_{out} = g_m \cdot U_{in} \quad (4.12)$$

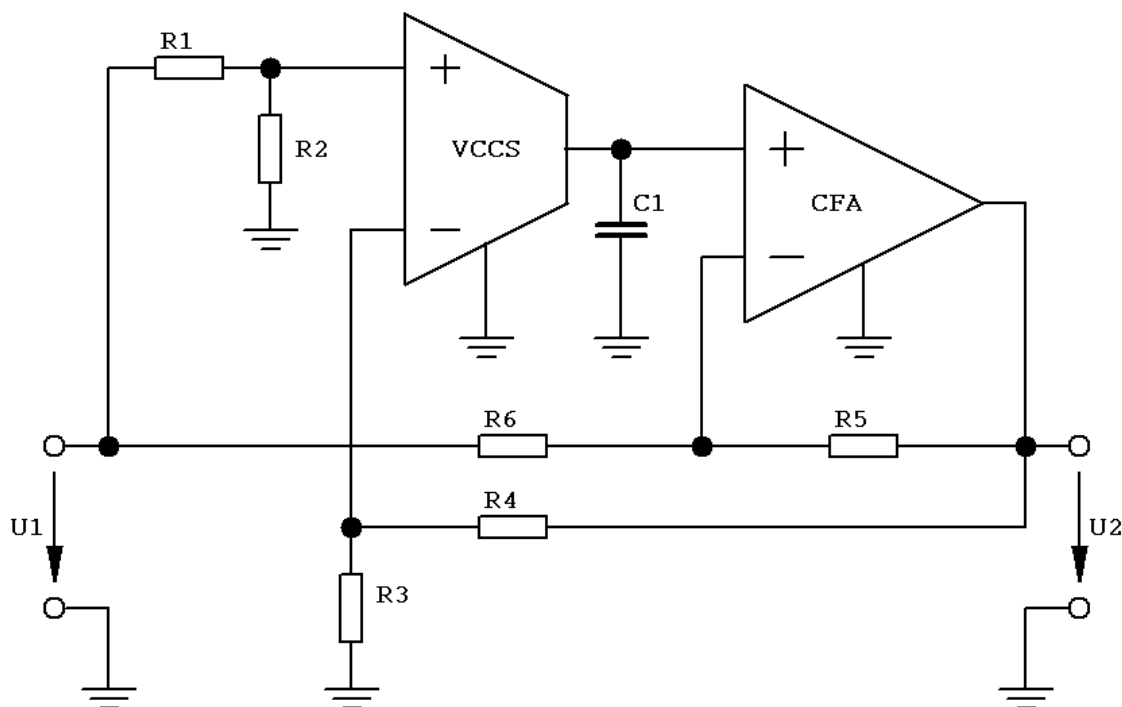
U reálného prvku OTA je ovšem transkonduktance g_m kmitočtově závislá. Lze ji vyjádřit následujícím aproximujícím vztahem s jedním dominantním pólem.

$$g_m(\omega) = \frac{g_{m0}}{1 + \frac{j\omega}{a}} \quad (4.13)$$

Obvod LT1228 dále obsahuje transimpedanční zesilovač označovaný zkratkou CFA. Jedná se o zdroj napětí řízený proudem (CCVS). Šířka jeho pásma činí 100MHz. Jeho základním parametrem je transrezistance z_t , která má typickou hodnotu $z_t = 200k\Omega$

Typický vstupní odpor CFA je cca $25M\Omega$. Ideální prvek CFA lze popsat rovnicí

$$U_{out} = z_t \cdot I_{in} \quad (4.14)$$



Obr. 4.24 Fázovací členek 1. řádu s prvkem OTA (VCCS) a CFA v programu Snap

Fázovací článek s prvky OTA a CFA [13] je simulován programem Snap pro hodnoty $R1=R4=R5=R6=1\text{k}\Omega$, $R2=R3=120\Omega$ a $C1=10\text{nF}$.

U VCCS je zvolena hodnota $\text{GAIN}=g_m=-0,8\text{mS}$. Z programu Snap byl získán poměrně složitý vzorec přenosu.

```

_____symbolic_____

8000000*R2*R3*R9 +8000000*R2*R7*R9 +8000000*R2*R7*R8 +8000000*R2*R3*R8
-s*( 1E9*R2*R7*C1*R9 +1E9*R2*R3*C1*R9 +1E9*R1*R7*C1*R9 +1E9*R1*R3*C1*R9 )
-----
8000000*R2*R3*R9 +8000000*R2*R3*R8 +8000000*R1*R3*R9 +8000000*R1*R3*R8
+s*( 1E9*R2*R7*C1*R8 +R2*R3*C1*R8*R9 +1E9*R1*R7*C1*R8 +R2*R7*C1*R8*R9
+1E9*R2*R3*C1*R8 +R1*R3*C1*R8*R9 +R1*R7*C1*R8*R9 +1E9*R1*R3*C1*R8 )

```

Obr. 4.25 Symbolický vzorec napět'ového přenosu FČ 2. řádu s OTA + CFA

Pro hodnoty $R1=R4=R5=R6=1\text{k}\Omega$, $R2=R3=120\Omega$ a $C1=10\text{nF}$ vychází

```

_____semisymbolic_____

K = -0.9999990000001

Numerator:
-1.71428571428571E+0004
1.00000000000000E+0000 * s^(1)

Denominator:
1.71428400000017E+0004
1.00000000000000E+0000 * s^(1)

```

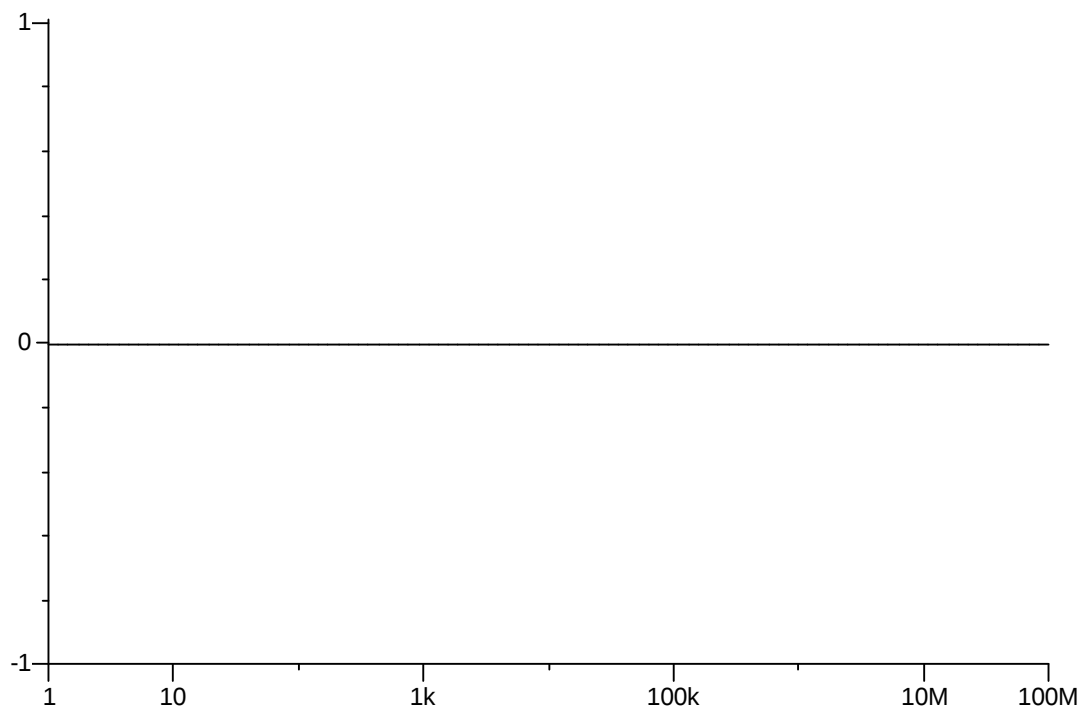
Obr. 4.26 Semisymbolický vzorec napět'ového přenosu FČ 2. řádu s OTA + CFA

Neboli

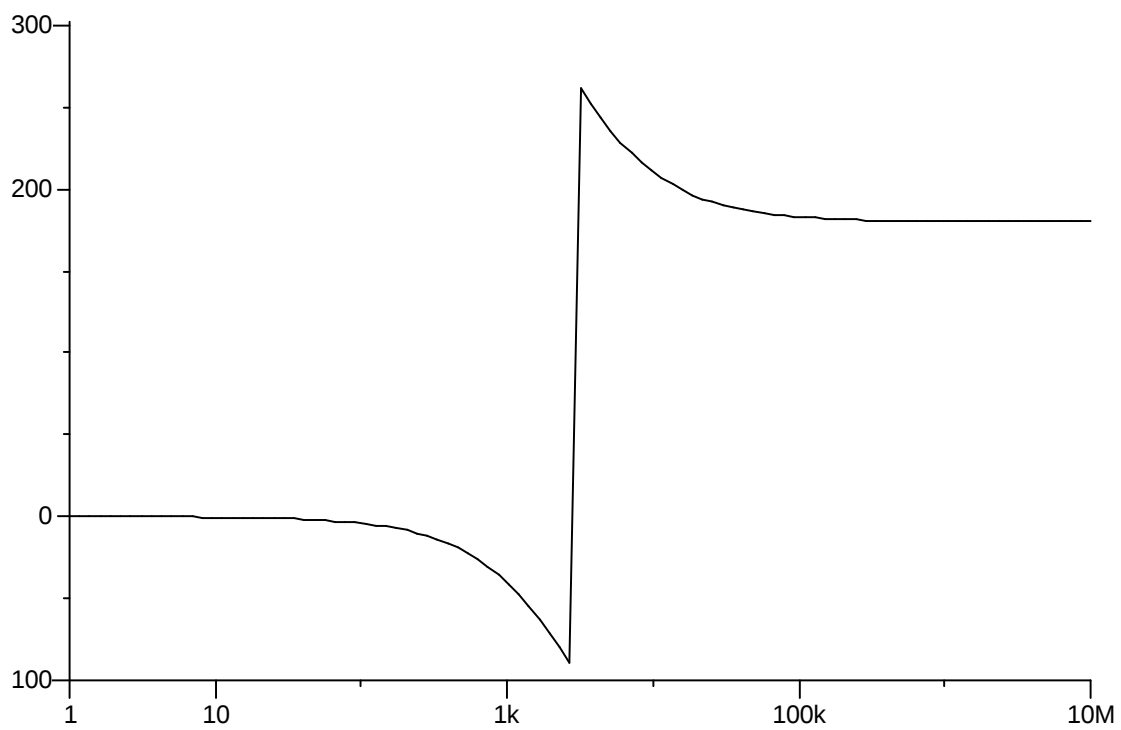
$$K(s) = -\frac{-1,7143 \cdot 10^4 + s}{1,7143 \cdot 10^4 + s} \quad (4.14)$$

$$\text{Platí, že } s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f. \quad (4.15)$$

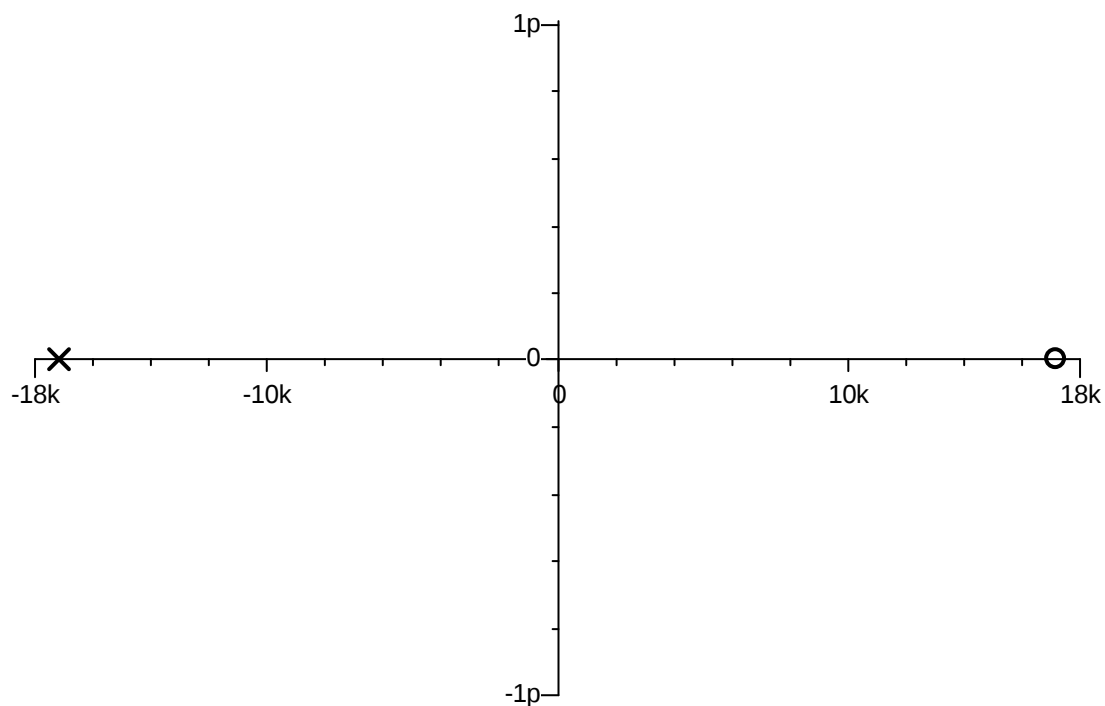
Dále je získán graf modulu a fáze napět'ového přenosu a rozložení nulových bodů a pólů.



Obrázek 4-1 Modul napěťového přenosu

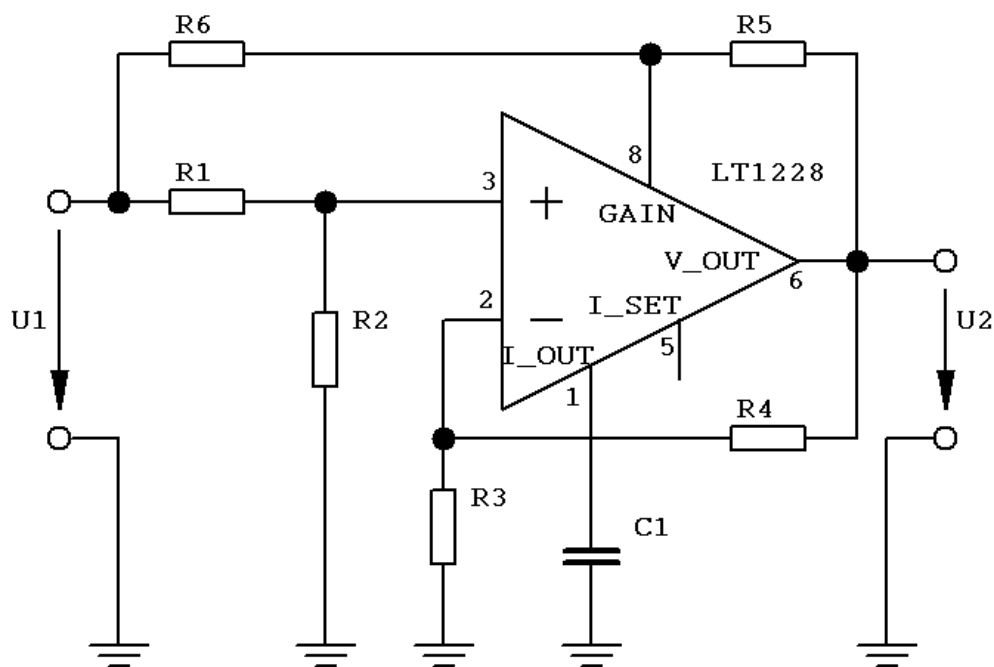


Obrázek 4-2 Fáze napěťového přenosu



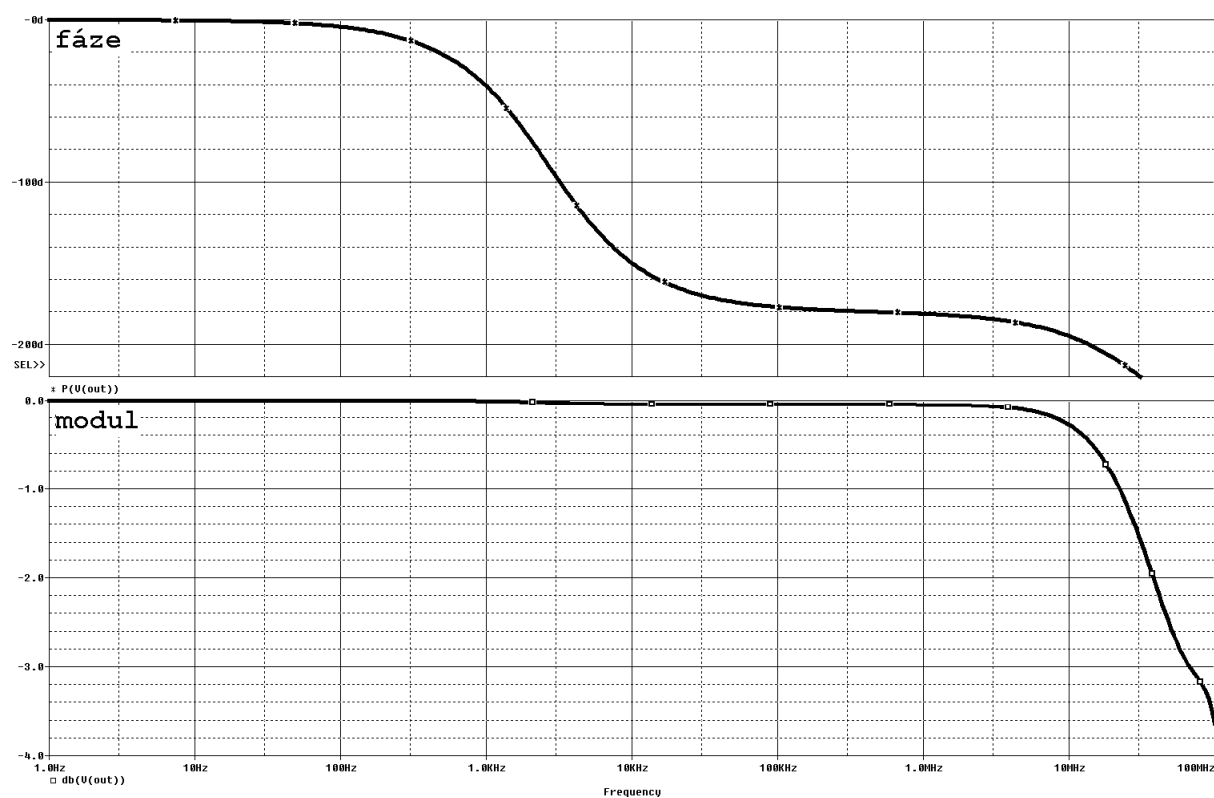
Obrázek 4-3 Rozložení nulových bodů a pólů

Fázovací článek s prvky OTA a CFA je simulován programem PSpice pro hodnoty $R_1=R_4=R_5=R_6=1\text{k}\Omega$, $R_2=R_3=120\Omega$ a $C_1=10\text{nF}$. Do vývodu 5 je přiveden proud $I_{\text{SET}}=80\mu\text{A}$.



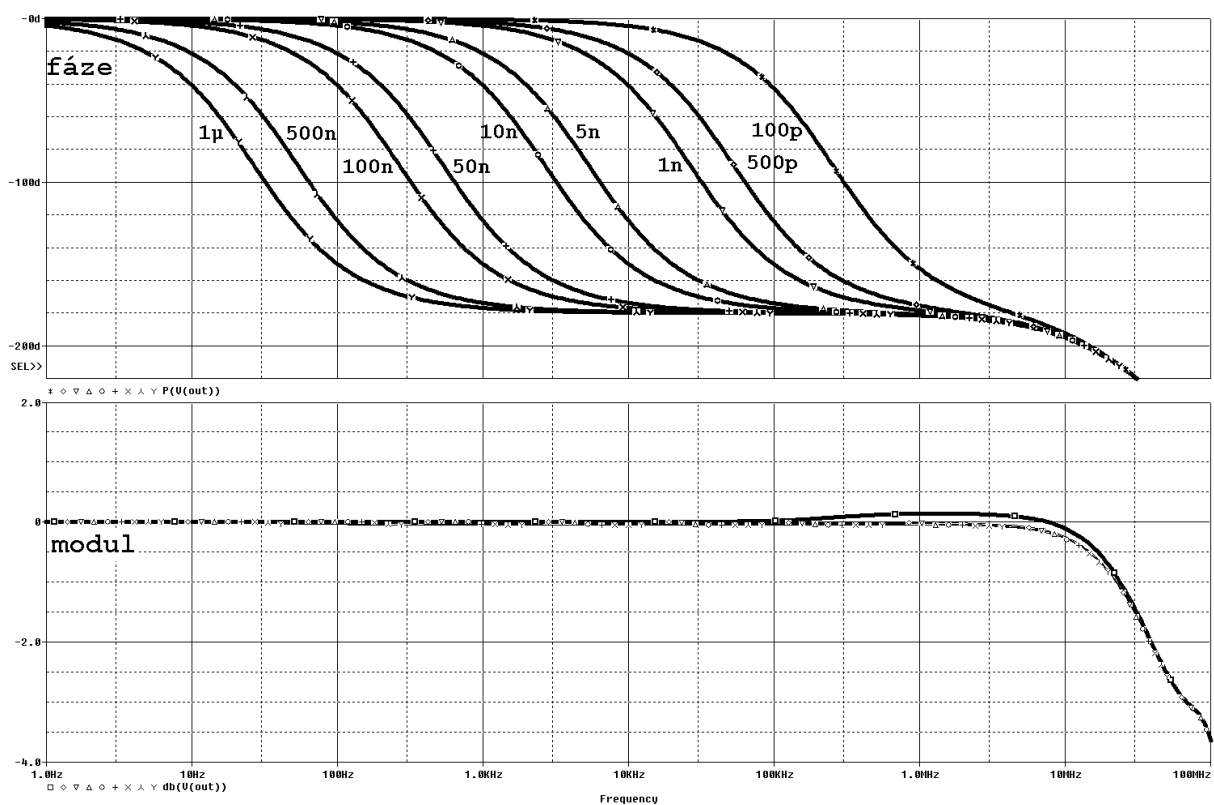
Obr. 4.27 Fázovací článek 1. řádu s prvkem OTA (VCCS) a CFA v programu PSpice

Graf z programu PSpice odpovídá předchozím výsledkům z programu Snap.



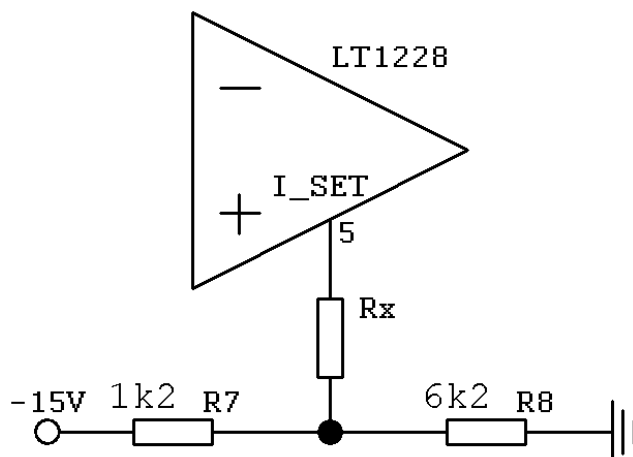
Obr. 4.28 Modul a fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s LT1228 pro $C_1=10\text{nF}$

Fázovací článek s LT1228 lze přeladovat pomocí změny kapacity C_1 .



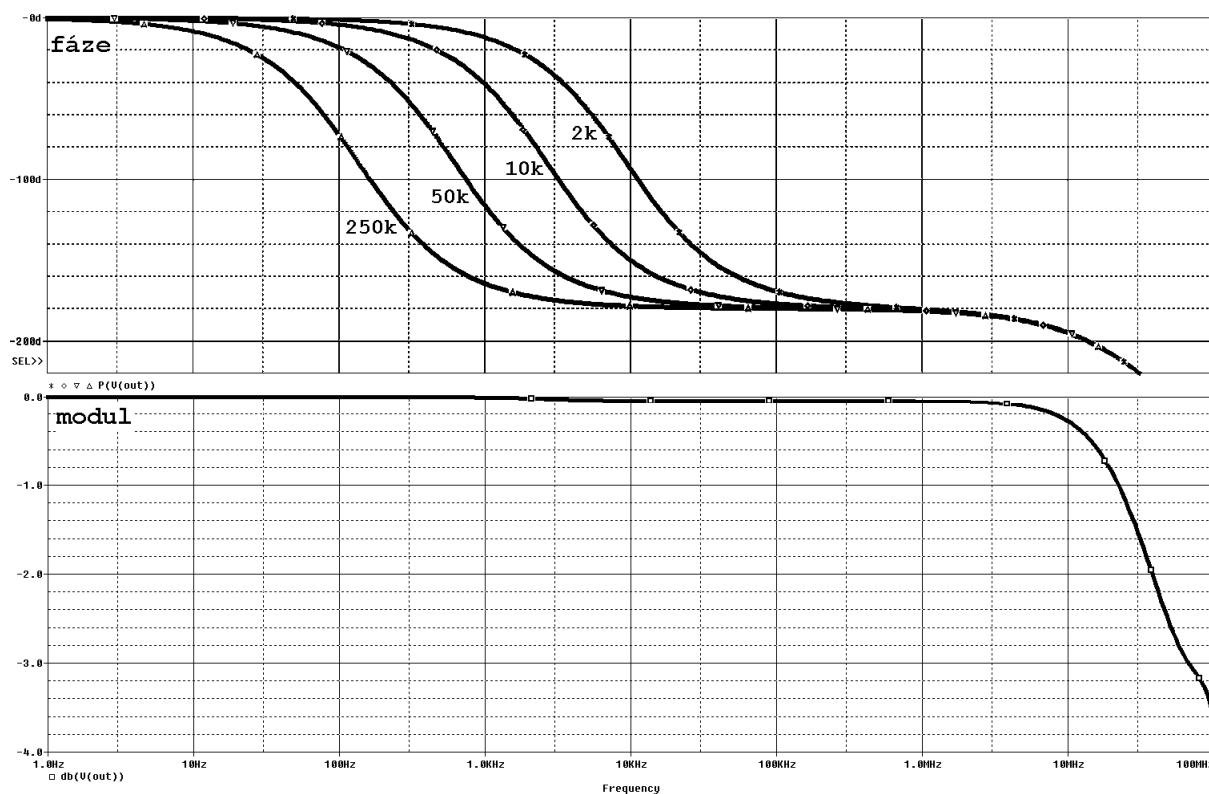
Obr. 4.29 Modul a fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s LT1228 pro různé hodnoty C_1

Dále lze fázovací členek přeladovat pomocí změny proudu přivedeného do vývodu I_{SET} . Je použit odporový dělič doporučený výrobcem [13].



Obr. 4.30 Doporučený odporový dělič

Byl získán graf modulu a fáze napětového přenosu pro několik hodnot R_x při $C_1=10\text{nF}$.



Obr. 4.31 Modul a fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s LT1228 pro různé hodnoty R_x

Fázovací členek s LT1228 podle obr. 65 byl realizován na univerzální DPS s hodnotami $R_1=R_4=R_5=R_6=1\text{k}\Omega$, $R_2=R_3=120\Omega$, $R_7=1\text{k}\Omega$, $R_8=6\text{k}\Omega$, $R_x=10\text{k}\Omega$ a $C_1=10\text{nF}$. Do vývodu 5 je tedy přiveden proud $I_{SET}=80\mu\text{A}$. Byl změřen modul i fáze jeho přenosu a porovnán s výpočtem ze vzorce (4.16) získaného programem Snap. V tabulce platí, že

$$K[\text{dB}] = 20 \cdot \log \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (4.15)$$

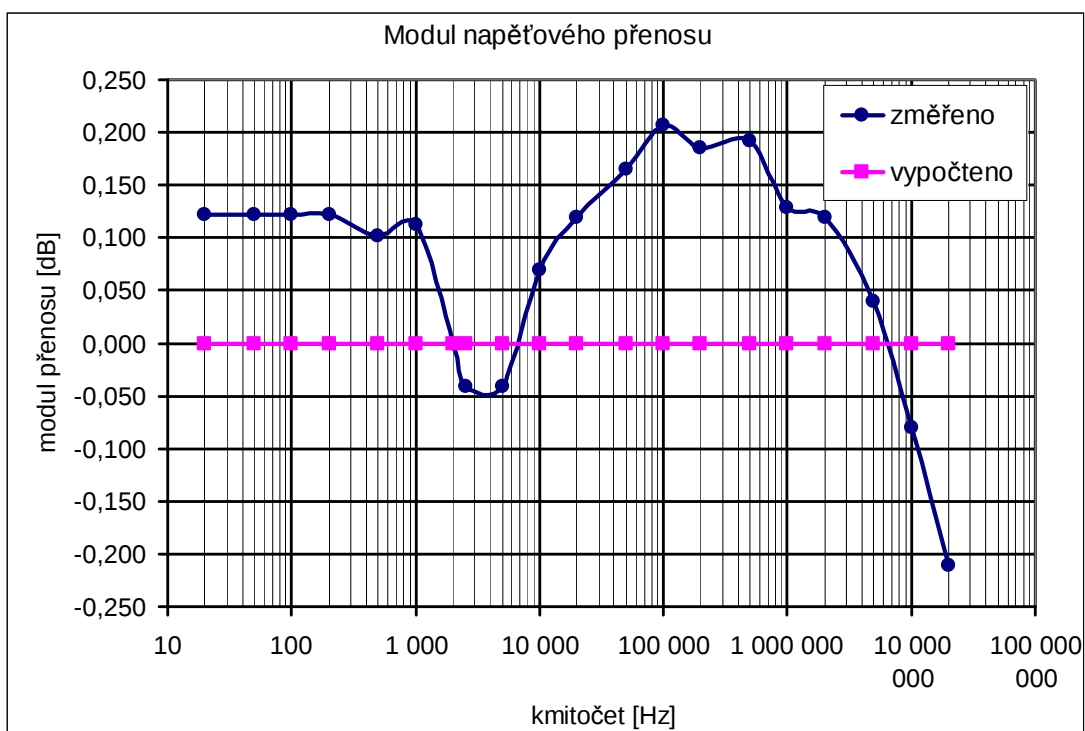
Přenos byl vypočítán pomocí vzorce získaného z programu Snap pro výše zmíněné hodnoty součástek. U VCCS je zvolena hodnota $GAIN=g_m=-0,75\text{mS}$. Byl získán semisymbolický vzorec přenosu.

$$K(s) = -\frac{-1.607143 \cdot 10^4 + s}{1.607143 \cdot 10^4 + s} \quad (4.16)$$

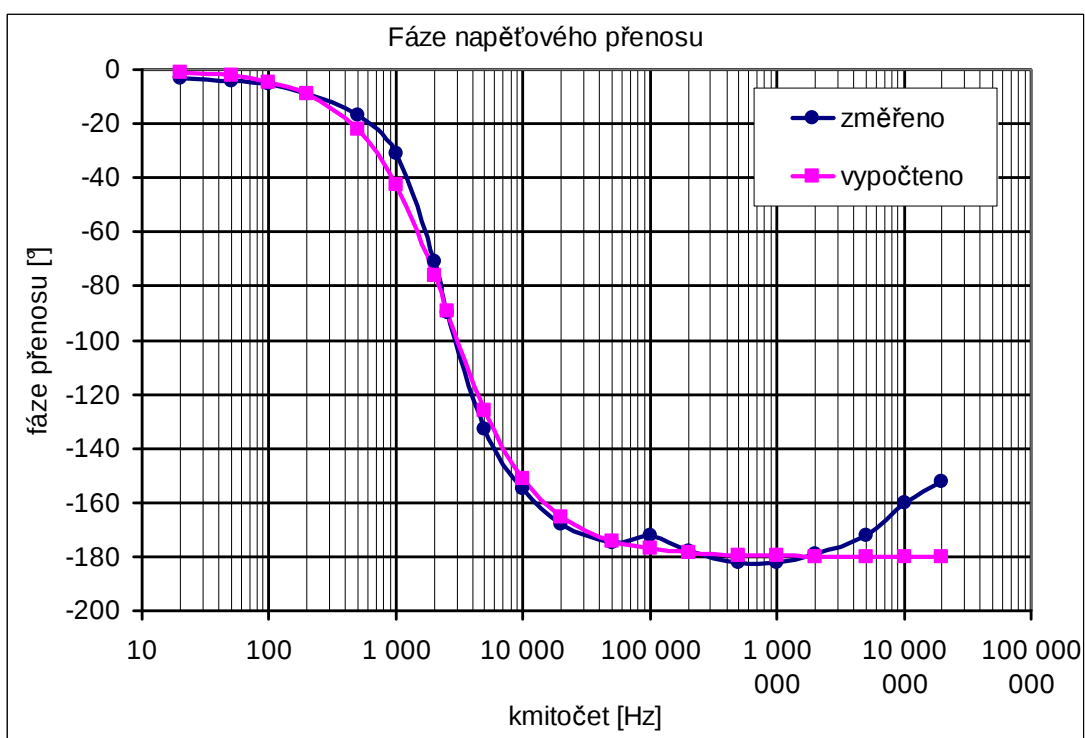
Platí, že $s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f$. (4.17)

Tab. 4.3 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika 1. řádu FČ s LT1228

kmitočet [Hz]	změřený napět'ový přenos				vypočteno	
	U_{in} [mV]	U_{out} [mV]	fáze [°]	K [dB]	K [dB]	fáze [°]
20	849	861	-3	0,122	0	-0,9
50	849	861	-4	0,122	0	-2,2
100	849	861	-5	0,122	0	-4,5
200	848	860	-9	0,122	0	-8,9
500	848	858	-17	0,102	0	-22,1
1 000	846	857	-31	0,112	0	-42,7
2 000	845	845	-71	0,000	0	-76,0
2 537	844	840	-90	-0,041	0	-89,5
5 000	853	849	-133	-0,041	0	-125,8
10 000	866	873	-155	0,070	0	-151,3
20 000	871	883	-168	0,119	0	-165,4
50 000	886	903	-175	0,165	0	-174,1
100 000	871	892	-172	0,207	0	-177,1
200 000	882	901	-178	0,185	0	-178,5
500 000	852	871	-182	0,192	0	-179,4
1 000 000	868	881	-182	0,129	0	-179,7
2 000 000	866	878	-179	0,120	0	-179,9
5 000 000	875	879	-172	0,040	0	-179,9
10 000 000	865	857	-160	-0,081	0	-180,0
20 000 000	876	855	-152	-0,211	0	-180,0

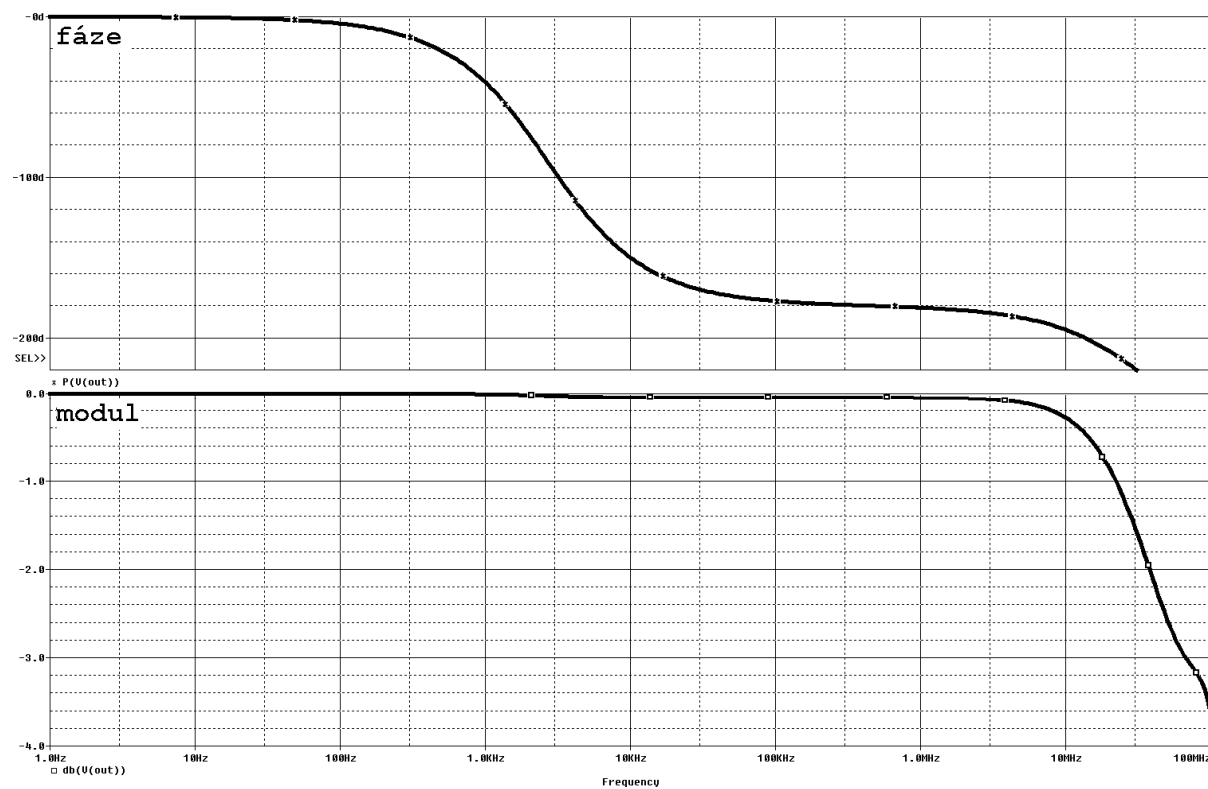


Obr. 4.32 Změřený a vypočtený modul napětového přenosu FČ 1. řádu s LT1228



Obr. 4.33 Změřená a vypočtená fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s LT1228

Je vidět, že výsledky získané měřením na realizovaném přípravku se téměř shodují s výsledky z programu Snap i PSpice.



Obr. 4.34 Modul a fáze napět'ového přenosu FČ 1. řádu s LT1228 pro $C=10\text{nF}$ a $R_x=10\text{k}\Omega$.

4.4 Fázovací článek 1. řádu s negativním proudovým konvejorem

Obvod **EL2082** od výrobce Intersil (dříve Elantec) je negativní proudový konvektor druhé generace, který bývá označován zkratkou CCII-. Jeho šířka pásma činí 150MHz [12].

Jedná se o variantu tříbranového proudového konvektoru GCC (General Current Conveyor). GCC lze popsat branovými rovnicemi.

$$U_x = \alpha U_y \quad I_y = \beta I_x \quad I_z = \gamma I_x \quad (4.18)$$

V případě použitého integrovaného obvodu EL2082 platí $\alpha=1$, $\beta=0$, $\gamma=(-2, 0)$, jedná se tedy o konvektor CCII-. Proudový zisk konvektoru lze měnit v rozsahu 0 až 2 přivedením napětí 0 až 2V na vývod V_{GAIN} .

Koeficienty A1, A2, B1, B2 prvku CCII- byly vyčteny z manuálu k programu Snap [8].

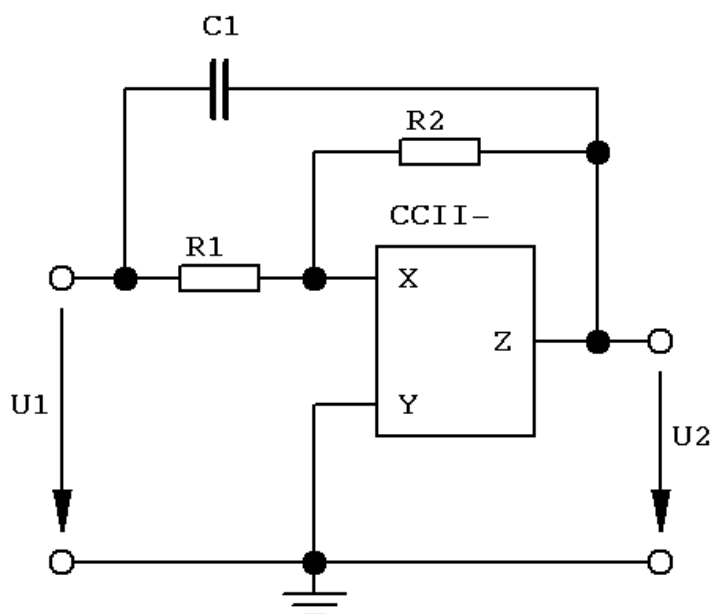
Obr. 4.35 Koeficienty CCII- v programu SNAP (Převzato z [8])

prvek	značka	model	parametry
proudový konvektor 2. generace -	CCII-	GCC3	A1=1 A2=0 B1=0 B2=-1

Hodnota B2 odpovídá nastavitelnému koeficientu γ , který bude nastaven na hodnotu -1,5 pro zajištění správné funkce fázovacího článku.

Fázovací článek [9] s prvkem CCII- pro A1=1, A2=0, B1=0, B2= -1,5 je simulován pomocí programu Snap.

$$K(s) = \frac{-1,5 \cdot R_2 + j \cdot 2\pi f \cdot R_2 \cdot R_1 \cdot C_1}{2,5 \cdot R_1 + j \cdot 2\pi f \cdot R_2 \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (4.19)$$



Obr. 4.36 Fázovací článek 1. řádu s negativním proudovým konvejorem

Byly zvoleny hodnoty součástek $C_1=500\text{pF}$, $R_1= 30\text{k}\Omega$, $R_2= 50\text{k}\Omega$. Byla získán vzorec pro napět'ový přenos (Obr. 4.28). Z něho vyplývá, že pro správnou funkci fázovacího članku je třeba dodržet $R_1=3/5\times R_2$.

$$\frac{\text{symbolic}_-}{-1.5 \cdot R_2 + s \cdot (C_1 \cdot R_1 \cdot R_2)} = \frac{2.5 \cdot R_1}{s \cdot (C_1 \cdot R_1 \cdot R_2)}$$

Obr. 4.37 Vzorec napět'ového přenosu fázovacího članku 1. řádu s negativním proudovým konvejorem

Vypočítáme přenos fázovacího članku pomocí rovnice přenosu z programu Snap. Platí, že $s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f$. (4.20)

$$K(s) = \frac{-1,5 \cdot R_2 + j \cdot 2\pi f \cdot R_2 \cdot R_1 \cdot C_1}{2,5 \cdot R_1 + j \cdot 2\pi f \cdot R_2 \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (4.21)$$

Pro mezní kmitočet $f=15,9 \text{ kHz}$ je přenos

$$K(\omega) \doteq \underline{\underline{1 \angle 90,05^\circ}}$$

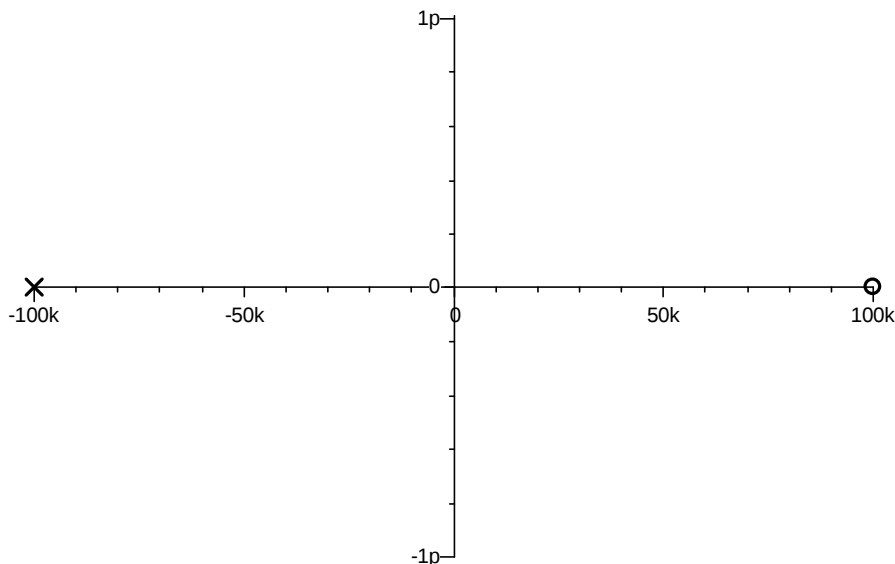
Pro malý kmitočet $f=10 \text{ Hz}$ je přenos

$$K(\omega) \doteq \underline{\underline{1 \angle 179,93^\circ}}$$

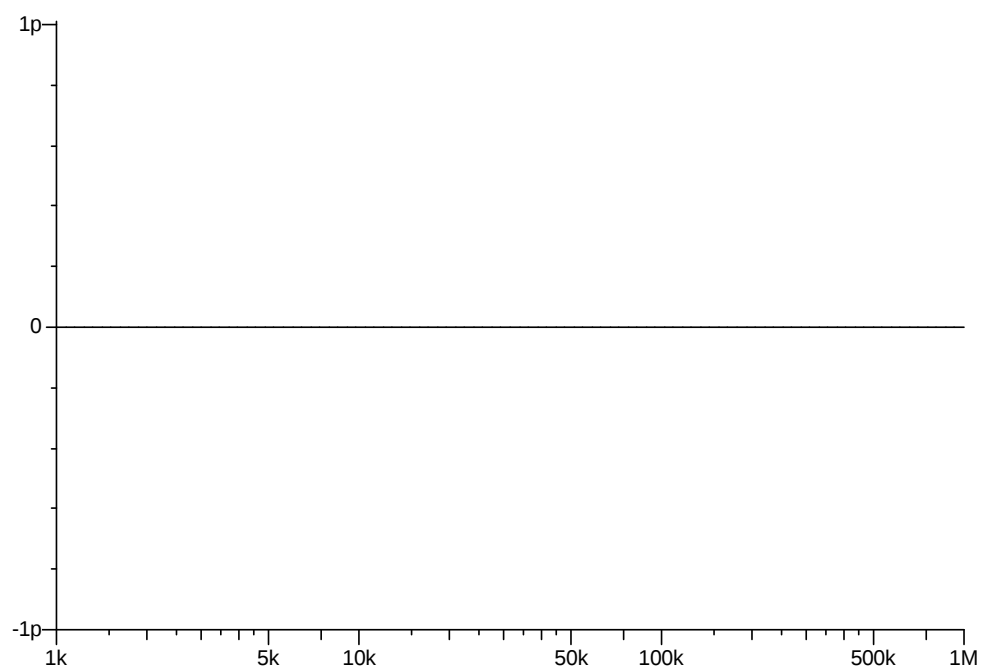
Pro velký kmitočet $f=10 \text{ GHz}$ je přenos

$$K(\omega) \doteq \underline{\underline{1 \angle 0,000182^\circ}}$$

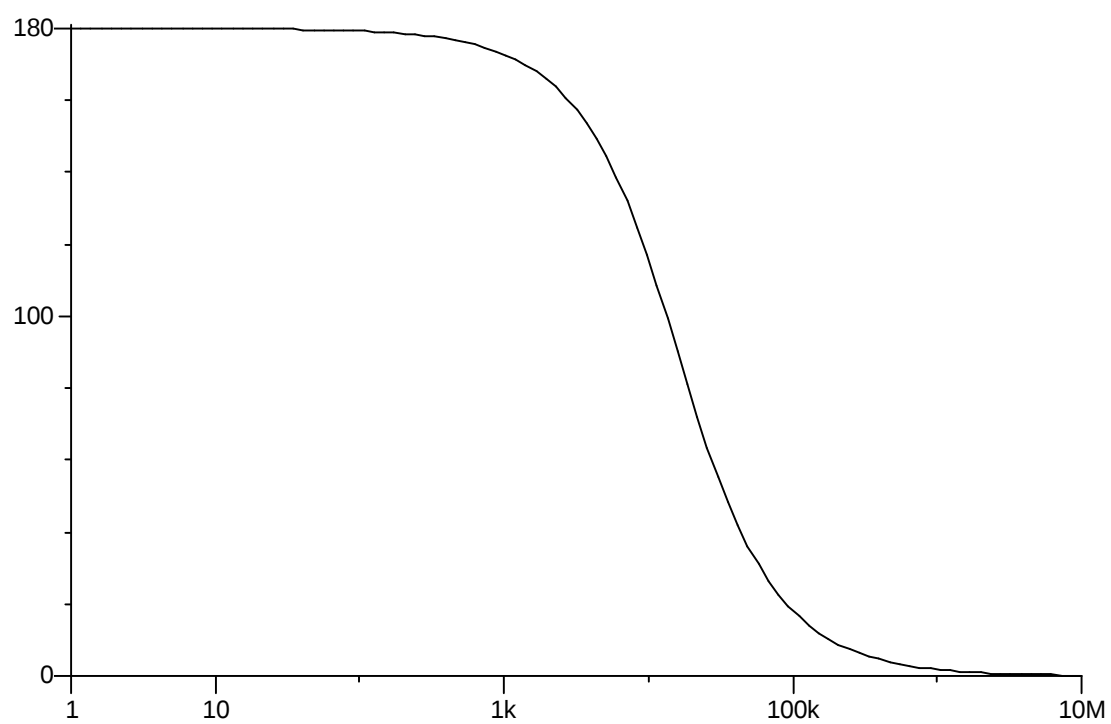
Z programu SNAP získáme rozložení nulových bodů a pólů (Obr. 29), modul napět'ového přenosu (Obr. 30) a fázi napět'ového přenosu (Obr. 31).



Obr. 4.38 Nulové body a póly fázovacího članku 1. řádu s negativním proudovým konvejorem

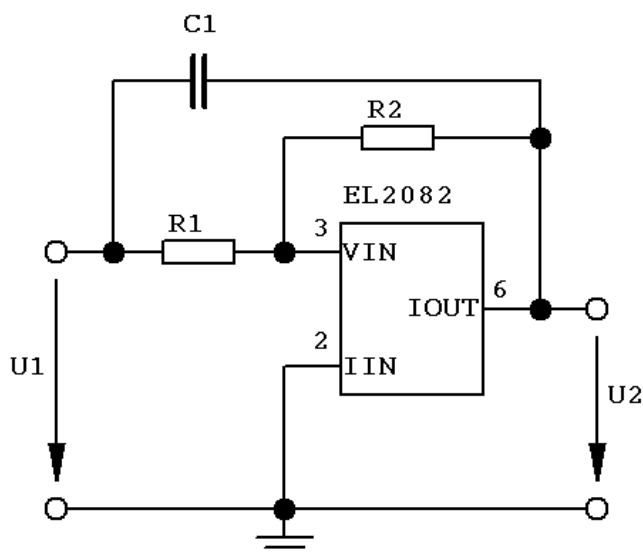


Obr. 4.39 Modul napěťového přenosu fázovacího článku 1. řádu s negativním proudovým konvejorem



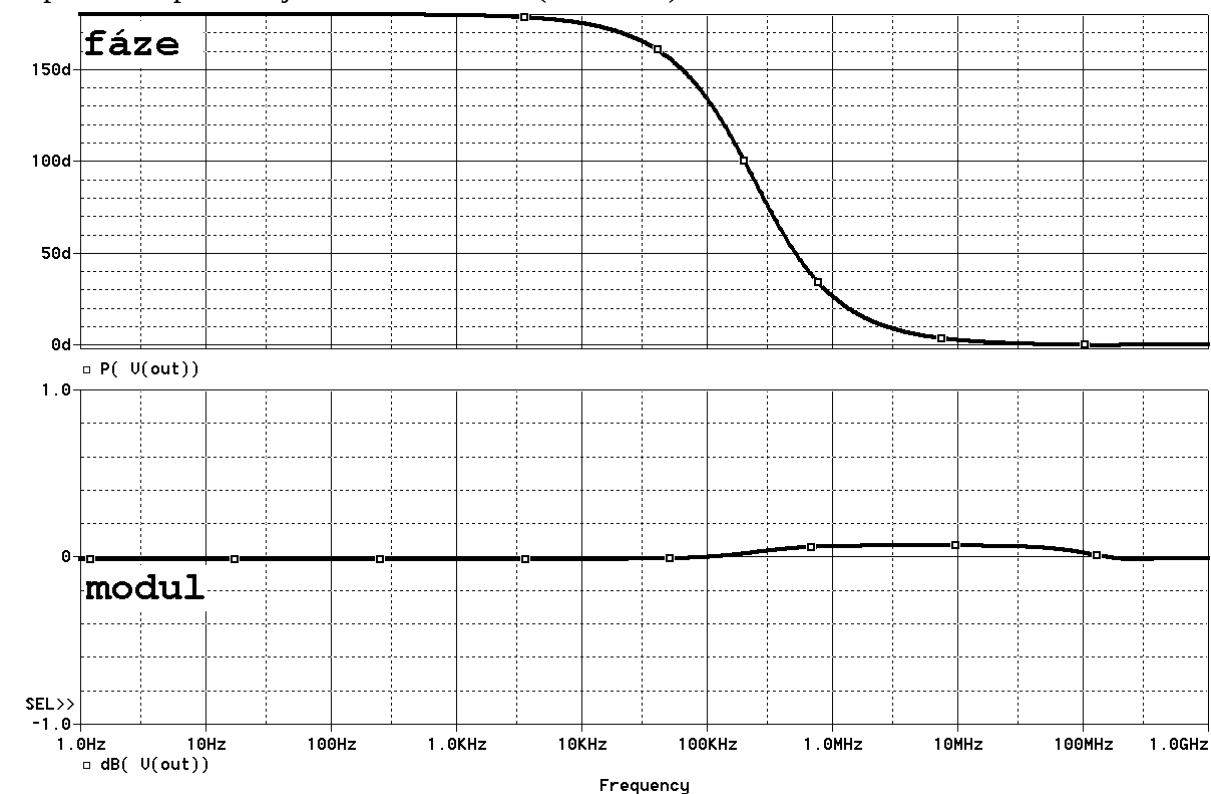
Obr. 4.40 Fáze fázovacího článku 1. řádu s negativním proudovým konvejorem

Nyní bude fázovací člunek s EL2082 simulován programem PSpice. Zjistíme, že v tomto případě je pro správnou funkci fázovacího člunku nutné dodržet podmínku $R_1=R_2$. Zvolíme $R_1=R_2=100\text{k}\Omega$, $V_{\text{GAIN}}=1,5\text{V}$ a $C_1=5\text{n}$. **Výsledky z programu PSpice neodpovídají výsledkům z programu Snap, takže fázovací člunek s EL2082 nebyl použit v měřicím přípravku.**



Obr. 4.41 Fázovací člunek 1. řádu s EL2082

Byl získán graf fáze a modulu napětového přenosu z programu PSpice. Modul napětového přenosu je téměř konstantní (Obr. 4.33).

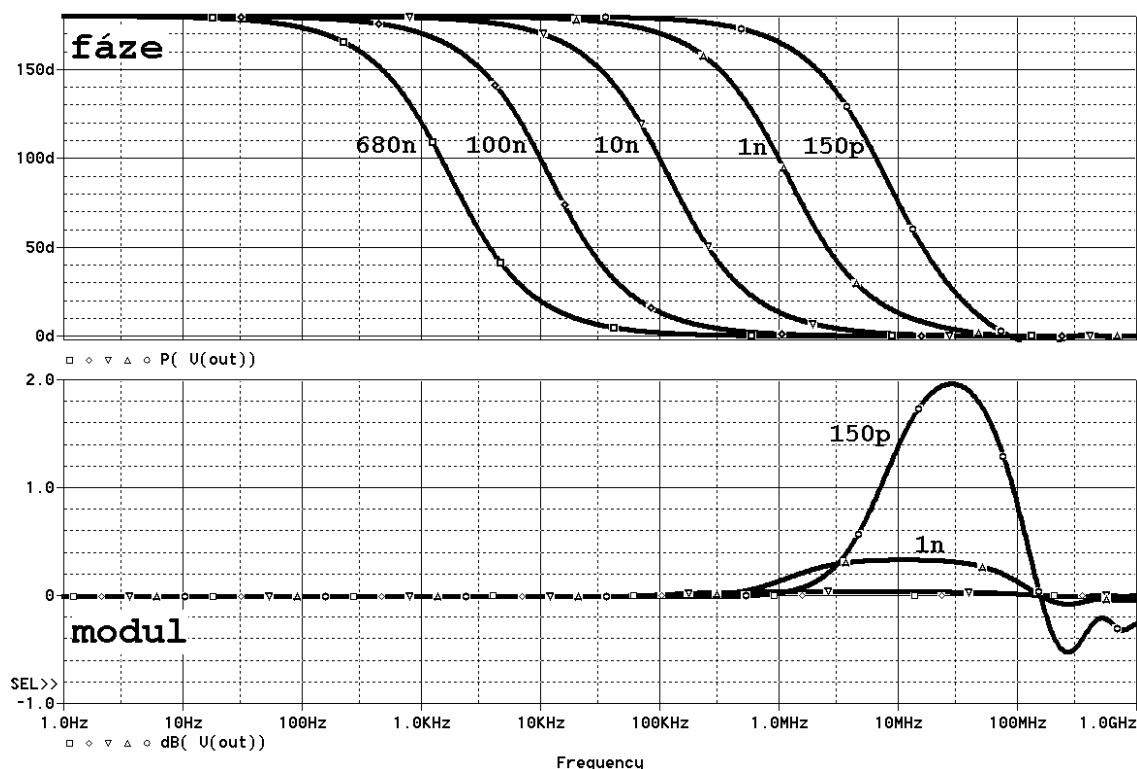


Obr. 4.42 Závislost modulu a fáze napětového přenosu fázovacího člunku 1. řádu s EL2082 na kmitočtu

Fázovací článek lze přeladovat pomocí změny kapacity C_1 . Byl získán graf fáze a modulu napětěvého přenosu pro hodnoty C_1 680nF, 100nF, 10nF, 1nF, 150pF. Od hodnoty 1nF se již objevuje výraznější nelinearita modulu přenosu, která s klesající kapacitou C_1 dále kriticky vzrůstá (Obr 4.34).

Fázovací článek lze přeladovat i pomocí změny napětí V_{GAIN} . Výrobce povoluje jeho rozsah od -1V do 7V. Zde bude použit rozsah 1V až 7V. Byl získán graf fáze a modulu napětěvého přenosu pro hodnoty V_{GAIN} 0.5 V, 1 V, 2 V, 3 V, 4 V, 5 V a 7 V. Dochází k mírné nežádoucí nelinearitě modulu přenosu.

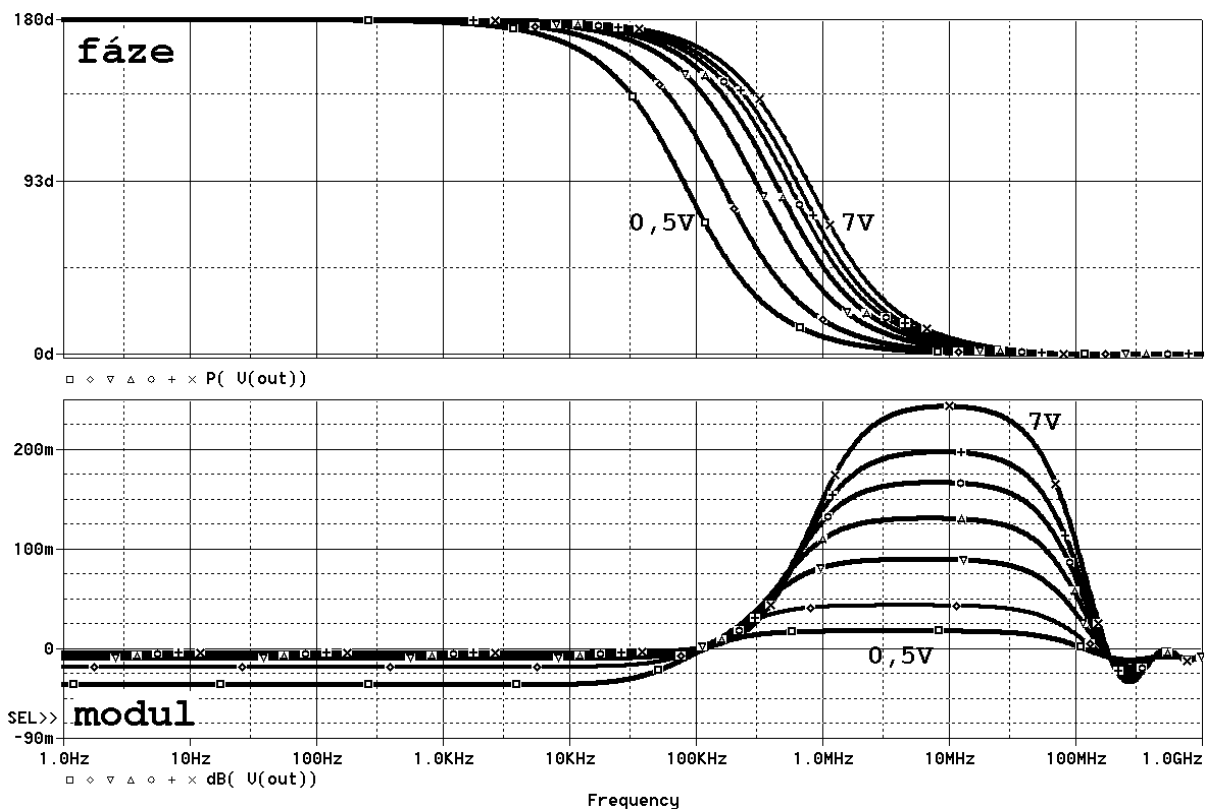
Podle grafů by se zdálo, že fázovací článek s EL2082 bude fungovat až do kmitočtu 1GHz i výše, ale ve skutečnosti výrobce doporučuje použití do 150 MHz [13].



Obr. 4.43 Závislost modulu a fáze napětěvého přenosu fázovacího článku 1. řádu s EL2082 na kmitočtu pro různé hodnoty C

Fázovací článek s EL2082 podle obr. 4.32 byl realizován na univerzální DPS s hodnotami $R_1=100\text{ k}\Omega$, $R_2=100\text{ k}\Omega$, $C_2=22\text{ nF}$ a $V_{GAIN}=0,3\text{ V}$. Byl změřen modul i fáze jeho přenosu a porovnán s průběhem získaným z programu PSpice. V tabulce platí, že

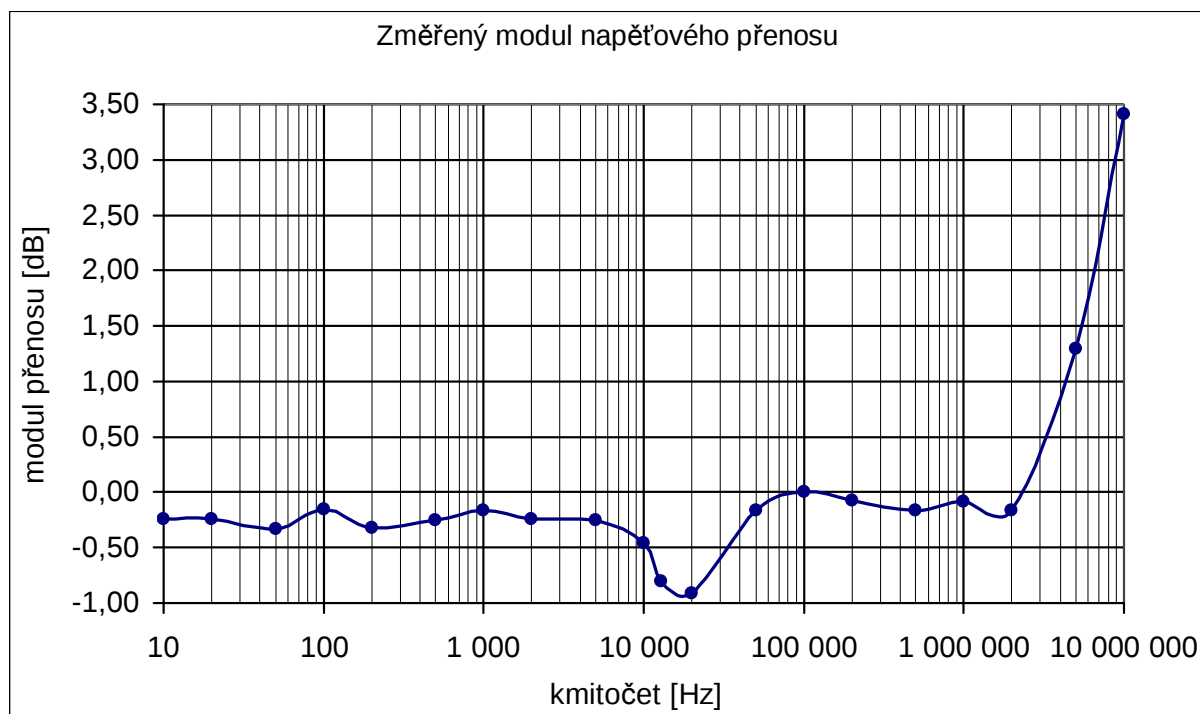
$$K[dB] = 20 \cdot \log \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (4.22)$$



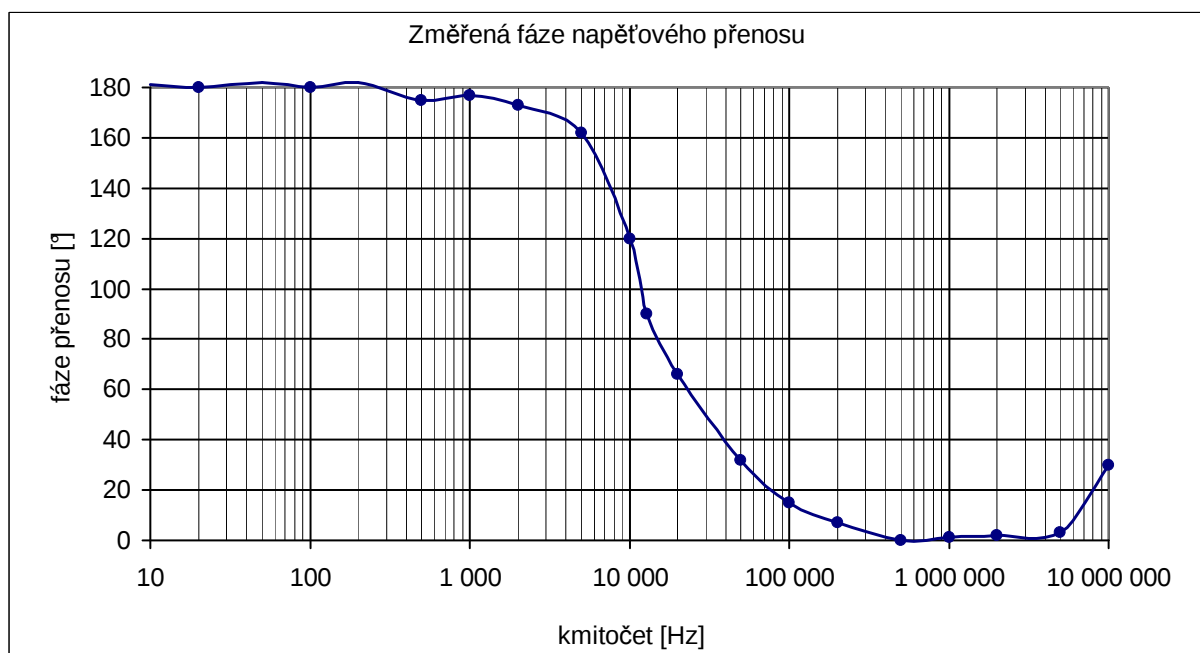
Obr. 4.44 Závislost modulu a fáze napět'ového přenosu fázovacího článku 1. řádu s EL2082 na kmitočtu pro různé hodnoty V_{GAIN} .

Tab. 4.4 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ 1. řádu s EL2082

	změřený napět'ový přenos			
kmitočet [Hz]	U_{in} [V]	U_{out} [V]	fáze [°]	K [dB]
10	1,10	1,07	181	-0,240
20	1,08	1,05	180	-0,245
50	1,08	1,04	182	-0,328
100	1,11	1,09	180	-0,158
200	1,09	1,05	182	-0,325
500	1,07	1,04	175	-0,247
1 000	1,10	1,08	177	-0,159
2 000	1,08	1,05	173	-0,245
5 000	1,06	1,03	162	-0,249
10 000	1,04	0,987	120	-0,454
12 785	1,13	1,03	90	-0,805
20 000	1,11	1,00	66	-0,906
50 000	1,06	1,04	32	-0,165
100 000	1,09	1,09	15	0,000
200 000	1,11	1,10	7	-0,079
500 000	1,10	1,08	0	-0,159
1 000 000	1,10	1,09	1	-0,079
2 000 000	1,10	1,08	2	-0,159
5 000 000	1,12	1,30	3	1,295
10 000 000	1,02	1,51	30	3,408

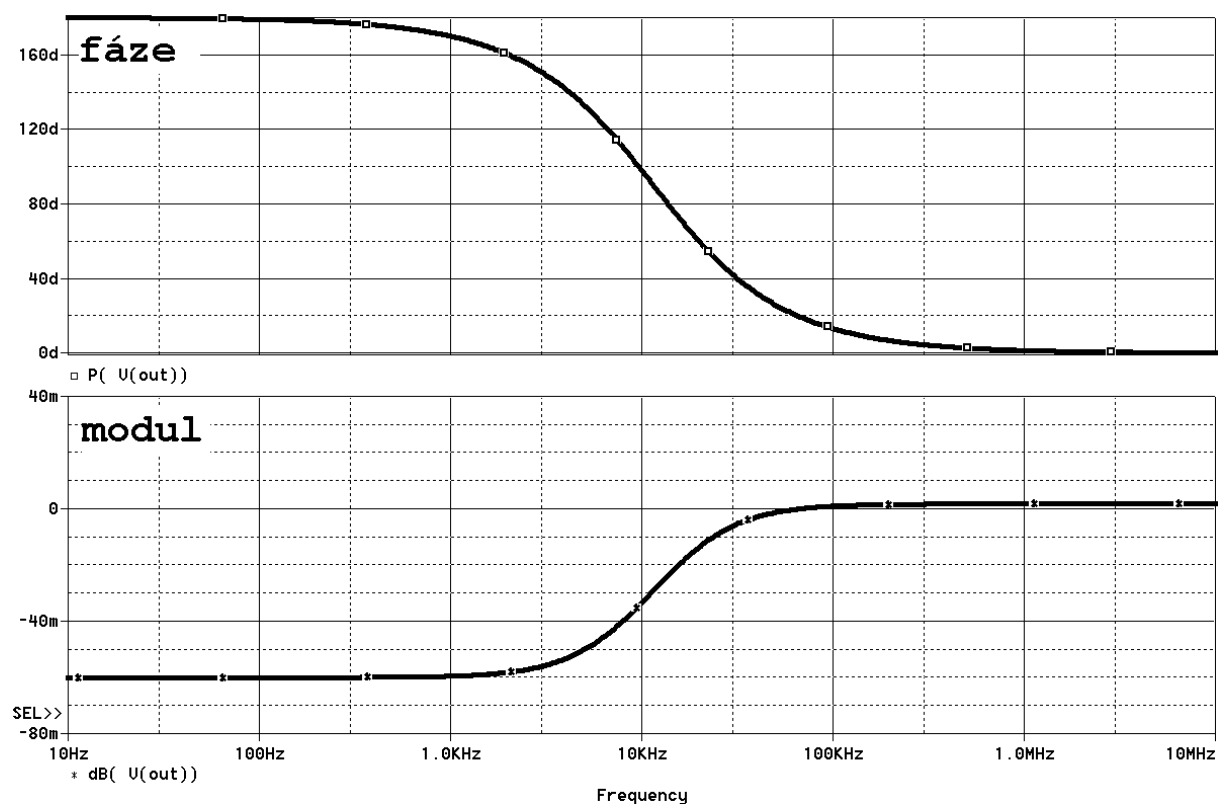


Obr. 4.45 Změřený a vypočtený modul napětového přenosu FČ 1. řádu s EL2082



Obr. 4.46 Změřená a vypočtená fáze napětového přenosu FČ 1. řádu s EL2082

Předchozí grafy se téměř shodují s průběhy získanými z programu PSpice pro výše uvedené hodnoty součástek. Změna modulu napětového přenosu je zanedbatelná.



Obr. 4.47 Závislost modulu a fáze napětového přenosu fázovacího článku 1. řádu s EL2082 na kmitočtu pro $C_2=22\text{nF}$

ZÁVĚR

Bylo uvedeno několik obvodových variant fázovacích článků. Podrobněji bylo rozvedeno použití moderních aktivních funkčních bloků, transadmitančního zesilovače a negativního a pozitivního proudového konvejeoru. Byla nastíněna struktura laboratorní úlohy se třemi fázovacími články s různými aktivními prvky. Byl vyroben a odzkoušen měřicí přípravek obsahující fázovací článek 1. řádu s AD844 (CCII+), fázovací článek 2. řádu se dvěma AD844 a fázovací článek 1. řádu s LT1228 (OTA + CFA). U posledního jmenovaného se objevuje drobné rušení resp. oscilace na kmitočtu cca 50 MHz. Jsou způsobeny patrně dlouhými kablíky, kterými lze připojovat různé kondenzátory. Toto rušení ovšem nemá téměř žádný negativní vliv na chod měřicího přípravku. Byl vyroben a odzkoušen i fázovací článek s EL2082 (CCII -), ale nepodařilo se odvodit vyhovující vzorec přenosu v programu Snap, takže se zapojení nezahrnulo do měřicího přípravku. Dále bylo uskutečněno několik neúspěšných pokusů o vyrobení fázovacího článku s diamantovým zesilovačem OPA660. Bylo zjištěno, že funkce automatického měření fáze se vyskytuje pouze u novějších modelů osciloskopů řady HP 54600

U vzniklé laboratorní úlohy je velmi vhodné vypočítat fáze přenosu již v rámci domácí přípravy.

LITERATURA

- [1] SU, K. *Analog filters, second edition*, Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2002
- [2] DOSTÁL, T. *Elektrické filtry*, Brno: FEKT VUT v Brně, 2004
- [3] SCHAUHMANN, R., VAN VALKENBURG, M. *Design of analog filters*, New York: Oxford University Press, 2001
- [4] HÁJEK, K., SEDLÁČEK, J., *Kmitočtové filtry*, Praha: BEN – technická literatura, 2002
- [5] DOSTÁL, T. *Teorie obvodů*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.
- [6] KOLKA, Z. *Počítačové řešení elektronických obvodů*. Elektronické Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [7] KOLKA, Z. *Analýza elektronických obvodů programem OrCAD PSpice*. Elektronické Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.
- [8] KOLKA, Z. *Analýza elektronických obvodů programem SNAP*. Elektronické Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.
- [9] PETRŽELA, J. *Elektrické filtry*. Elektronické přednášky. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011
- [10] DOSTÁL, T., BRANČÍK, L. *Analogové elektronické obvody*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [11] Product data sheet AD844 [online]. [cit. 21. prosince 2011] Dostupné na [www: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD844.pdf>](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD844.pdf)
- [12] Product data sheet EL2082 [online]. [cit. 21. prosince 2011] Dostupné na [www: <http://www.intersil.com/data/fn/fn7152.pdf>](http://www.intersil.com/data/fn/fn7152.pdf)
- [13] Product data sheet LT1228 [online]. [cit. 23. května 2011] Dostupné na [www: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/1228fc.pdf>](http://cds.linear.com/docs/Datasheet/1228fc.pdf)
- [14] WINDER, S. *Analog and digital filter design*, Woburn: Newnes, 2002

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

K_u	Přenos napětí
K_i	Přenos proudu
Z_{inp}	Vstupní impedance
$F(s)$	Funkce popisující obvod v kmitočtové oblasti
$\check{F}\check{C}$	Fázovací členek
$Y(s)$	Laplaceův obraz odezvy
$X(s)$	Laplaceův obraz buzení
$K(\omega)$	Přenos závislý na kmitočtu
$F(\omega)$	Modul přenosu
$\varphi(\omega)$	Fáze (argument) přenosu
ω	Úhlová frekvence
f	Frekvence
o	Nulový bod
x	Pól
z_j	Nulový bod
p_k	Pól
n	Nulový bod
$\tau(\omega)$	Skupinové zpoždění
CCVS	Current controlled voltage source (zdroj napětí řízený proudem)
VCCS	Voltage controlled current source (zdroj proudu řízený proudem)
CFA	Current feedback amplifier (transimpedanční zesilovač)
GCC	General current conveyor (obecný tříbranový proudový konvektor)
CCII+	Pozitivní proudový konvektor druhé generace
CCII-	Pozitivní proudový konvektor druhé generace
OTA	Operational Transconductance Amplifier (transadmitanční zesilovač)
BOTA	Balanced Output Transconductance Amplifier
SNAP	Symbolic Network Analysis Program (Program pro symbolickou, semisymbolickou a numerickou analýzu elektronických obvodů)
j	Imaginární jednotka

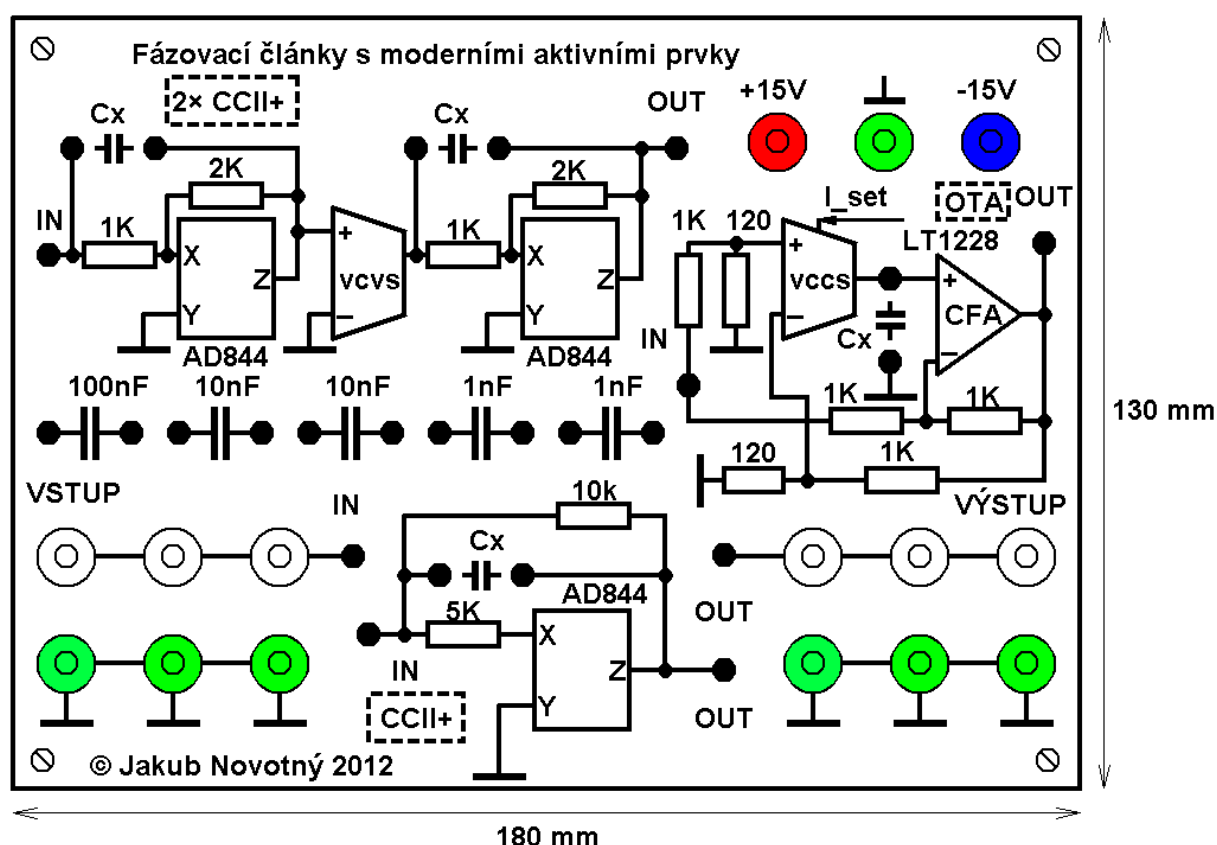
SEZNAM PŘÍLOH

A	Návrh zařízení	74
A.1	Měřicí přípravek.....	74
A.2	Fotografie měřicího přípravku	76
A.3	Obvodové zapojení.....	77
A.4	Deska plošného spoje – top (strana součástek)	78
A.5	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů).....	78
A.6	Předloha pro přední panel	79
B	Seznam součástek	80
C	Zadání laboratorní úlohy	82
C.1	Prázdné zadání laboratorní úlohy	82
C.2	Vyplněné zadání laboratorní úlohy	96

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Měřicí přípravek

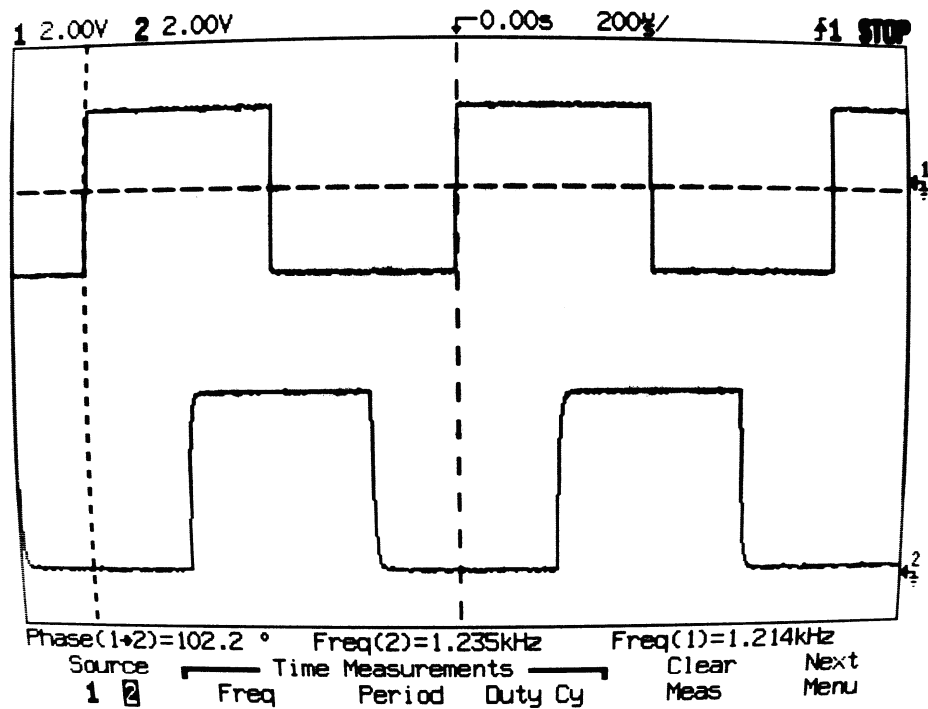
Měřicí přípravek obsahuje 3 druhy fázovacích článků s integrovanými obvody AD844 a LT1228. Vypadá následovně (Obr. 5.1).



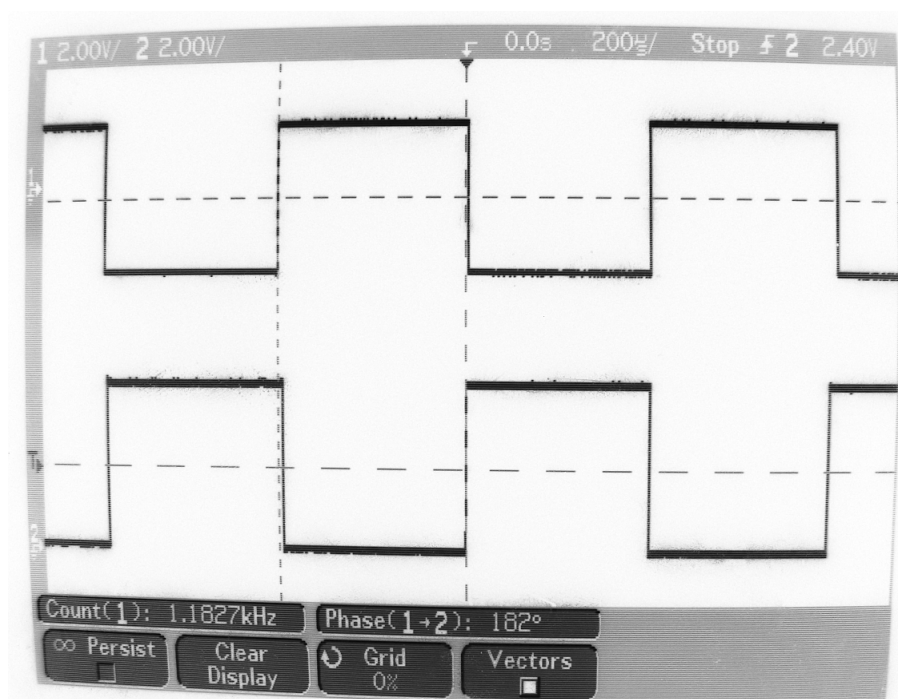
Obr. 4.48 Měřicí přípravek

Typický rozměr předního cuprexitového panelu ve školní laboratoři bývá 180×130 mm. Stejný rozměr byl použit i zde. Přípravek je napájen ze symetrického zdroje 15V. Miniaturní černé zdířky typu 6AF280 slouží k připojení požadovaného fázovacího článku a k výběru vhodného kondenzátoru. Bílé a zelené zdířky standardní velikosti slouží k připojení signálního generátoru (např. Agilent 33220), dvoukanalového ručkového AC milivoltmetru s kmitočtovým rozsahem alespoň 10Hz – 1MHz (např. GVT-427B) a vhodného digitálního osciloskopu, který umožňuje automatické měření rozdílu fáze vstupního a výstupního signálu fázovacího článku (např. Hewlett-Packard 54603B nebo Agilent 54624A).

Běžné digitální osciloskopy Tektronix řady TDS 1000 ani TDS 2000 nejsou vhodné, protože neumožňují automatické měření rozdílu fáze dvou signálů. Lze sice použít režim XY s Lissajousovými obrazci, ale tyto osciloskopy v režimu XY nenabízejí kurzorové měření.

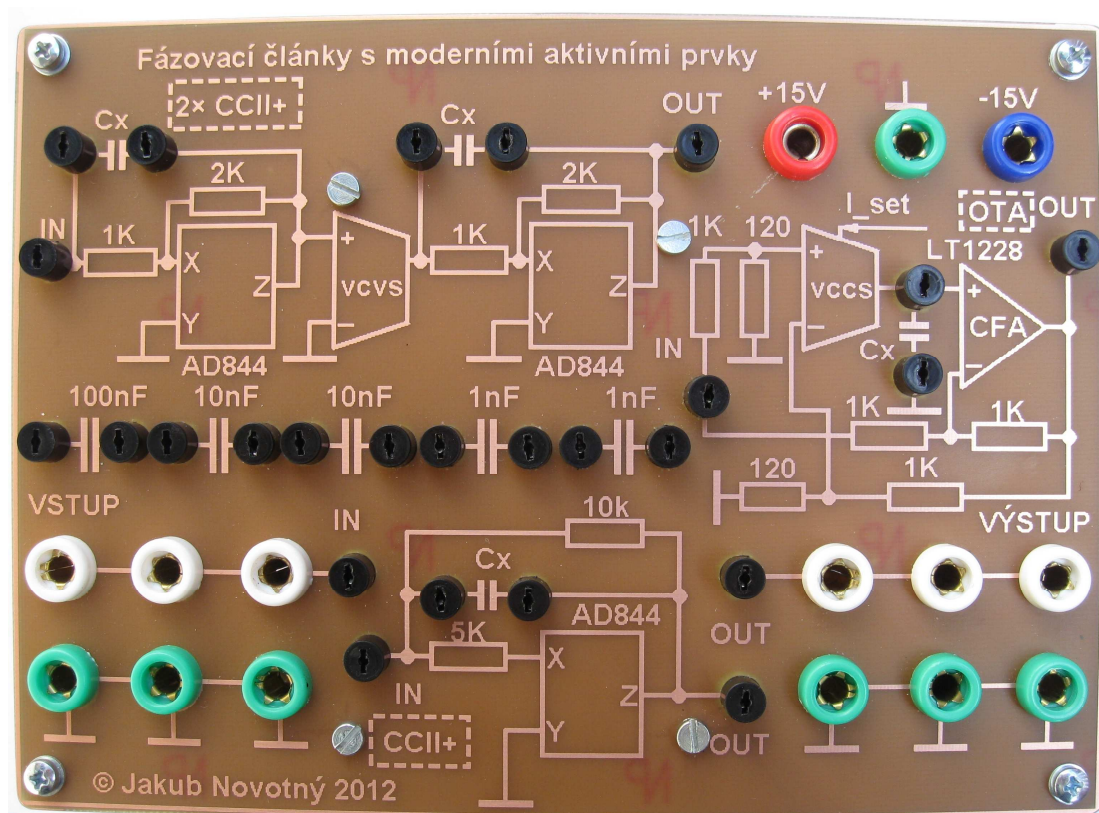


Obr. 4.49 Automatické měření rozdílu fáze osciloskopem Hewlett Packard 54603B

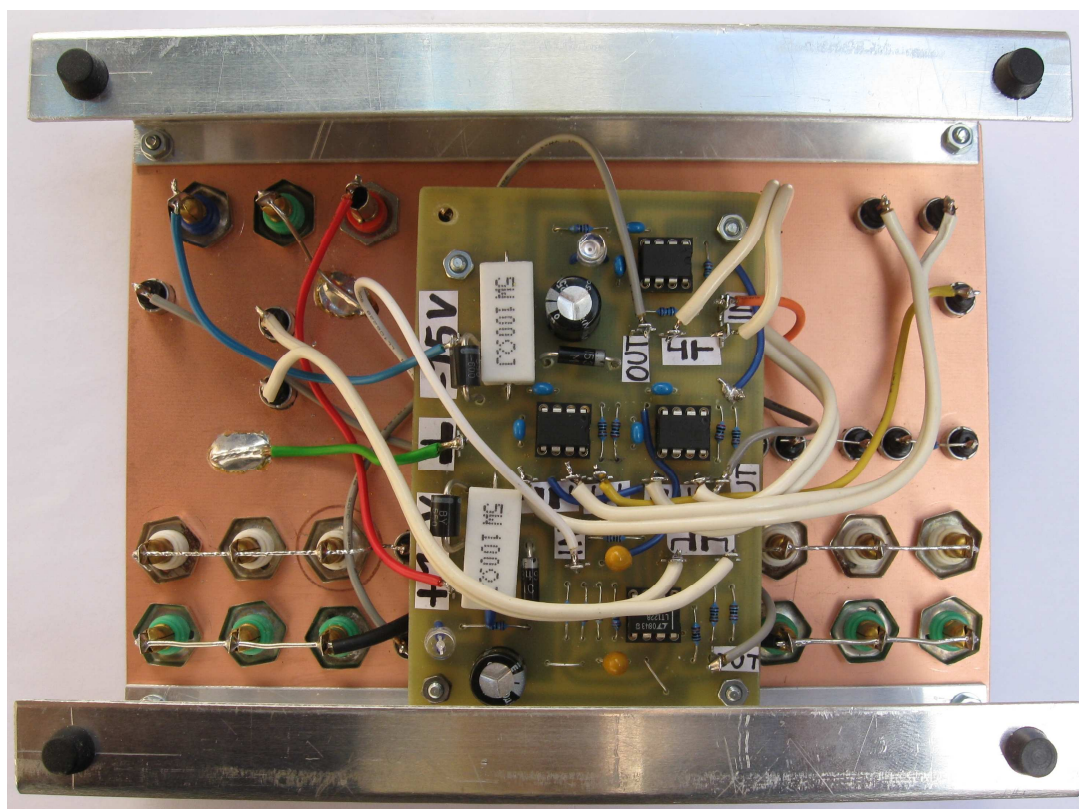


Obr. 4.50 Automatické měření rozdílu fáze osciloskopem Agilent 54624A

A.2 Fotografie měřicího přípravku

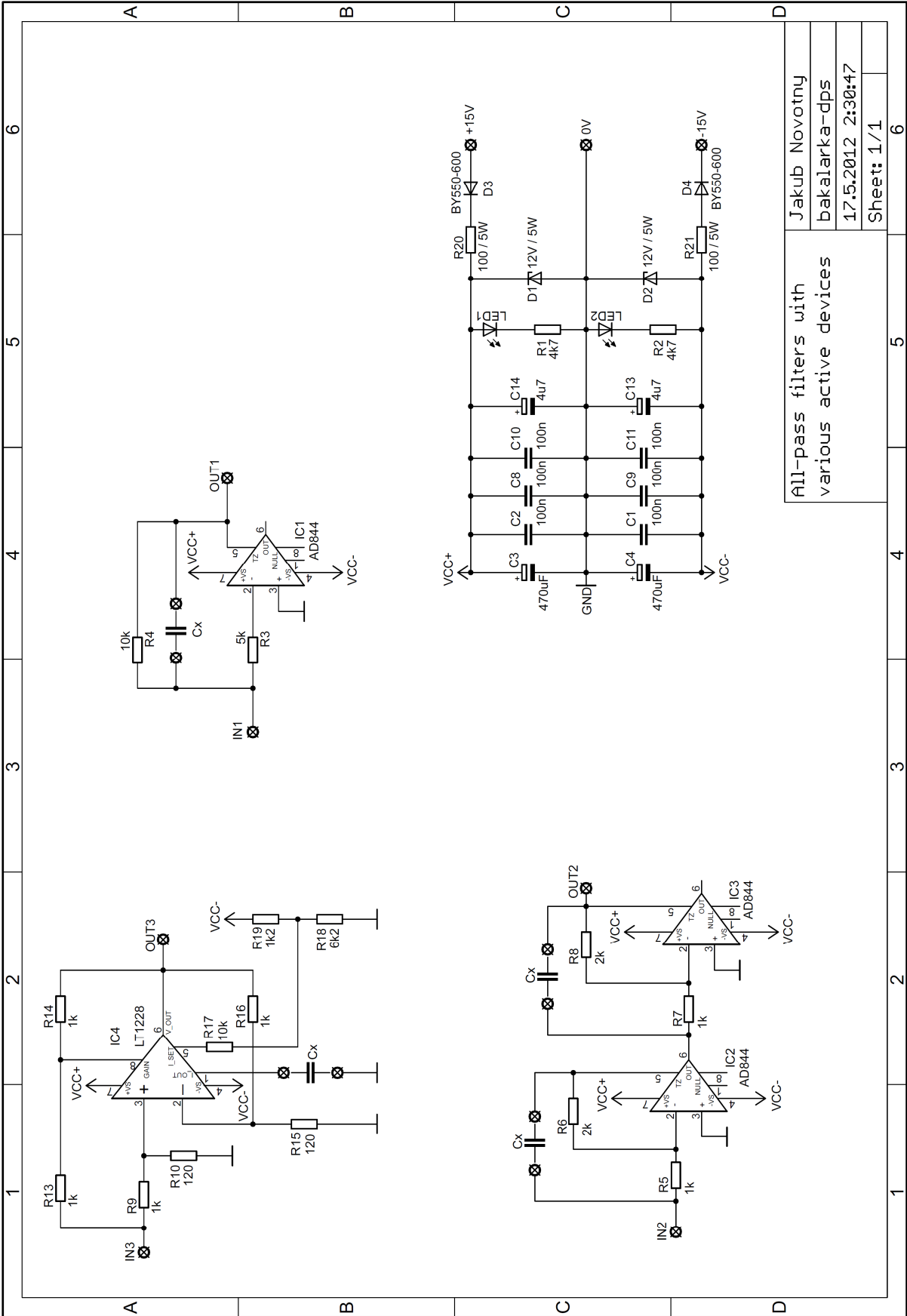


Obr. 4.51 Přední strana měřicího přípravku



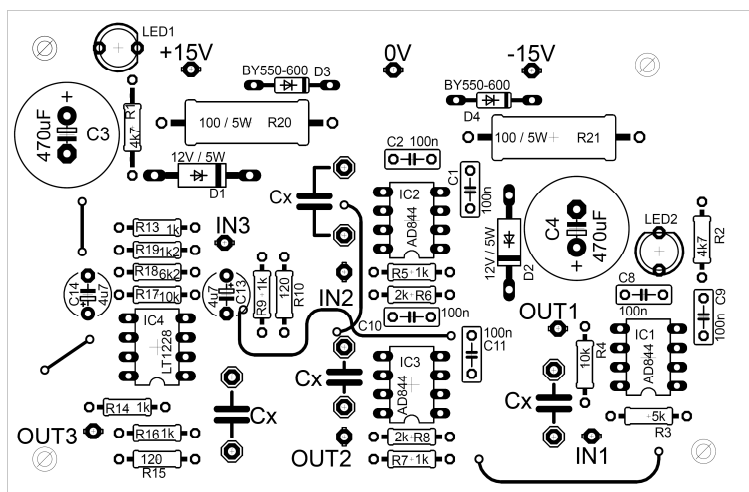
Obr. 4.52 Zadní strana měřicího přípravku

A.3 Obvodové zapojení



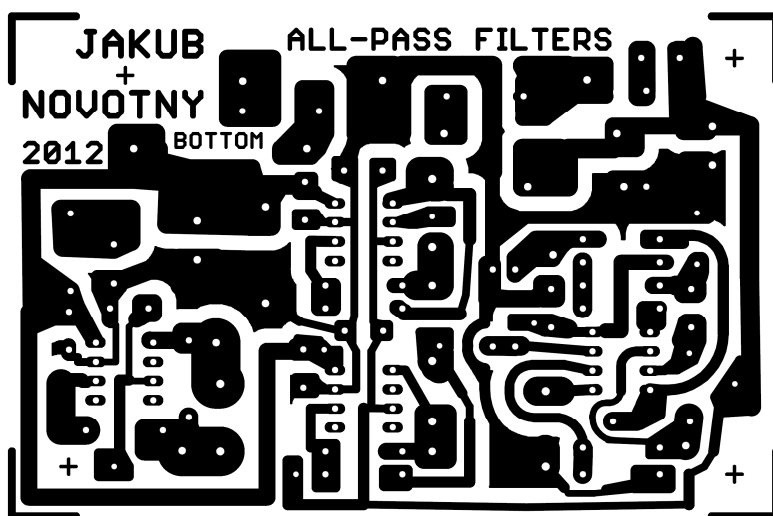
All-pass filters with various active devices	Jakub Novotný
	bakalarka-dps
	17.5.2012 2:30:47
	Sheet: 1/1

A.4 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



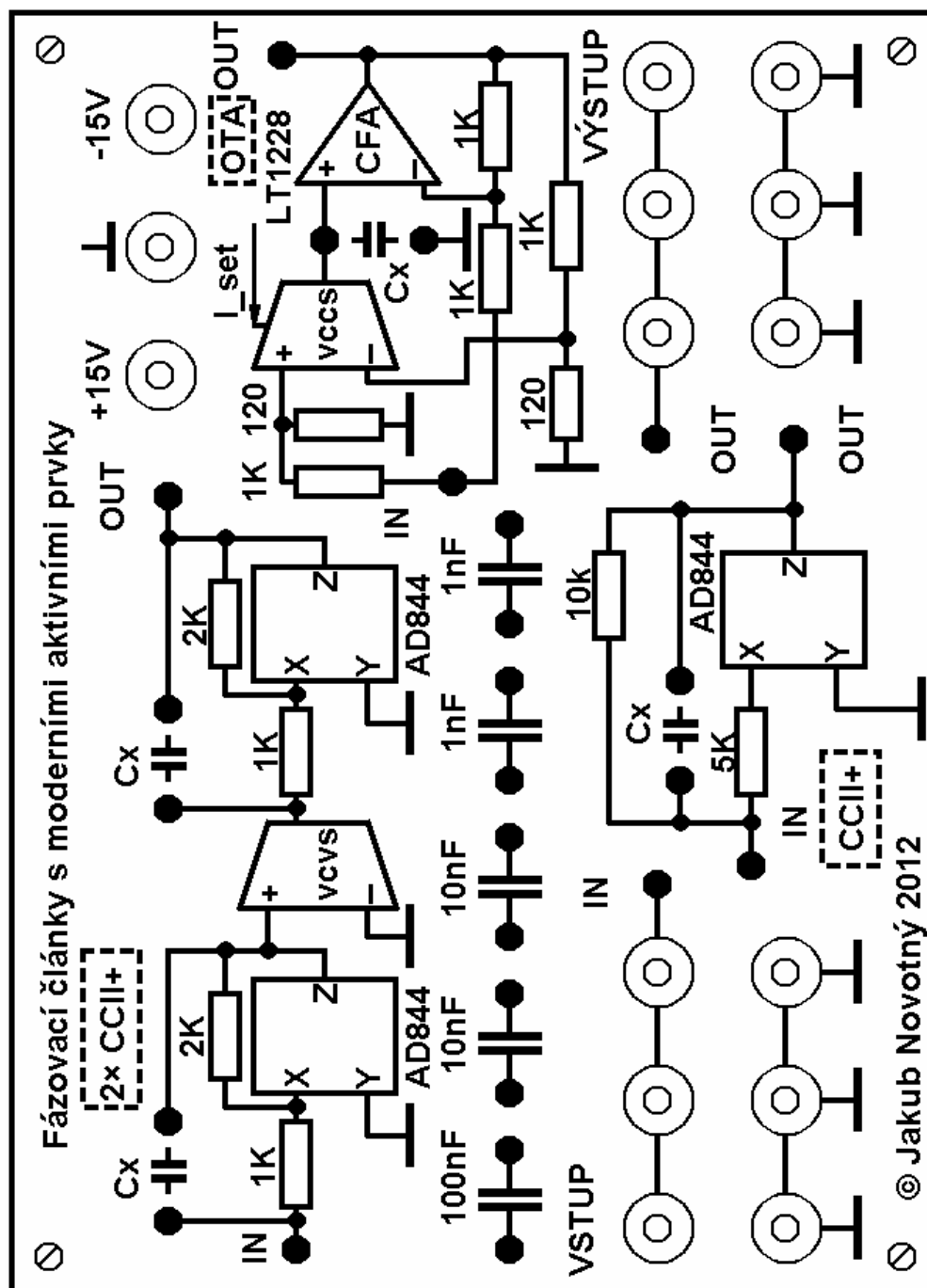
Rozměr desky 100 x 65 [mm], měřítko M1:1

A.5 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 100 x 65 [mm], měřítko M1:1

A.6 Předloha pro přední panel



Rozměr desky 180 x 130 [mm], měřítko M1:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	4k7	0207/12	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R2	4k7	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R3	5kΩ	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R4	10kΩ	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R5	1kΩ	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R6	2kΩ	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R7	1kΩ	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R8	2kΩ	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R9	1kΩ	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R10	120Ω	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R13	1kΩ	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R14	1kΩ	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R15	120Ω	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R16	1kΩ	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R17	10kΩ	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R18	6k2	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R19	1k2	0207/10	Metalizovaný rezistor 0,4W 1%
R20	100Ω	22×9,5×9 mm	Metaloxidový rezistor 5W 5%
R21	100Ω	22×9,5×9 mm	Metaloxidový rezistor 5W 5%
C1	100nF/50V	rozteč 5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C2	100nF/50V	rozteč 5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C3	470μF/25V	10×13mm, rozteč 5mm	Elektrolytický kondenzátor
C4	470μF/25V	10×13mm, rozteč 5mm	Elektrolytický kondenzátor
C5	100nF/50V	rozteč 5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C6	100nF/50V	rozteč 5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C7	100nF/50V	rozteč 5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C8	100nF/50V	rozteč 5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C9	100nF/50V	rozteč 5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C10	100nF/50V	rozteč 5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C11	100nF/50V	rozteč 5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C12	100nF/50V	rozteč 5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C13	4μ7/35V	rozteč 5mm	Miniaturní tantalový kondenzátor
C14	4μ7/35V	rozteč 5mm	Miniaturní tantalový kondenzátor
C15	1nF/50V	rozteč 2,5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C16	1nF/50V	rozteč 2,5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C17	10nF/50V	rozteč 2,5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C18	10nF/50V	rozteč 2,5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
C19	100nF/50V	rozteč 2,5mm	Miniaturní keramický kondenzátor
D1	1N5349B	DO-201	Zenerova dioda 12V/5W
D2	1N5349B	DO-201	Zenerova dioda 12V/5W
D3	BY550-600	5,4×7,5mm	Univerzální dioda 600V/5A

D4	BY550-600	5,4×7,5mm	Univerzální dioda 600V/5A
LED1	Zelená	5mm	Supersvítivá LED čirá
LED2	Červená	5mm	Supersvítivá LED čirá
IC1	AD844	DIL08	Integrovaný obvod- CCII+
IC2	AD844	DIL08	Integrovaný obvod- CCII+
IC3	AD844	DIL08	Integrovaný obvod- CCII+
IC4	LT1228	DIL08	Integrovaný obvod- OTA+CFA
+15V	LST1094	výška 2,8 mm, pro otvor 1,2mm	Pájecí očko OSTERRATH
-15V	LST1094	výška 2,8 mm, pro otvor 1,2mm	Pájecí očko OSTERRATH
0V	LST1094	výška 2,8 mm, pro otvor 1,2mm	Pájecí očko OSTERRATH
LSP1 až LSP8	LST1094	výška 2,8 mm, pro otvor 1,2mm	Pájecí očko OSTERRATH
OUT1 až OUT3	LST1094	výška 2,8 mm, pro otvor 1,2mm	Pájecí očko OSTERRATH
7 ks	zdířka	pro otvor 8 mm a banánek 4mm	Zdířka běžná zelená
6 ks	zdířka	pro otvor 8 mm a banánek 4mm	Zdířka běžná bílá
1 ks	zdířka	pro otvor 8 mm a banánek 4mm	Zdířka běžná červená
1 ks	zdířka	pro otvor 8 mm a banánek 4mm	Zdířka běžná tmavě modrá
26 ks	6AF280	pro otvor 5,4 mm	Zdířka miniaturní černá

C ZADÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY

C.1 Prázdné zadání laboratorní úlohy

LABORATORNÍ ÚLOHA

Fázovací články s prvky OTA a CCII+

Teoretický úvod

Ve sdělovací technice i jinde bývá často nutno upravit fázové poměry zpracovávaných signálů. Všeprupustné fázovací články umožňují upravovat průběh argumentové charakteristiky určité soustavy a to beze změny modulové charakteristiky.

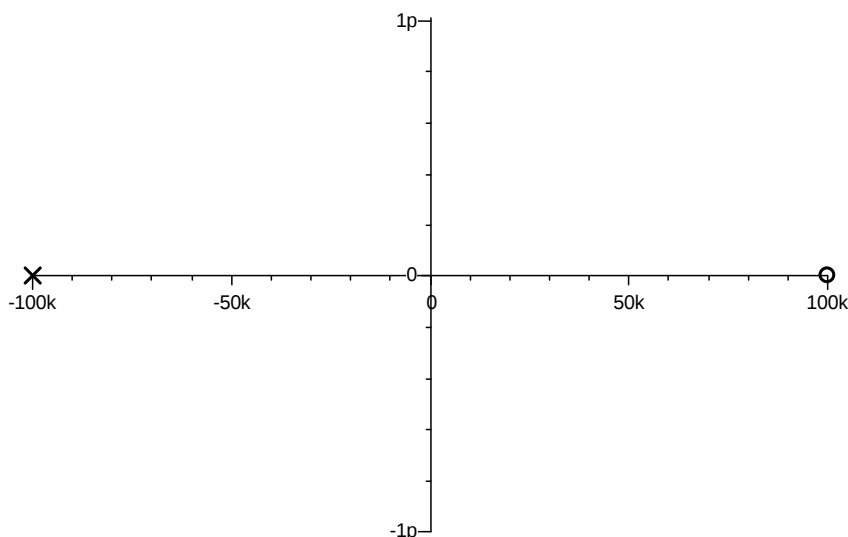
Používají se při návrhu zpožďovacích článků, fázovacích korektorů, dále ve filtrech, místo integrátorů, což dovoluje zlepšit jejich stabilitu a rozšířit přenášené kmitočtové pásmo. V dnešní době narůstá význam těchto filtrů. Pro tvorbu fázovacích článků lze využít pasivní prvky RCL, nebo aktivní prvky, tedy operační zesilovače a jim příbuzné integrované obvody.

Fázovací články 1. řádu

Fázovací články prvního řádu lze popsat rovnicí napět'ového přenosu

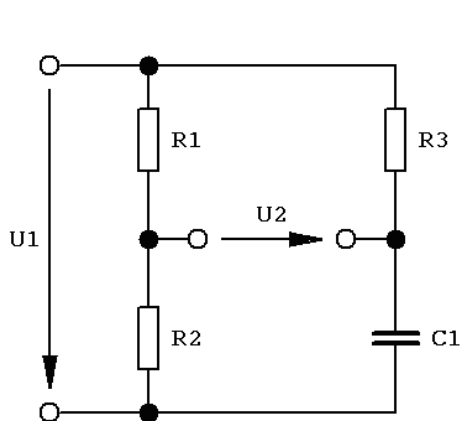
$$K(s) = K_0 \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} \quad (1)$$

Rozložení nulových bodů „○“ a pólů „×“ proto musí být symetrické podle imaginární osy v komplexní rovině. Pro zajištění stability obvodu musí být pól v záporné polorovině a nulový bod v kladné. Rozložení může být následující.

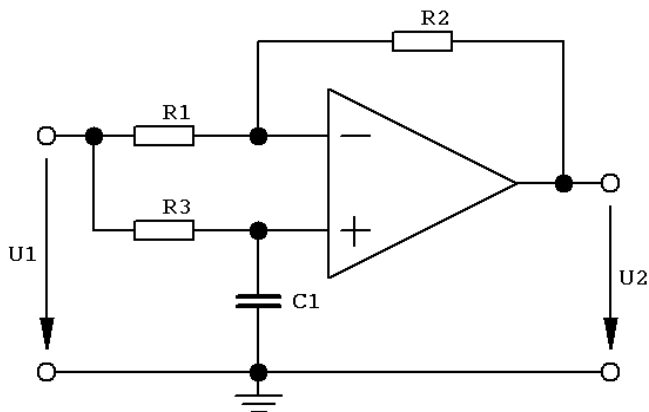


Obr. 4.53 Možné rozložení nulových bodů a pólů FČ 1. řádu

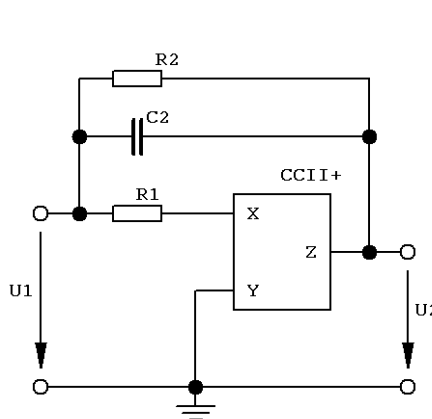
Fázovací články prvního řádu lze realizovat mj. pomocí pasivních součástek nebo běžných operačních zesilovačů. V této úloze je použit IO AD844, který zde funguje jako pozitivní proudový konvektor druhé generace (CCII+) a dále LT1228, jenž představuje spojení transadmitančního zesilovače (OTA) a transimpedančního zesilovače (CFA) v jednom pouzdru.



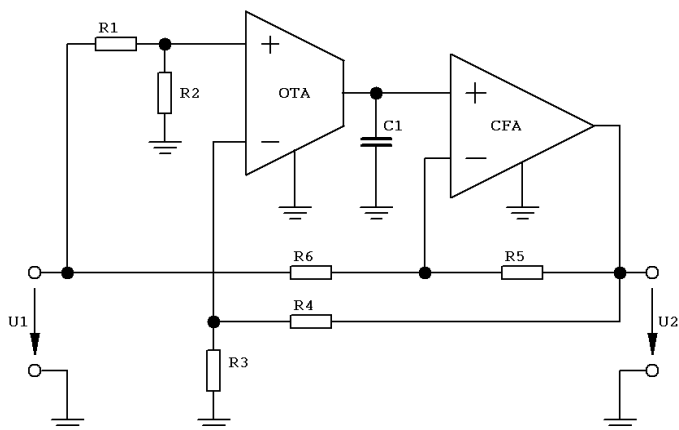
Obr. 4.54 FČ 1. řádu s pasivními prvky



Obr. 4.55 FČ 1. řádu s operačním zesilovačem



Obr. 4.56 FČ 1. řádu s IO AD844 (CCII+) (OTA+CFA)



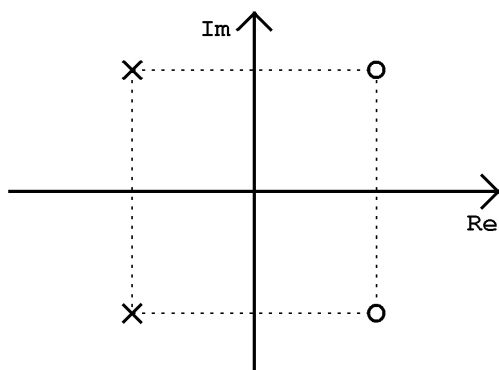
Obr. 4.57 FČ 1. řádu s IO LT1228

Fázovací články 2. řádu

Fázovací články druhého řádu lze popsat rovnicí napět'ového přenosu.

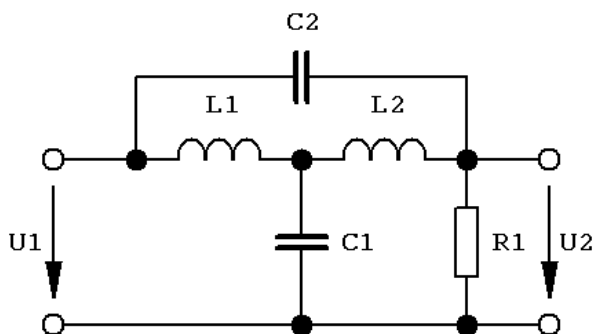
$$K(s) = K_0 \frac{s^2 - b_1 \cdot s + b_0}{s^2 + b_1 \cdot s + b_0} \quad (2)$$

Čítenel a jmenovatel jsou shodné až na znaménko u druhého členu polynomu. Nulové body jsou umístěny v pravé polorovině symetricky ku dvěma komplexně sdruženým pólům.

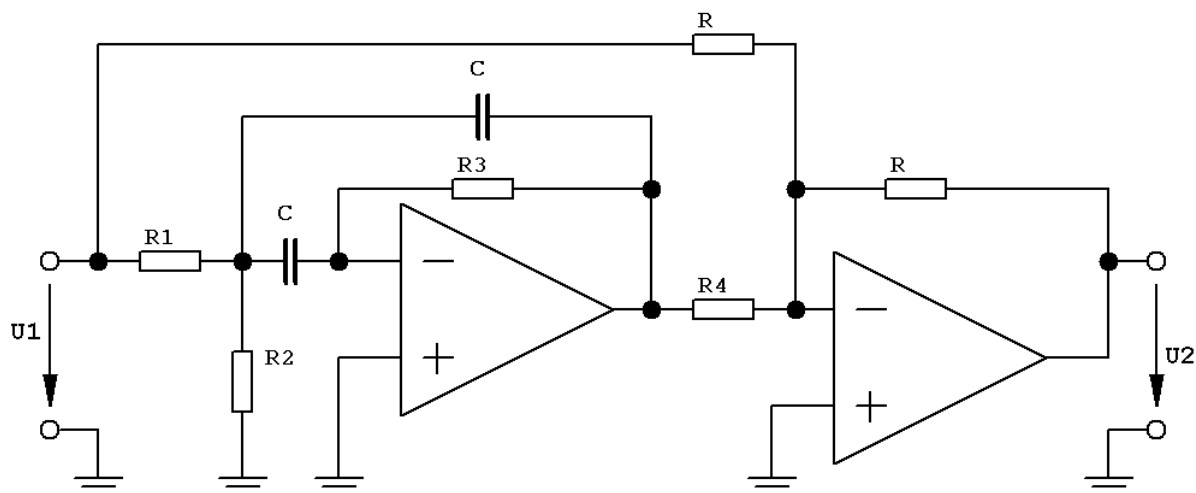


Obr. 4.58 Možné rozložení nulových bodů a pólů FČ 2. řádu

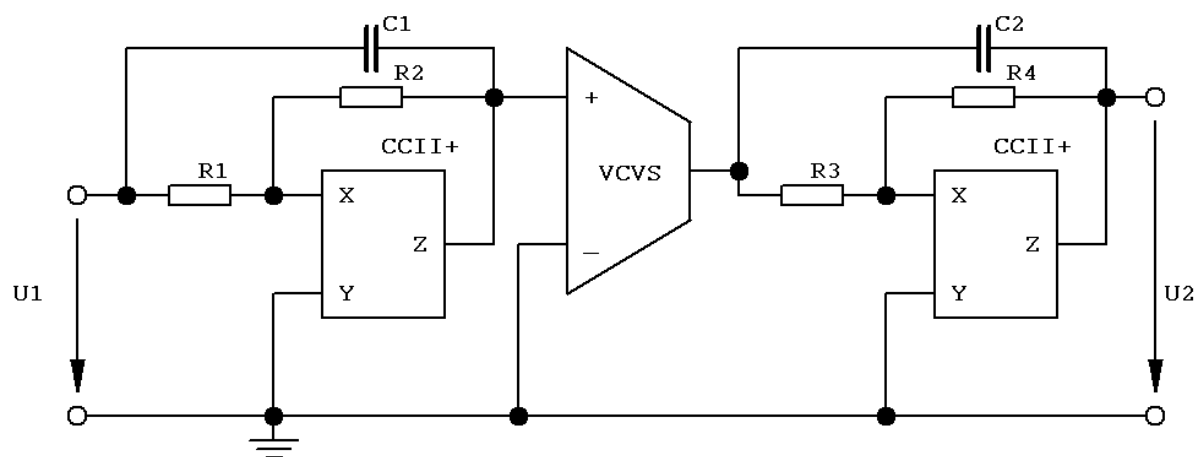
Fázovací články druhého řádu lze realizovat mj. pomocí pasivních součástek RLC. Tyto zapojení se však nepoužívají kvůli značné citlivosti na velikost zátěže a kvůli snaze omezit používání drahých a obtížně realizovatelných přesných indukčností. Dále lze využít běžné operační zesilovače, tady ale bývá složitější postup návrhu. V této úloze je použit dvakrát IO AD844, který zde funguje jako pozitivní proudový konvektor druhé generace (CCII+).



Obr. 4.59 FČ 2. řádu s pasivními prvky



Obr. 4.60 FČ 2. řádu s běžnými operačními zesilovači



Obr. 4.61 FČ 2. řádu se dvěma prvky CCII+

Druhý zmíněný fázovací členek má ovšem dvojnásobný překrývající se nulový bod a pól.

Návod k měření

Ke vstupu měřicího přípravku připojte výstup funkčního generátoru Agilent 33220, první kanál AC milivoltmetru GW Instek GVT-427B a první kanál osciloskopu HP 54603B.

K výstupu měřicího přípravku připojte druhý kanál AC milivoltmetru a druhý kanál osciloskopu. Oba kanály AC milivoltmetru přepněte na rozsah 1V / 0dB. Funkční generátor přepněte na vysokou zátěž stisknutím tlačítek **Utility** $\Rightarrow$ **Output Setup** $\Rightarrow$ **High Z**. Pamatujte, že na výstupu funkčního generátoru se objeví signál až po zmáčknutí a rozsvícení tlačítka **Output**. Výstupní úroveň generátoru udržujte takovou, aby AC milivoltmetr na prvním kanálu ukazoval stále 1V / 0dB.

Připojte měřicí přípravek k symetrickému zdroji napětí $\pm 15V$, např. BK125. Zapněte všechny přístroje.

1) Fázovací článek prvního řádu s AD844 (CCII+)

Pomocí propojek připojte výše zmíněný FČ (Obr. 4). Ke zdírkám označeným C_x připojte takový kondenzátor, aby při kmitočtu cca 14 kHz nastal fázový posun φ cca 90° . Hodnotu C_x určete výpočtem nebo měřením. Fázový posun lze vypočítat ze vzorce

$$K(s) = \frac{R_1 - R_2 + s \cdot (R_2 \cdot C_x \cdot R_1)}{R_1 + s \cdot (R_2 \cdot C_x \cdot R_1)} \quad (3)$$

$$\text{Platí } s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f. \quad (4)$$

Pro $R_1=5k\Omega$, $R_2=10k\Omega$ lze vzorec zjednodušit na

$$K(s) = \frac{-5000 + s \cdot C_x \cdot 5 \cdot 10^7}{5000 + s \cdot C_x \cdot 5 \cdot 10^7} \quad (5)$$

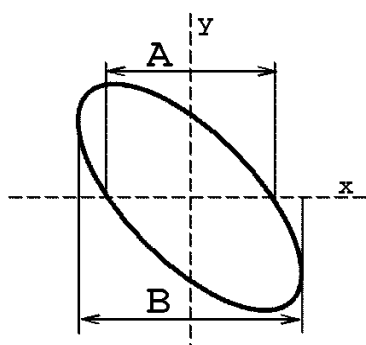
Případně

$$\varphi(^{\circ}) = \arg\left(\frac{-5000 + s \cdot C_x \cdot 5 \cdot 10^7}{5000 + s \cdot C_x \cdot 5 \cdot 10^7}\right) \quad (6)$$

Pro výpočty se doporučuje program Mathcad, Matlab, případně běžný novější vědecký kalkulátor Casio FX 991 ES PLUS.

Zvolený $C_x=$	nF
----------------	----

Změřte modul a fázi napěťového přenosu fázovacího článku s CCII+ pro zadané kmitočty. Na dvoukanálovém AC milivoltmetru je možné odečítat modul přenosu přímo jako rozdíl výchylek obou ruček. Na osciloskopu se doporučuje použít automatické měření fáze. Pokud touto funkcí osciloskop vybaven není, tak se použije známý postup v režimu XY pomocí Lissajousových obrazců. Pro připomenutí:



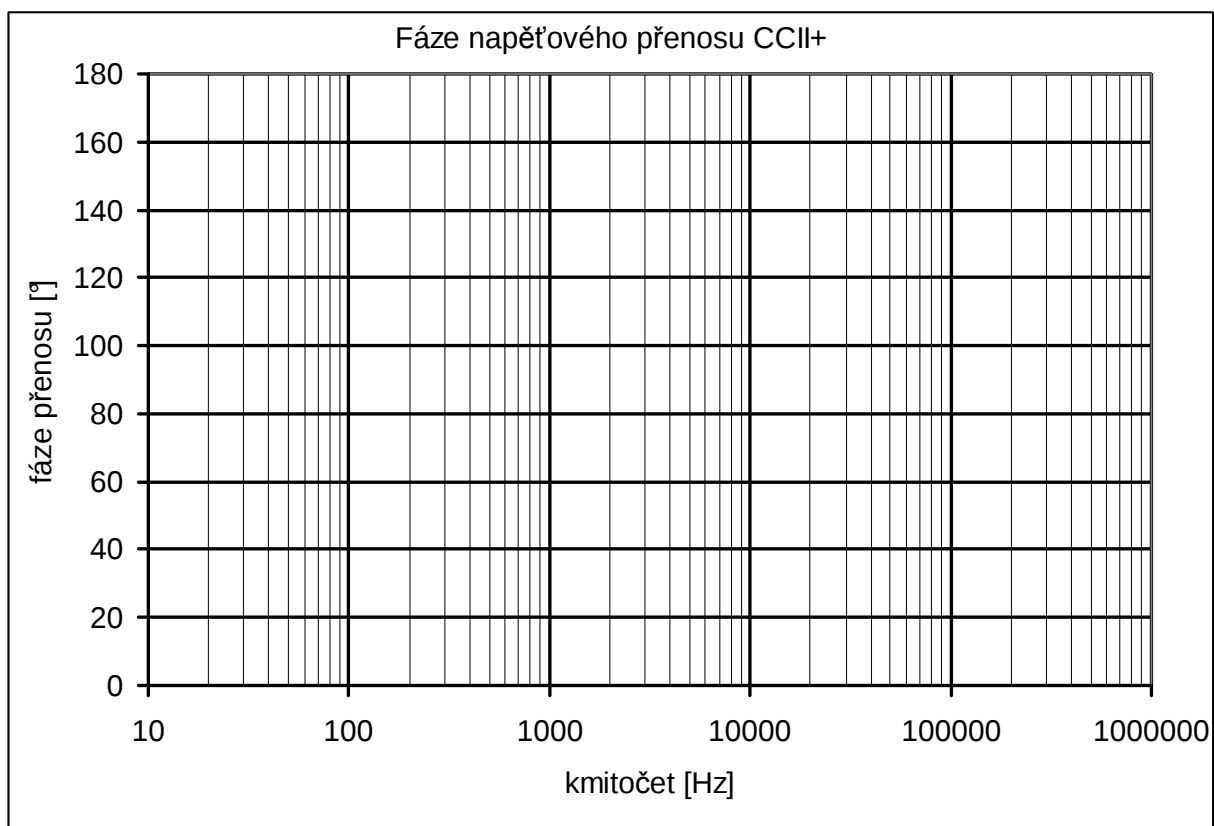
$$\sin \varphi = \frac{A}{B}$$

Obr. 4.62 Výpočet fázového přenosu

Tab. 4.5 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ s AD844

	změřeno							vypočteno
f	U _{INP}	U _{OUT}	K _{FČ}	B	A	A/B	φ	φ
Hz	dBV	dBV	dB	-	-	-	°	°
10								
20								
50								
100								
200								
500								
1k								
2k								
5k								
7,5k								
10k								
							90	
20k								
50k								
100k								
200k								
500k								
1M								

Změřenou a vypočtenou fázovou charakteristiku zakreslete do grafu.



Obr. 4.63 Graf fázových charakteristik FČ s AD844

2) Fázovací členek prvního řádu s LT1228 (OTA + CFA)

Pomocí propojek připojte výše zmíněný FČ (Obr. 5). Ke zdírkám označeným C_x připojte takový kondenzátor, aby při kmitočtu 1,244 kHz nastal fázový posun φ cca -90° . Hodnotu C_x určete výpočtem nebo měřením. Fázový posun lze vypočítat ze vzorce pro $R_1=R_4=R_5=R_6=1\text{k}\Omega$ a $R_2=R_3=120\Omega$. Platí $s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f$.

$$K(s) = \frac{9,9456 \cdot 10^{13} - s \cdot C_x \cdot 1,2544 \cdot 10^{18}}{9,9456 \cdot 10^{13} + s \cdot C_x \cdot 1,2544 \cdot 10^{18}} \quad (7)$$

Případně

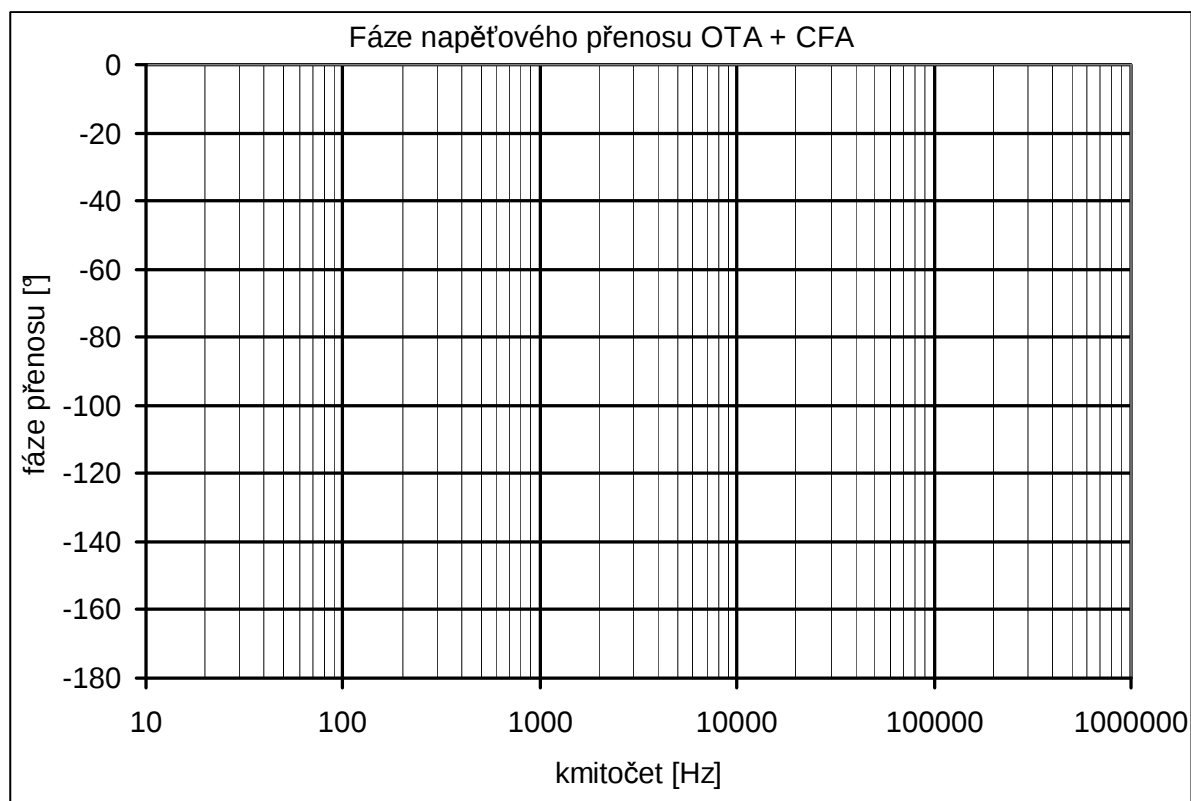
$$\varphi(^{\circ}) = \arg \left(\frac{9,9456 \cdot 10^{13} - s \cdot C_x \cdot 1,2544 \cdot 10^{18}}{9,9456 \cdot 10^{13} + s \cdot C_x \cdot 1,2544 \cdot 10^{18}} \right) \quad (8)$$

Zvolený $C_x =$	nF
-----------------	----

Změřte modul a fázi napětového přenosu fázovacího článku s OTA + CFA pro zadané kmitočty pomocí AC milivoltmetru a osciloskopu.

Tab. 4.6 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ s LT1228

	změřeno							vypočteno
f	U _{INP}	U _{OUT}	K _{FČ}	B	A	A/B	φ	φ
Hz	dBV	dBV	dB	-	-	-	°	°
10								
20								
50								
100								
200								
500								
1k								
							-90	
2k								
5k								
10k								
20k								
50k								
100k								
200k								
500k								
1M								



Obr. 4.64 Graf fázových charakteristik FČ s LT1228

3) Fázovací členek druhého řádu s $2 \times$ AD844 ($2 \times$ CCII+)

Pomocí propojek připojte výše zmíněný FČ (Obr. 9). Dále připojte k oběma stupňům $C_x=10\text{nF}$. Fázový posun lze vypočítat ze vzorce pro $R_1=R_3=1\text{k}\Omega$, $R_2=R_4=2\text{k}\Omega$ a $C_1=C_2=10\text{n}$. Platí $s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f$.

$$K(s) = \frac{1 \cdot 10^{10} - s \cdot 2 \cdot 10^5 + s^2}{1 \cdot 10^{10} + s \cdot 2 \cdot 10^5 + s^2} \quad (8)$$

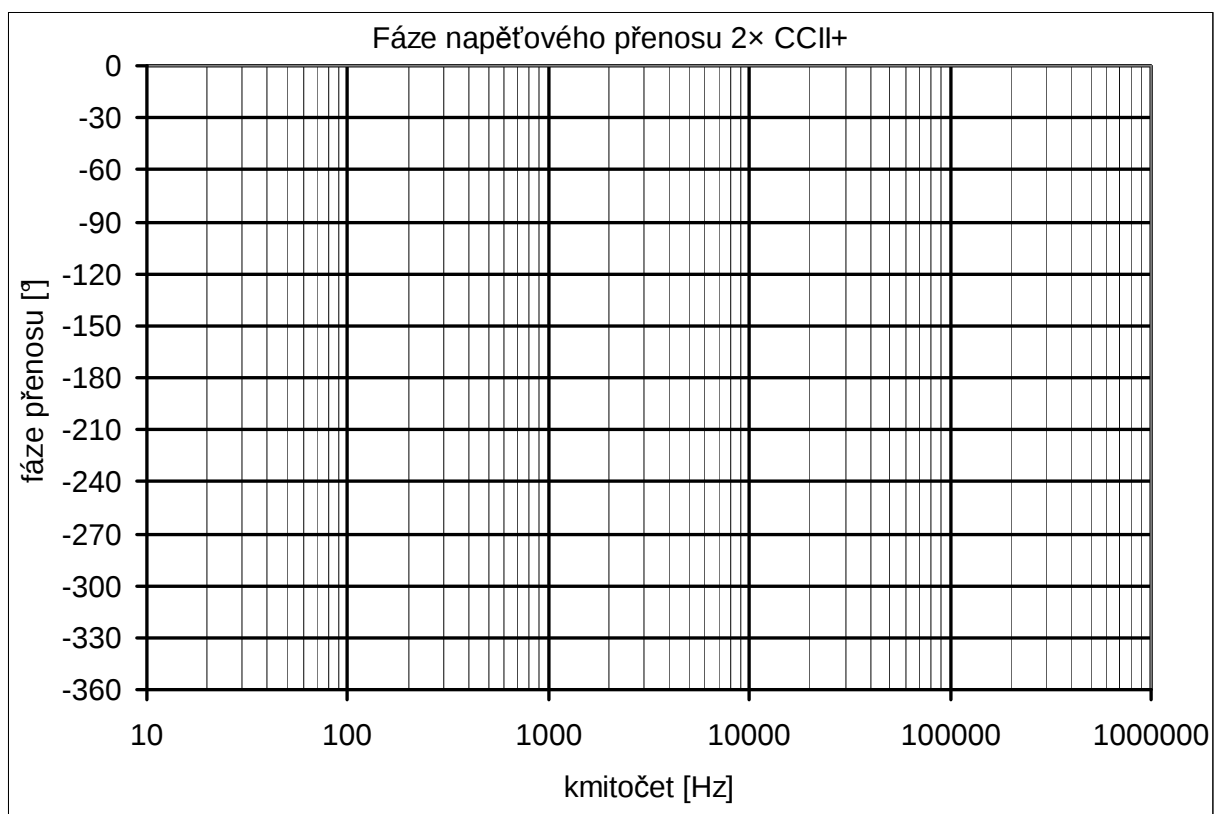
Případně

$$\varphi(^{\circ}) = \arg\left(\frac{1 \cdot 10^{10} - s \cdot 2 \cdot 10^5 + s^2}{1 \cdot 10^{10} + s \cdot 2 \cdot 10^5 + s^2}\right) \quad (9)$$

Změřte modul a fázi napětového přenosu fázovacího článku s OTA + CFA pro zadané kmitočty pomocí AC milivoltmetru a osciloskopu.

Tab. 4.7 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ se dvěma AD844

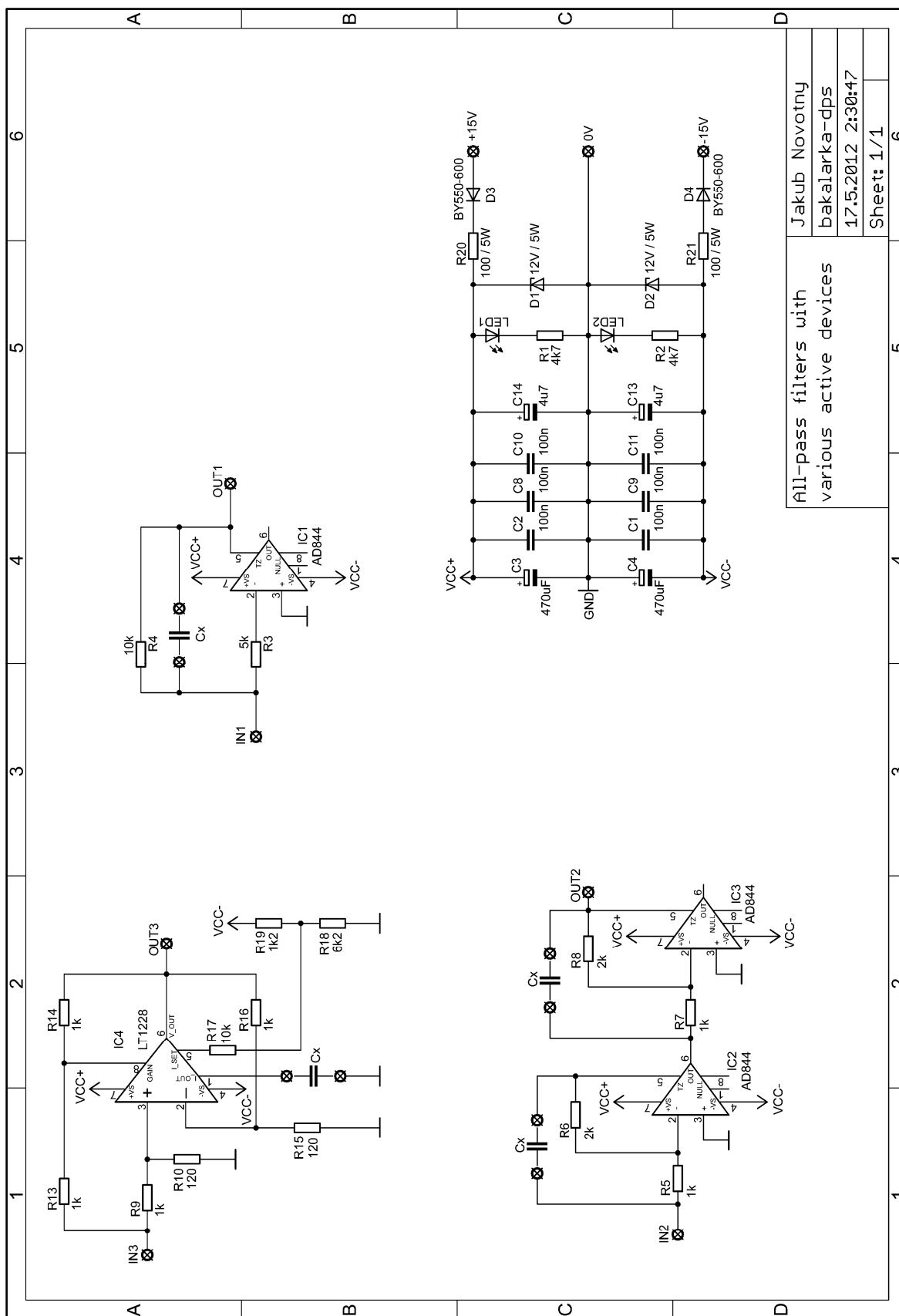
	změřeno							vypočteno
f	U _{INP}	U _{OUT}	K _{FČ}	B	A	A/B	φ	φ
Hz	dBV	dBV	dB	-	-	-	°	°
10								
20								
50								
100								
200								
500								
1k								
2k								
5k								
							-90	
10k								
							-180	
20k								
							-270	
50k								
100k								
200k								
500k								
1M								



Obr. 4.65 Graf fázových charakteristik FČ se dvěma AD844

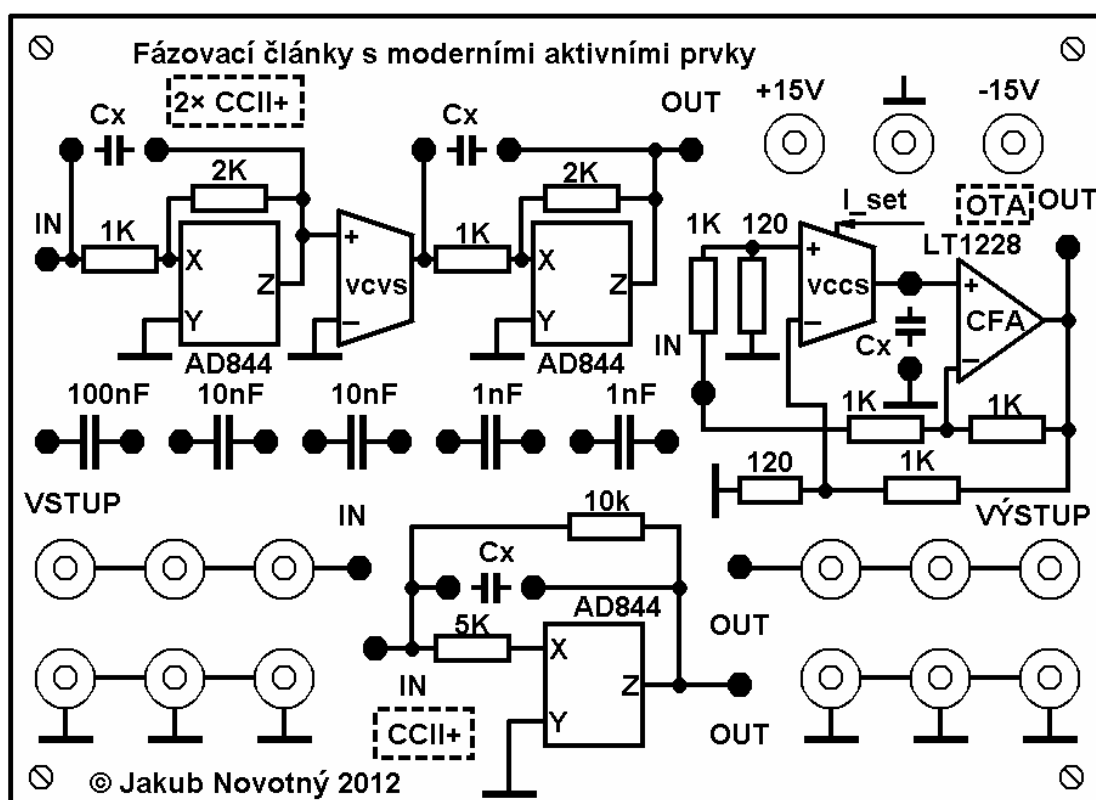
Závěr

Schéma přípravku

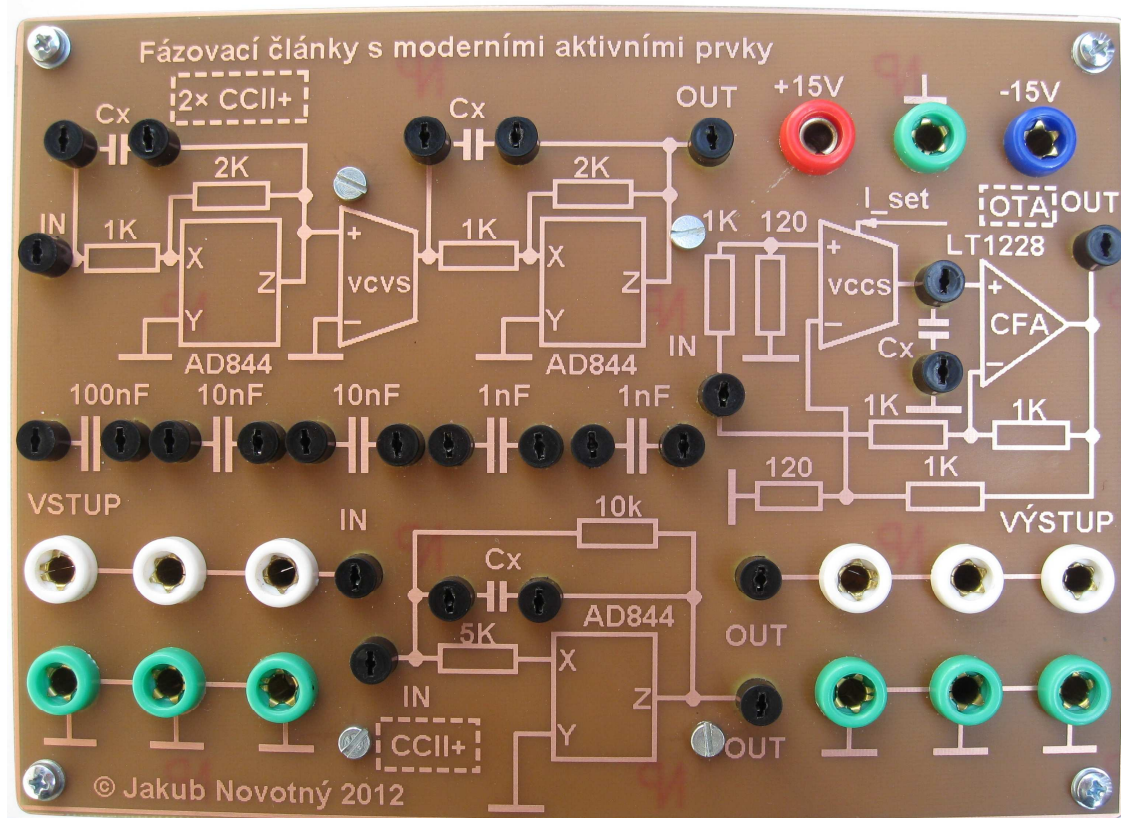


Obr. 4.66 Celkové schéma

Vzhled přípravku



Obr. 4.67 Předloha



Obr. 4.68 Skutečný vzhled

C.2 Vyplněné zadání laboratorní úlohy

LABORATORNÍ ÚLOHA

Fázovací články s prvky OTA a CCII+

Teoretický úvod

Ve sdělovací technice i jinde bývá často nutno upravit fázové poměry zpracovávaných signálů. Všeprupustné fázovací články umožňují upravovat průběh argumentové charakteristiky určité soustavy a to beze změny modulové charakteristiky.

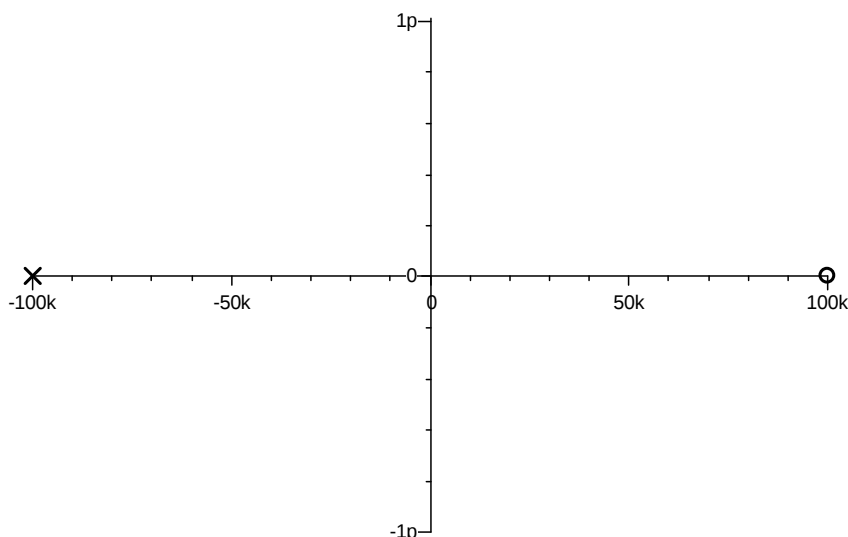
Používají se při návrhu zpožďovacích článků, fázovacích korektorů, dále ve filtrech, místo integrátorů, což dovoluje zlepšit jejich stabilitu a rozšířit přenášené kmitočtové pásmo. V dnešní době narůstá význam těchto filtrů. Pro tvorbu fázovacích článků lze využít pasivní prvky RCL, nebo aktivní prvky, tedy operační zesilovače a jim příbuzné integrované obvody.

Fázovací články 1. řádu

Fázovací články prvního řádu lze popsat rovnicí napět'ového přenosu

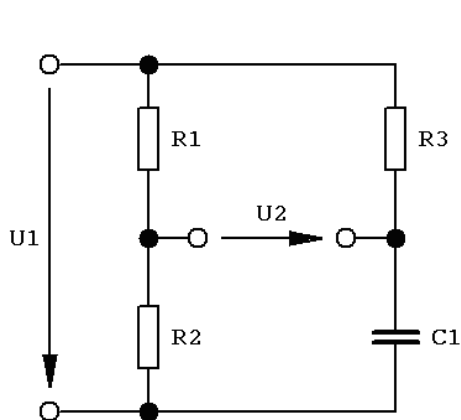
$$K(s) = K_0 \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} \quad (1)$$

Rozložení nulových bodů „○“ a pólů „×“ proto musí být symetrické podle imaginární osy v komplexní rovině. Pro zajištění stability obvodu musí být pól v záporné polorovině a nulový bod v kladné. Rozložení může být následující.

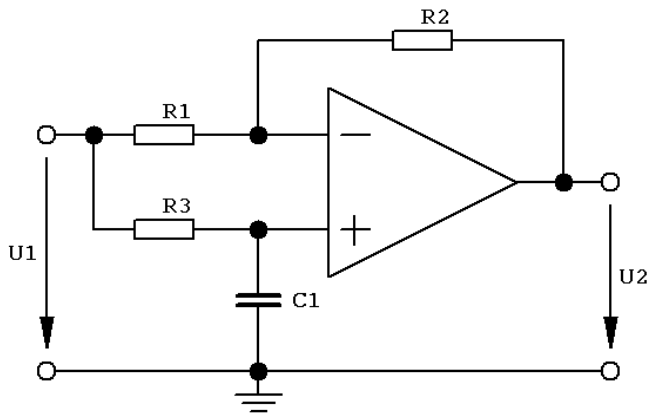


Obr. 4.69 Možné rozložení nulových bodů a pólů FČ 1. řádu

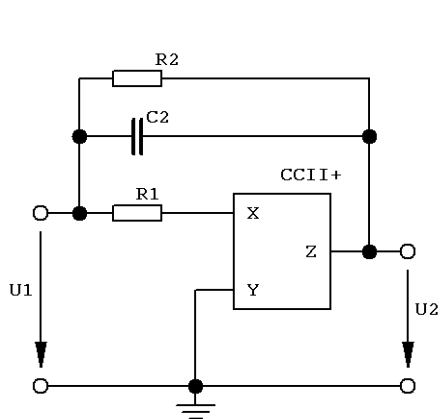
Fázovací články prvního řádu lze realizovat mj. pomocí pasivních součástek nebo běžných operačních zesilovačů. V této úloze je použit IO AD844, který zde funguje jako pozitivní proudový konvektor druhé generace (CCII+) a dále LT1228, jenž představuje spojení transadmitančního zesilovače (OTA) a transimpedančního zesilovače (CFA) v jednom pouzdru.



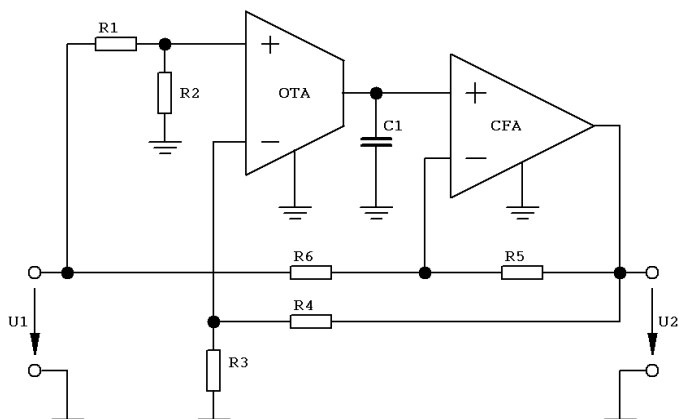
Obr. 4.70 FČ 1. řádu s pasivními prvky zesilovačem



Obr. 4.71 FČ 1. řádu s operačním



Obr. 4.72 FČ 1. řádu s IO AD844 (CCII+) (OTA+CFA)



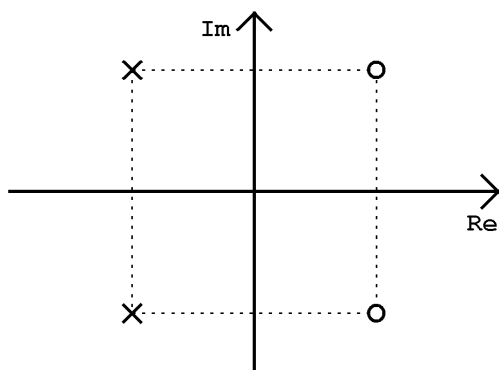
Obr. 4.73 FČ 1. řádu s IO LT1228

Fázovací články 2. řádu

Fázovací články druhého řádu lze popsat rovnicí napětíového přenosu.

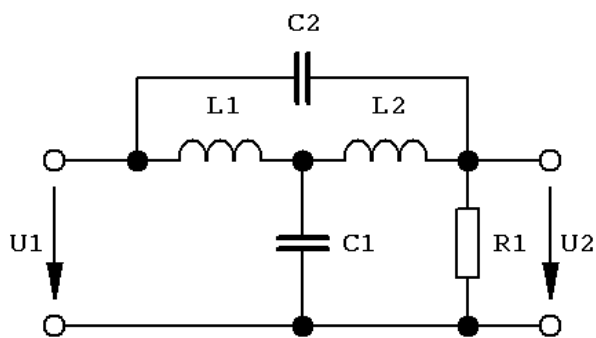
$$K(s) = K_0 \frac{s^2 - b_1 \cdot s + b_0}{s^2 + b_1 \cdot s + b_0} \quad (2)$$

Čítenel a jmenovatel jsou shodné až na znaménko u druhého členu polynomu. Nulové body jsou umístěny v pravé polorovině symetricky ku dvěma komplexně sdruženým pólům.

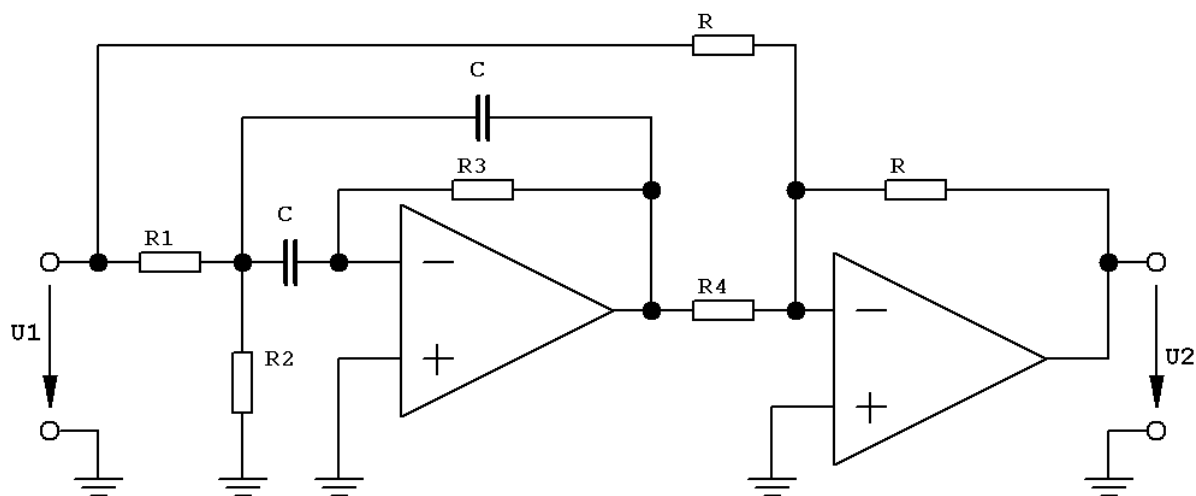


Obr. 4.74 Možné rozložení nulových bodů a pólů FČ 2. řádu

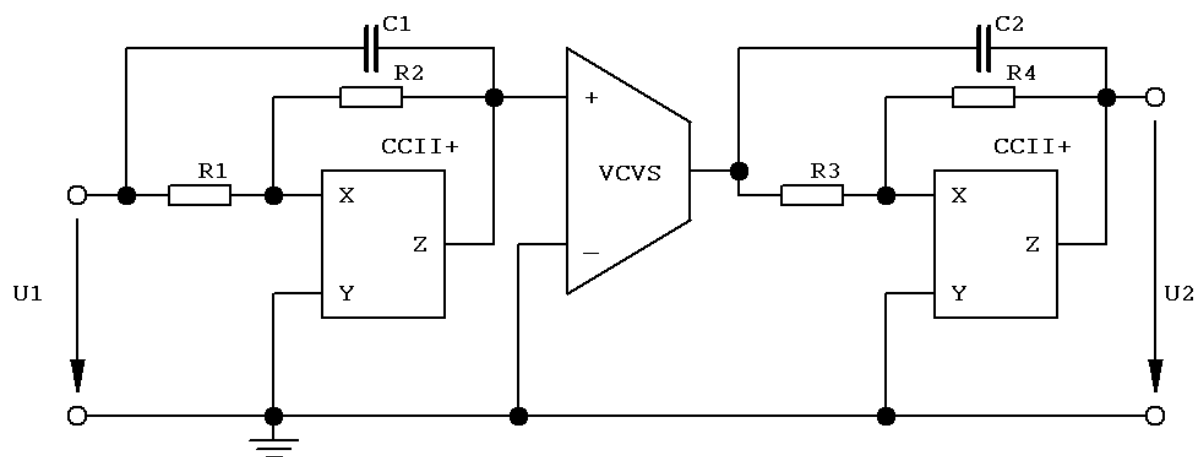
Fázovací články druhého řádu lze realizovat mj. pomocí pasivních součástek RLC. Tyto zapojení se však nepoužívají kvůli značné citlivosti na velikost zátěže a kvůli snaze omezit používání drahých a obtížně realizovatelných přesných indukčností. Dále lze využít běžné operační zesilovače, tady ale bývá složitější postup návrhu. V této úloze je použit dvakrát IO AD844, který zde funguje jako pozitivní proudový konvektor druhé generace (CCII+).



Obr. 4.75 FČ 2. řádu s pasivními prvky



Obr. 4.76 FČ 2. řádu s běžnými operačními zesilovači



Obr. 4.77 FČ 2. řádu se dvěma prvky CCII+

Druhý zmíněný fázovací členek má ovšem dvojnásobný překrývající se nulový bod a pól.

Návod k měření

Ke vstupu měřicího přípravku připojte výstup funkčního generátoru Agilent 33220, první kanál AC milivoltmetru GW Instek GVT-427B a první kanál osciloskopu HP 54603B.

K výstupu měřicího přípravku připojte druhý kanál AC milivoltmetru a druhý kanál osciloskopu. Oba kanály AC milivoltmetru přepněte na rozsah 1V / 0dB. Funkční generátor přepněte na vysokou zátěž stisknutím tlačítek **Utility** $\Rightarrow$ **Output Setup** $\Rightarrow$ **High Z**. Pamatujte, že na výstupu funkčního generátoru se objeví signál až po zmáčknutí a rozsvícení tlačítka **Output**. Výstupní úroveň generátoru udržujte takovou, aby AC milivoltmetr na prvním kanálu ukazoval stále 1V / 0dB.

Připojte měřicí přípravek k symetrickému zdroji napětí $\pm 15V$, např. BK125. Zapněte všechny přístroje.

1) Fázovací členek prvního řádu s AD844 (CCII+)

Pomocí propojek připojte výše zmíněný FČ (Obr. 4). Ke zdírkám označeným C_x připojte takový kondenzátor, aby při kmitočtu cca 14 kHz nastal fázový posun φ cca 90° . Hodnotu C_x určete výpočtem nebo měřením. Fázový posun lze vypočítat ze vzorce

$$K(s) = \frac{R_1 - R_2 + s \cdot (R_2 \cdot C_x \cdot R_1)}{R_1 + s \cdot (R_2 \cdot C_x \cdot R_1)} \quad (3)$$

$$\text{Platí } s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f. \quad (4)$$

Pro $R_1=5k\Omega$, $R_2=10k\Omega$ lze vzorec zjednodušit na

$$K(s) = \frac{-5000 + s \cdot C_x \cdot 5 \cdot 10^7}{5000 + s \cdot C_x \cdot 5 \cdot 10^7} \quad (5)$$

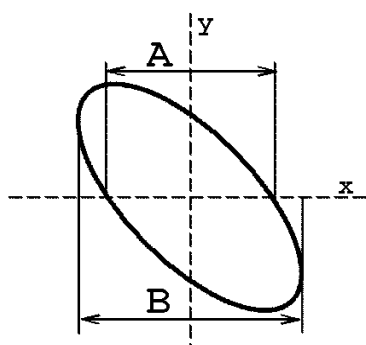
Případně

$$\varphi(^{\circ}) = \arg\left(\frac{-5000 + s \cdot C_x \cdot 5 \cdot 10^7}{5000 + s \cdot C_x \cdot 5 \cdot 10^7}\right) \quad (6)$$

Pro výpočty se doporučuje program Mathcad, Matlab, případně běžný novější vědecký kalkulátor Casio FX 991 ES PLUS.

Zvolený C_x = 1 nF

Změřte modul a fázi napětového přenosu fázovacího článku s CCII+ pro zadané kmitočty. Na dvoukanálovém AC milivoltmetru je možné odečítat modul přenosu přímo jako rozdíl výchylek obou ruček. Na osciloskopu se doporučuje použít automatické měření fáze. Pokud touto funkcí osciloskop vybaven není, tak se použije známý postup v režimu XY pomocí Lissajousových obrazců. Pro připomenutí:



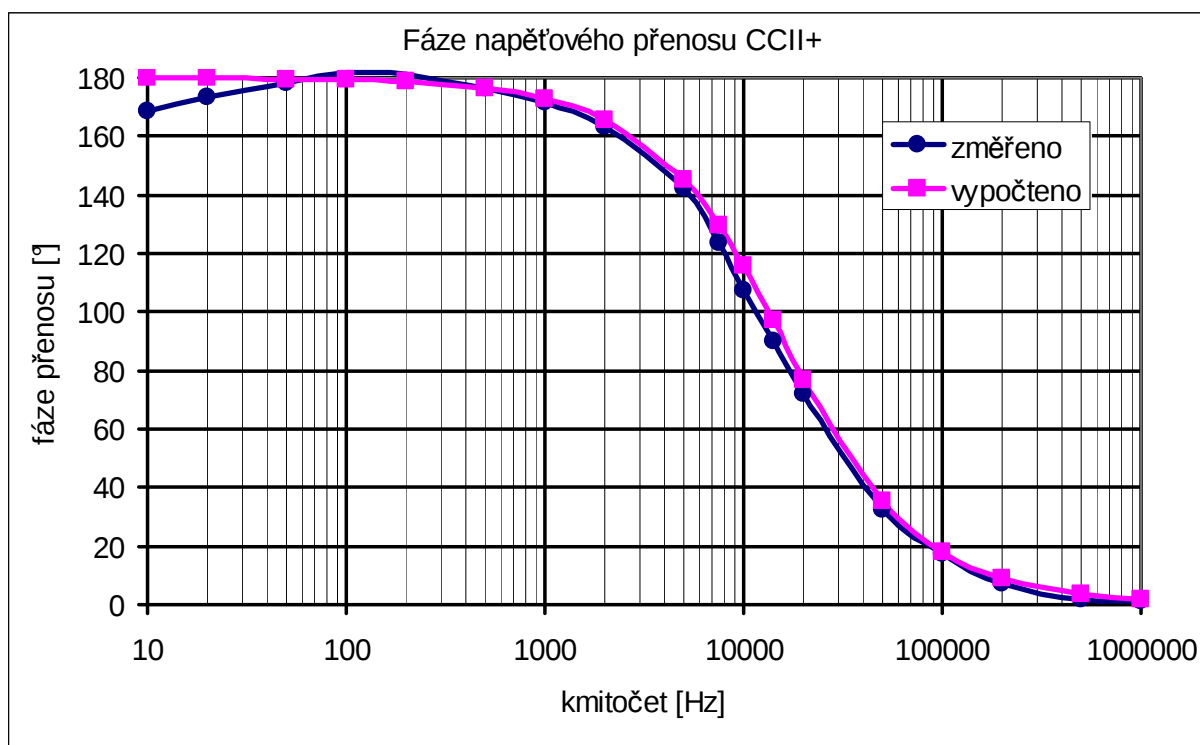
$$\sin \varphi = \frac{A}{B}$$

Obr. 4.78 Výpočet fázového přenosu

Tab. 4.8 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ s AD844

	změřeno							vypočteno
f	U _{INP}	U _{OUT}	K _{FČ}	B	A	A/B	φ	φ
Hz	dBV	dBV	dB	-	-	-	°	°
10			-0,8				168,5	179,9
20			-0,8				173,5	179,9
50			-0,8				178,2	179,6
100			-0,8				181,8	179,2
200			-0,8				181,4	178,6
500			-0,8				176,4	176,4
1000			-0,8				171,9	172,8
2000			-0,8				163,4	165,7
5000			-1,0				142,2	145,1
7500			-1,2				123,6	129,5
10000			-1,4				107,5	115,7
14000			-1,6				90	97,3
20000			-1,8				72,3	77,0
50000			-2,0				32,4	35,3
100000			-2,0				17,1	18,1
200000			-2,0				7,2	9,1
500000			-2,0				1,8	3,6
1000000			-2,0				1,4	1,8

Změřenou a vypočtenou fázovou charakteristiku zakreslete do grafu.



Obr. 4.79 Graf fázových charakteristik FČ s AD844

2) Fázovací článek prvního řádu s LT1228 (OTA + CFA)

Pomocí propojek připojte výše zmíněný FČ (Obr. 5). Ke zdírkám označeným C_x připojte takový kondenzátor, aby při kmitočtu 1,244 kHz nastal fázový posun φ cca -90° . Hodnotu C_x určete výpočtem nebo měřením. Fázový posun lze vypočítat ze vzorce pro $R_1=R_4=R_5=R_6=1\text{k}\Omega$ a $R_2=R_3=120\Omega$. Platí $s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f$.

$$K(s) = \frac{9,9456 \cdot 10^{13} - s \cdot C_x \cdot 1,2544 \cdot 10^{18}}{9,9456 \cdot 10^{13} + s \cdot C_x \cdot 1,2544 \cdot 10^{18}} \quad (7)$$

Případně

$$\varphi(^{\circ}) = \arg \left(\frac{9,9456 \cdot 10^{13} - s \cdot C_x \cdot 1,2544 \cdot 10^{18}}{9,9456 \cdot 10^{13} + s \cdot C_x \cdot 1,2544 \cdot 10^{18}} \right) \quad (8)$$

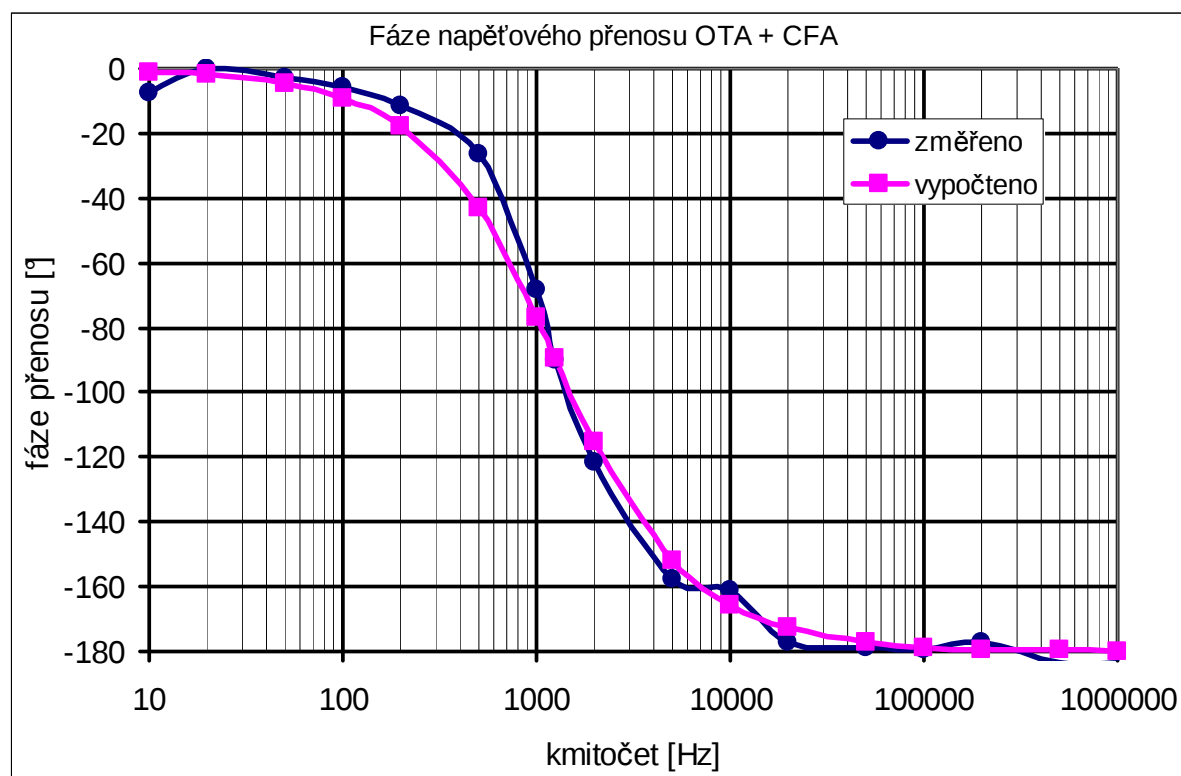
Zvolený $C_x = 10 \text{ nF}$

Změřte modul a fázi napětového přenosu fázovacího článku s OTA + CFA pro zadané kmitočty pomocí AC milivoltmetru a osciloskopu.

Tab. 4.9 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ s LT1228

	změřeno							vypočteno
f Hz	U _{INP} dBV	U _{OUT} dBV	K _{FČ} dB	B -	A -	A/B -	φ °	φ °
10			0				-7,2	-0,9
20			0				0,0	-1,8
50			0				-2,7	-4,5
100			0				-5,8	-9,1
200			0				-11,5	-18,0
500			-0,2				-26,1	-43,2
1000			-0,4				-68,4	-76,8
1244			-0,2				-90,0	-89,2
2000			0				-121,4	-115,5
5000			0				-157,9	-151,7
10000			0				-161,2	-165,6
20000			0				-177,1	-172,8
50000			0				-179,1	-177,1
100000			0				-179,5	-178,6
200000			0				-176,9	-179,3
500000			0				-183,4	-179,7
1000000			-0,2				-183,6	-180,0

Obr. 4.80 Graf fázových charakteristik FČ s LT1228



Obr. 4.81 Graf fázových charakteristik FČ s LT1228

3) Fázovací členek druhého řádu s 2× AD844 (2× CCII+)

Pomocí propojek připojte výše zmíněný FČ (Obr. 9). Dále připojte k oběma stupňům $C_x=10\text{nF}$. Fázový posun lze vypočítat ze vzorce pro $R_1=R_3=1\text{k}\Omega$, $R_2=R_4=2\text{k}\Omega$ a $C_1=C_2=10\text{n}$. Platí $s = j \cdot \omega = j \cdot 2\pi f$.

$$K(s) = \frac{1 \cdot 10^{10} - s \cdot 2 \cdot 10^5 + s^2}{1 \cdot 10^{10} + s \cdot 2 \cdot 10^5 + s^2} \quad (8)$$

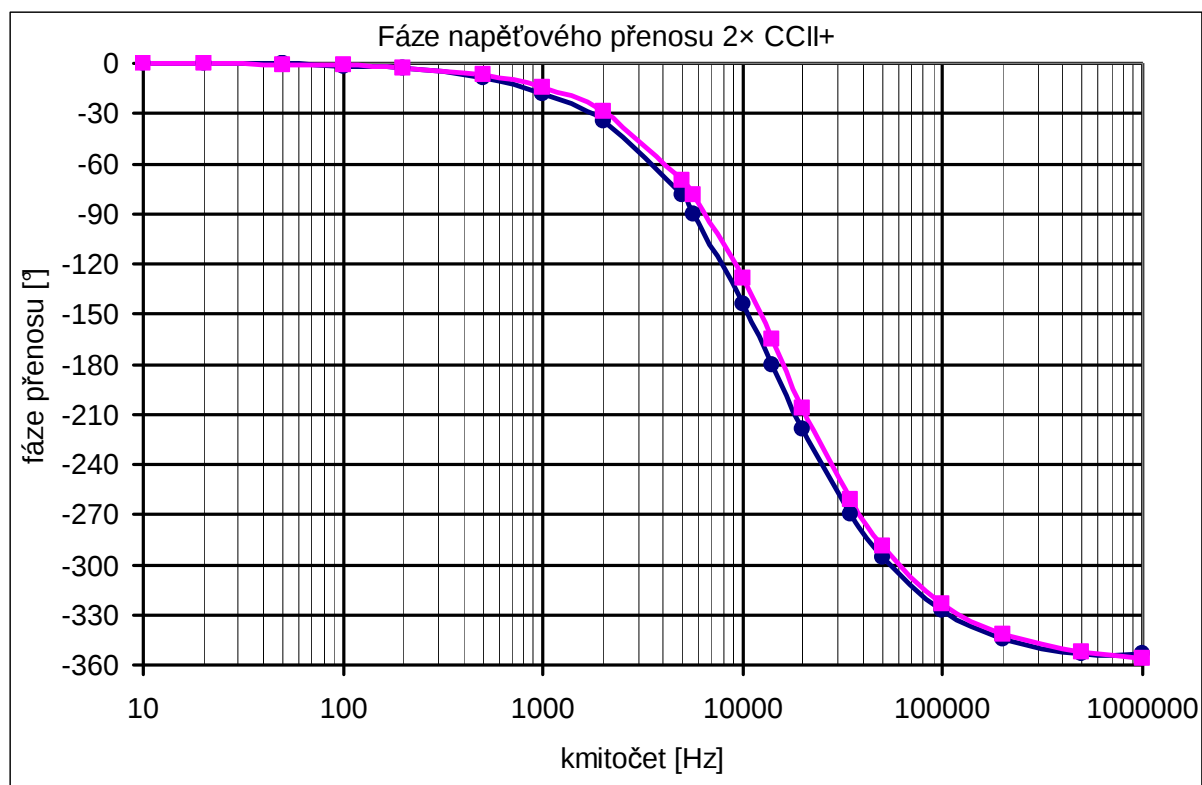
Případně

$$\varphi(^{\circ}) = \arg\left(\frac{1 \cdot 10^{10} - s \cdot 2 \cdot 10^5 + s^2}{1 \cdot 10^{10} + s \cdot 2 \cdot 10^5 + s^2}\right) \quad (9)$$

Změřte modul a fázi napět'ového přenosu fázovacího članku s OTA + CFA pro zadané kmitočty pomocí AC milivoltmetru a osciloskopu.

Tab. 4.10 Modulová a fázová kmitočtová charakteristika FČ se dvěma AD844

	změřeno							vypočteno
f	U _{INP}	U _{OUT}	K _{FČ}	B	A	A/B	φ	φ
Hz	dBV	dBV	dB	-	-	-	°	°
10			-1,0				0,0	-0,1
20			-1,0				0,0	-0,3
50			-1,2				0,0	-0,7
100			-1,2				-2,1	-1,4
200			-1,2				-2,9	-2,9
500			-1,2				-9,0	-7,2
1000			-1,2				-18,0	-14,4
2000			-1,2				-34,6	-28,6
5000			-1,4				-79,2	-69,8
5670			-1,4				-90,0	-78,4
10000			-1,4				-144,0	-128,6
14000			-1,4				-180,0	-165,3
20000			-1,4				-219,0	-206,0
34400			-1,4				-270,0	-261,0
50000			-1,2				-295,8	-289,4
100000			-1,2				-327,8	-323,8
200000			-1,2				-344,5	-341,8
500000			-1,1				-353,7	-352,7
1000000			-1,0				-352,8	-356,4

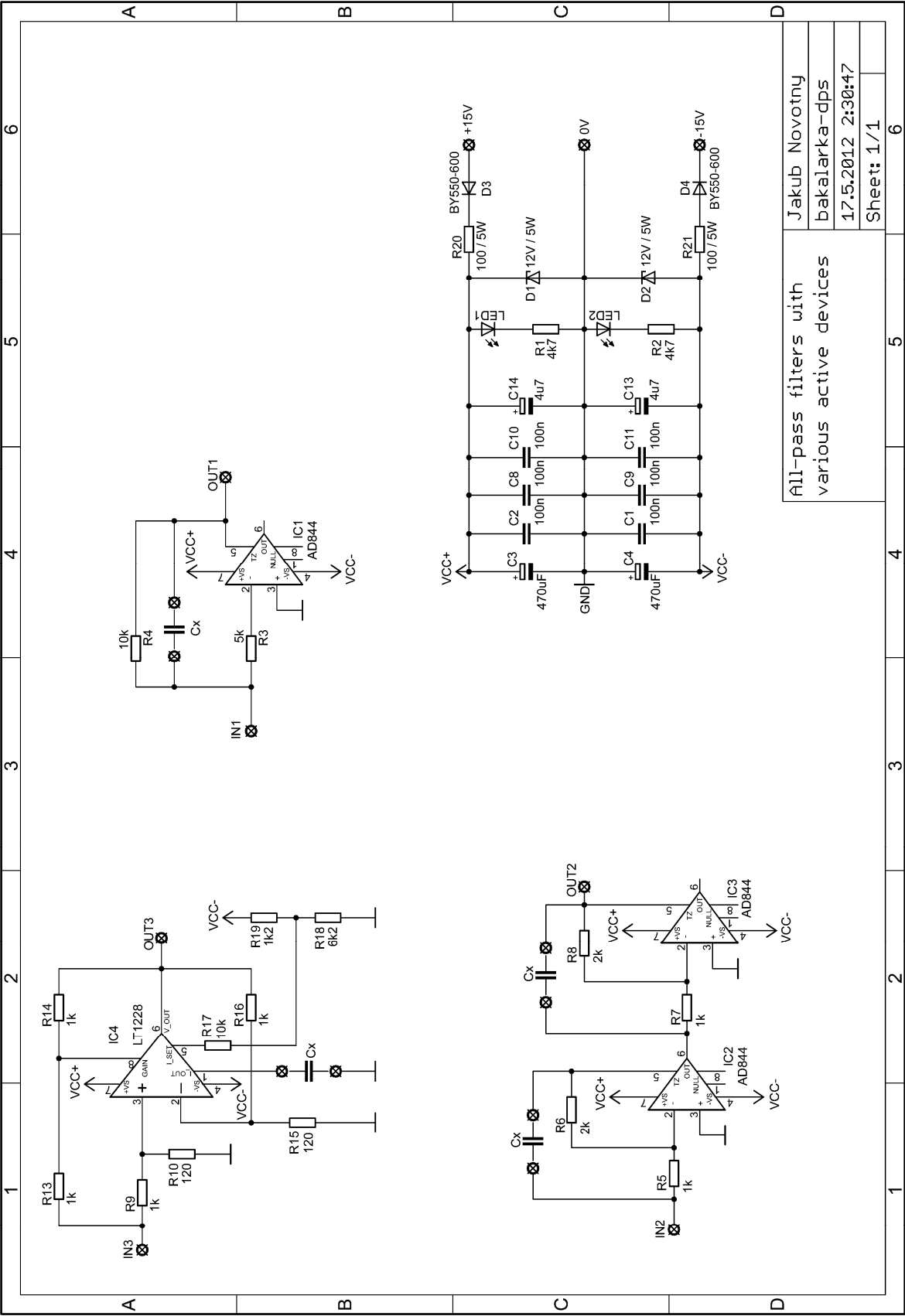


Obr. 4.82 Graf fázových charakteristik FČ se dvěma AD844

Závěr

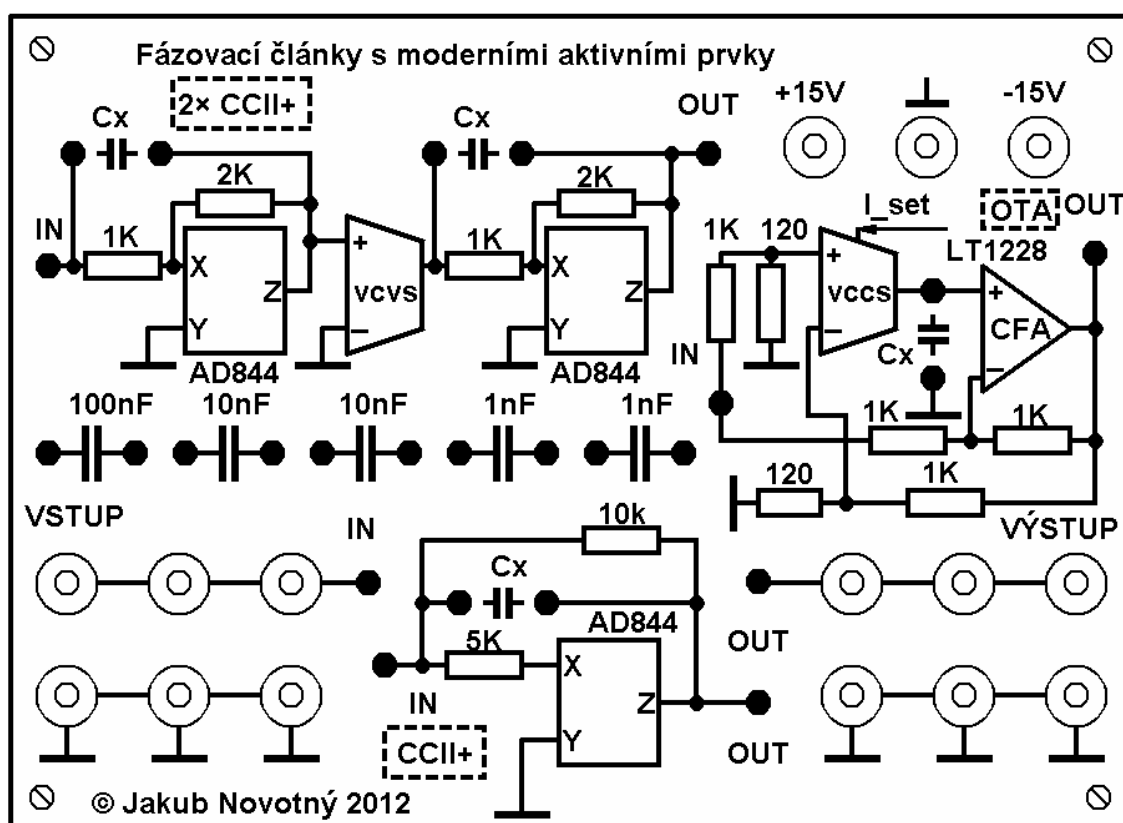
Seznámili jsme se s fázovacími články prvního a druhého řádu a proměřili jsme jejich kmitočtové charakteristiky.

Schéma přípravku

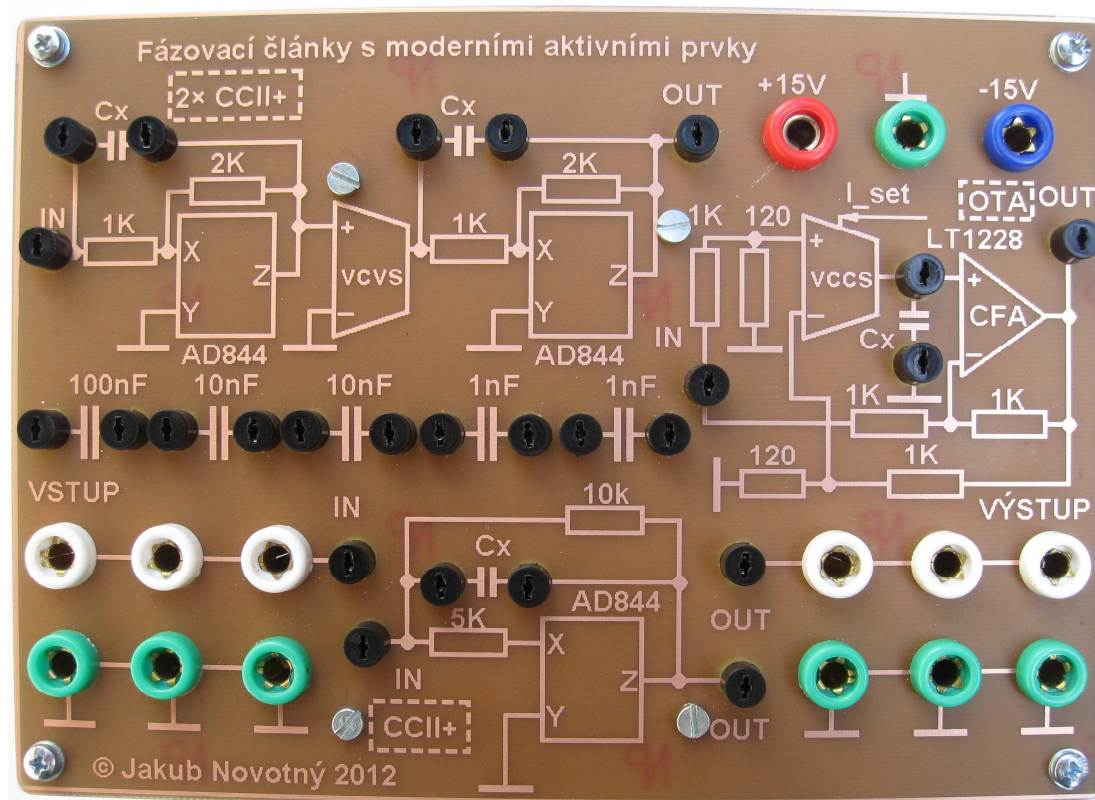


Obr. 4.83 Celkové schéma

Vzhled přípravku



Obr. 4.84 Předloha



Obr. 4.85 Skutečný vzhled