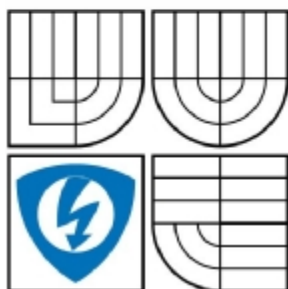


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## MĚŘENÍ PŘENOSOVÝCH A IMITANČNÍCH CHARAKTERISTIK AKTIVNÍCH OBVODOVÝCH PRVKŮ

MEASUREMENT OF TRANSFER AND IMMITTANCE  
CHARACTERISTICS OF ACTIVE CIRCUIT ELEMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

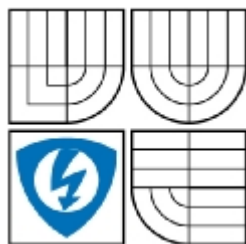
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. PAVEL MAREK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. DAVID KUBÁNEK, Ph.D.

BRNO 2009



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav telekomunikací**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Telekomunikační a informační technika**

**Student:** Bc. Pavel Marek

**ID:** 83502

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

**Měření přenosových a imitancních charakteristik aktivních obvodových prvků**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte základní parametry aktivních obvodových prvků, které se uvádějí v jejich katalogových listech. Popište význam a způsob měření těchto parametrů. Seznamte se s integrovaným obvodem COAK, který obsahuje čtyři zdroje proudu řízené proudem s digitálně nastavitelným zesílením. Navrhněte metody pro měření parametrů integrovaného obvodu COAK. Tyto metody ověřte počítačovou simulací a praktickým měřením.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Kubánek, D. Kmitočtové filtry s proudovými a napěťovými konvejory. Disertační práce, Brno, Česká republika, VUT v Brně, 2006

[2] Šponar, R., Vrba, K., Kubánek, D. Universal Current Conveyor and Universal Voltage Conveyor Measurements and Modelling. In International Conference on Systems. Los Alamitos, USA, 2006, s. 175-178. ISBN 0-7695-2552-0

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 26.5.2009

**Vedoucí práce:** Ing. David Kubánek, Ph.D.

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **ANOTACE**

Tato diplomová práce pojednává o aktivních obvodových prvcích a návrhu metod pro měření některých parametrů těchto prvků. V úvodní části se práce zabývá obecnou klasifikací prvků používaných v elektronických obvodech, ideálních a skutečných zdrojích proudu a napětí. Dále jsou uvedeny základní parametry a vlastnosti uváděné výrobcem v katalogovém listě pro aktivní prvky MAX435, OPA660, AD844 a prvku MAA741, který patří již do historie IO. Hlavní pozornost je věnována aktivním obvodovým prvkům se zdroji proudu řízenými proudem CCCS (Current Controlled Current Source) a vysokorychlostnímu monolitickému zesilovači AD844 (high speed monolithic operational amplifier).

V práci je popsána metoda pro zjištění vybraných parametrů aktivních prvků s CCCS. Zkoumané parametry byly frekvenční charakteristiky proudového přenosu, vstupní impedance a výstupní impedance. Navrhnutá metoda byla ověřena počítačovou simulací na již zmíněných aktivních prvcích pomocí programu PSpice. Výsledky společně s popisem jsou shrnuty ke konci práce.

V poslední části práce bylo provedeno reálné měření dle navrhnuté metody na prvku AD844 a výsledky porovnány s příslušnými simulacemi. Nejprve však byla zhotovena deska plošných spojů pomocí programu EAGLE, na které se samotné měření uskutečnilo.

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

aktivní obvodové prvky, MAX435, OPA660, AD844, CCCS, COAK, frekvenční charakteristika, proudový přenos, vstupní impedance, výstupní impedance, operační zesilovač, parazitní složky, měření parametrů obvodových prvků

## **ABSTRAKT**

This diploma work deals with active circuit elements and proposals of methods for measuring of some parameters of these elements. In the opening part the work deals with general classification of elements used in electronic circuits, ideal and real current sources and power supplies. Further there are stated basic parameters and characteristics presented by producers in a catalogue sheet for active elements MAX435, OPA660, AD844 and MAA741 element which already belongs to the history of IC. Main attention is paid to active circuit elements with current sources driven by CCCS (Current Controlled Current Source) and AD844 (high speed monolithic operational amplifier).

In the work there is described a method for determining of selected parameters of active elements with CCCS. Examined parameters were frequency characteristics of current transfer, input impedance and output impedance. The proposed method was verified by a computer simulation on above mentioned active elements by means of PSpice software. Findings along with the description are summarized at the end of the work.

In the closing part of the work there is undertaken a real measure of AD844 element based on the proposed method and the findings are compared with particular simulations. However, at first a flat connection board was made by means of EAGLE software and then the measure was performed on it.

## **KEYWORDS:**

active circuit elements, MAX435, OPA660, AD844, CCCS, COAK, frequency characteristics, current transfer, input impedance, output impedance, operational amplifier, spurious components, measure of circuit elements parameters

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE:**

MAREK, P. *Měření přenosových a imitančních charakteristik aktivních obvodových prvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Kubánek, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Měření přenosových a imitančních charakteristik aktivních obvodových prvků jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Kubánkovi, Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc, odborné vedení a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne .....

.....  
podpis autora

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK a SYMBOLŮ:

| Použité zkratky:     |                                           |
|----------------------|-------------------------------------------|
| <b>BW</b>            | šířka pásma -3dB                          |
| <b>CCMM</b>          | připojení kompenzační kapacity            |
| <b>CMR</b>           | potlačení souhlasného signálu             |
| <b>CTRL0 - CTRL3</b> | označení pro digitálně nastavovací vstupy |
| <b>GND</b>           | zemní svorka                              |
| <b>IN</b>            | vstup obvodu                              |
| <b>IZN</b>           | ideální zesilovač napětí                  |
| <b>IZP</b>           | ideální zesilovač proudu                  |
| <b>NC</b>            | nepřipojený vývod                         |
| <b>OTA</b>           | transkonduktanční zesilovač               |
| <b>SR</b>            | rychlost přeběhu                          |
| <b>SVR , PSSR</b>    | potlačení vlivu změn napájecího napětí    |
| <b>VDD</b>           | vstup pro napájecí napětí                 |
| <b>ZNŘN, VCVS</b>    | zdroj napětí řízený napětím               |
| <b>ZNŘP, CCVS</b>    | zdroj napětí řízený proudem               |
| <b>ZPŘN, VCCS</b>    | zdroj proudu řízený napětím               |
| <b>ZPŘP, CCCS</b>    | zdroj proudu řízený proudem               |

| <b>Použité symboly:</b> |                                                                                             |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A$                     | zesílení (zisk)                                                                             |
| $A_i$                   | proudové zesílení                                                                           |
| $A_U, A_V$              | napět'ové zesílení (napět'ový zisk)                                                         |
| $B$                     | přenos proudu                                                                               |
| $C$                     | kapacita, kapacitor                                                                         |
| $D_0-D_3$               | označení pro digitálně nastavovací vstupy                                                   |
| $e_n$                   | šum                                                                                         |
| $f$                     | Frekvence (kmitočet)                                                                        |
| $f_T$                   | mezní průchozí (tranzitní) frekvence                                                        |
| $G$                     | vodivost                                                                                    |
| $i$                     | určuje binární kombinaci nastavovacích vstupů $D_0-D_3$ v hexadecimální podobě u prvku COAK |
| $I$                     | proud                                                                                       |
| $i_1$                   | vstupní proud                                                                               |
| $i_2$                   | výstupní proud                                                                              |
| $I_{AC}$                | generátor proudu                                                                            |
| $I_{CC}, I_s$           | napájecí proud                                                                              |
| $I_{I0}$                | proudová nesymetrie vstupů                                                                  |
| $I_{IB}, I_B$           | vstupní klidový proud                                                                       |
| $I_K$                   | proud nakrátko                                                                              |
| $I_{os}$                | výstupní proud nakrátko                                                                     |
| $I_z$                   | proud na zátěži                                                                             |

|             |                                         |
|-------------|-----------------------------------------|
| $K$         | proudový zisk                           |
| $L$         | indukčnost, induktor                    |
| $O$         | výstup obvodu                           |
| $P_{tot}$   | mezní ztrátový výkon                    |
| $R$         | odpor                                   |
| $R_0$       | výstupní odpor                          |
| $R_I$       | odpor jako převodník U/I                |
| $R_{A,B}$   | odpory jako převodník I/U               |
| $r_E$       | odpor emitoru                           |
| $R_i$       | vnitřní odpor                           |
| $R_{ISE}$   | vstupní odpor                           |
| $R_P$       | přízpusobovací odpory vedení            |
| $S, g_m$    | transkonduktance                        |
| $S_1, S_2$  | spotřebiče                              |
| $S_{1-3}$   | jednotkové napěťové sledovače (Buffery) |
| $U$         | napětí                                  |
| $U_0$       | napětí na prázdkno                      |
| $u_1$       | vstupní napětí                          |
| $u_2$       | výstupní napětí                         |
| $U_{ccmax}$ | mezní napájecí napětí                   |
| $U_I$       | vstupní napěťový rozsah                 |
| $U_{IDmax}$ | mezní rozdílové napětí                  |
| $U_{Imax}$  | mezní vstupní napětí                    |
| $U_{IN}$    | vstupní napětí                          |

|                      |                                    |
|----------------------|------------------------------------|
| $U_{IO} , U_{os}$    | napěťové nesymetrie vstupů         |
| $U_{omax}$           | rozkmít výstupního napětí          |
| $U_{os}/\Delta T$    | teplotní součinitel                |
| $U_{OUT}$            | výstupní napětí                    |
| $U_z$                | svorkové napětí na zátěži          |
| $W$                  | transrezistance                    |
| $Y_{OUT}$            | výstupní admitance                 |
| $Z$                  | zátěž                              |
| $Z_1$                | zdroje                             |
| $Z_{IN} , Z_{vst}$   | vstupní impedance                  |
| $Z_L$                | zatěžovací impedance               |
| $Z_{OUT} , Z_{výst}$ | výstupní impedance                 |
| $Z_t$                | zvolená impedance dle zisku        |
| $\alpha I_{IO}$      | teplotní drift proudové nesymetrie |
| $\alpha U_{IO}$      | teplotní drift napěťové nesymetrie |
| $v_a$                | rozsah pracovních teplot           |

## **OBSAH:**

|                      |    |
|----------------------|----|
| SEZNAM OBRÁZKŮ ..... | I  |
| SEZNAM TABULEK.....  | II |

|           |   |
|-----------|---|
| ÚVOD..... | 1 |
|-----------|---|

|                                                     |          |
|-----------------------------------------------------|----------|
| <b>1 KLASIFIKACE PRVKŮ ELEKTICKÝCH OBVODŮ .....</b> | <b>2</b> |
|-----------------------------------------------------|----------|

|                                                                                                 |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1.1 PODLE TOHO, ZDA-LI ENERGII DO OBVODU DODÁVAJÍ<br/>NEBO Z OBVODŮ SPOTŘEBOVÁVAJÍ .....</b> | <b>2</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|

|                           |   |
|---------------------------|---|
| 1.1.1 Pasivní prvky ..... | 2 |
|---------------------------|---|

|                           |   |
|---------------------------|---|
| 1.1.2 Aktivní prvky ..... | 2 |
|---------------------------|---|

|                                            |          |
|--------------------------------------------|----------|
| <b>1.2 POČTU VÝVODŮ (PÓLY, BRÁNY).....</b> | <b>2</b> |
|--------------------------------------------|----------|

|                    |   |
|--------------------|---|
| 1.2.1 n-póly ..... | 2 |
|--------------------|---|

|                     |   |
|---------------------|---|
| 1.2.2 n-brany ..... | 2 |
|---------------------|---|

|                                                      |          |
|------------------------------------------------------|----------|
| <b>1.3 PODLE TVARU ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY.....</b> | <b>3</b> |
|------------------------------------------------------|----------|

|                      |   |
|----------------------|---|
| 1.3.1 Lineární ..... | 3 |
|----------------------|---|

|                       |   |
|-----------------------|---|
| 1.3.2 Nelineární..... | 3 |
|-----------------------|---|

|                                       |          |
|---------------------------------------|----------|
| <b>1.4 PODLE MOŽNOSTI ŘÍZENÍ.....</b> | <b>3</b> |
|---------------------------------------|----------|

|                                                     |          |
|-----------------------------------------------------|----------|
| <b>1.5 PODLE SCHOPNOSTI AKUMULACE ENERGIE .....</b> | <b>3</b> |
|-----------------------------------------------------|----------|

|                                          |          |
|------------------------------------------|----------|
| <b>1.6 PODLE TECHNOLOGIE VÝROBY.....</b> | <b>3</b> |
|------------------------------------------|----------|

|                                           |          |
|-------------------------------------------|----------|
| <b>1.7 PODLE VNITŘNÍ SLOŽITOSTI .....</b> | <b>3</b> |
|-------------------------------------------|----------|

|                                                    |          |
|----------------------------------------------------|----------|
| <b>1.8 PODLE ČASOVÉ ZÁVISLOSTI PARAMETRŮ .....</b> | <b>3</b> |
|----------------------------------------------------|----------|

|                                            |          |
|--------------------------------------------|----------|
| <b>1.9 PODLE POPISU REGULÁRNOSTI .....</b> | <b>3</b> |
|--------------------------------------------|----------|

|                                      |          |
|--------------------------------------|----------|
| <b>2 AKTIVNÍ OBVODOVÉ PRVKY.....</b> | <b>4</b> |
|--------------------------------------|----------|

|                                         |          |
|-----------------------------------------|----------|
| <b>2.1 DĚLENÍ AKTIVNÍCH PRVKŮ .....</b> | <b>4</b> |
|-----------------------------------------|----------|

|                                                   |   |
|---------------------------------------------------|---|
| 2.1.1 Nezávislé (autonomní) napěťové zdroje ..... | 4 |
|---------------------------------------------------|---|

|                                                   |   |
|---------------------------------------------------|---|
| 2.1.2 Nezávislé (autonomní) proudové zdroje ..... | 5 |
|---------------------------------------------------|---|

|                                                       |   |
|-------------------------------------------------------|---|
| 2.1.3 Závislé (řízené) zdroje elektrické energie..... | 6 |
|-------------------------------------------------------|---|

|                                               |   |
|-----------------------------------------------|---|
| 2.1.4 Dělení řízených (závislých) zdrojů..... | 6 |
|-----------------------------------------------|---|

|                                          |   |
|------------------------------------------|---|
| 2.1.4.1 Zdroj napětí řízený napětím..... | 7 |
|------------------------------------------|---|

|                                          |   |
|------------------------------------------|---|
| 2.1.4.2 Zdroj proudu řízený proudem..... | 7 |
|------------------------------------------|---|

|                                           |   |
|-------------------------------------------|---|
| 2.1.4.3 Zdroj proudu řízený napětím ..... | 7 |
|-------------------------------------------|---|

|                                           |   |
|-------------------------------------------|---|
| 2.1.4.4 Zdroj napětí řízený proudem ..... | 8 |
|-------------------------------------------|---|

|                                                                 |          |
|-----------------------------------------------------------------|----------|
| <b>3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY AKTIVNÍCH<br/>OBVODOVÝCH PRVKŮ.....</b> | <b>8</b> |
|-----------------------------------------------------------------|----------|

|                                                                           |          |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>3.1 OPERAČNÍ ZESILOVAČ MAA741 – ZÁKLADNÍ<br/>ÚDAJE V KATALOGU.....</b> | <b>8</b> |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.2 TRANSKONDUKTANČNÍ ŠIROKOPÁSMOVÝ<br/>ZESILOVAČ MAX435 - ÚDAJE Z KATAL. LISTU .....</b> | <b>12</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

|       |                                                                                              |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3   | VYSOKORYCHLOSTNÍ MONOLITICKÝ OZ<br>AD844 - ÚDAJE Z KATALOGOVÉHO LISTU .....                  | 16 |
| 3.4   | UNIVERZÁLNÍ MONOLITICKÝ PRVEK OPA660<br>- ÚDAJE Z KATALOGOVÉHO LISTU.....                    | 18 |
| 4     | METODY PRO URČENÍ NĚKTERÝCH<br>PARAMETRŮ AKTIVNÍCH PRVKŮ .....                               | 22 |
| 4.1   | URČENÍ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY<br>PROUDOVÉHO PŘENOSU .....                                | 22 |
| 4.2   | URČENÍ VSTUPNÍ IMPEDANCE $Z_{IN}$ .....                                                      | 27 |
| 4.3   | URČENÍ VÝSTUPNÍ IMPEDANCE $Z_{OUT}$ .....                                                    | 27 |
| 5     | SEZNÁMENÍ S INTEGROVANÝM OBVODEM COAK .....                                                  | 29 |
| 5.1   | KONSTRUKČNÍ PARAMETRY OBVODU COAK .....                                                      | 29 |
| 5.2   | NASTAVENÍ DIGITÁLNÍHO ZESÍLENÍ .....                                                         | 31 |
| 5.3   | COAK - URČENÍ FREK. CHAR. PROUDOVÉHO PŘENOSU,<br>VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ IMPEDANCE.....           | 32 |
| 6     | SIMULACE NĚKTERÝCH PARAMETRŮ<br>U VYBRANÝCH AKTIVNÍCH PRVKŮ .....                            | 34 |
| 6.1   | CCCS S MODELOVANÝMI VNITŘNÍMI IMPEDANCEMI<br>– SIMULACE MĚŘÍCÍ METODY .....                  | 34 |
| 6.1.1 | CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi<br>– Měření proudového přenosu ( $I/I_{IN}$ )..... | 35 |
| 6.1.2 | CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi<br>– Měření vstupní impedance $Z_{IN}$ .....       | 36 |
| 6.1.3 | CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi<br>– Měření výstupní impedance $Z_{OUT}$ .....     | 38 |
| 6.2   | MAX435 – SIMULACE MĚŘÍCÍ METODY .....                                                        | 39 |
| 6.2.1 | MAX435 – Měření proudového přenosu ( $I/I_{IN}$ ) .....                                      | 39 |
| 6.2.2 | MAX435 – Měření vstupní impedance $Z_{IN}$ .....                                             | 41 |
| 6.2.3 | MAX435 – Měření výstupní impedance $Z_{OUT}$ .....                                           | 42 |
| 6.3   | AD844 – SIMULACE MĚŘÍCÍ METODY .....                                                         | 43 |
| 6.3.1 | AD844 – Měření proudového přenosu ( $I/I_{IN}$ ) .....                                       | 43 |
| 6.3.2 | AD844 – Měření vstupní impedance $Z_{IN}$ .....                                              | 45 |
| 6.3.3 | AD844 – Měření výstupní impedance $Z_{OUT}$ .....                                            | 47 |
| 6.4   | OPA660 – SIMULACE MĚŘÍCÍ METODY .....                                                        | 48 |
| 6.4.1 | OPA660 – Měření proudového přenosu ( $I/I_{IN}$ ) .....                                      | 48 |
| 6.4.2 | OPA660 – Měření vstupní impedance $Z_{IN}$ .....                                             | 49 |
| 6.4.3 | OPA660 – Měření výstupní impedance $Z_{OUT}$ .....                                           | 50 |
| 6.5   | FÁZOVÉ CHARAKTERISTIKY – zhodnocení.....                                                     | 51 |
| 7     | PRAKTICKÁ ČÁST-REÁLNÉ MĚŘENÍ PRVKU AD844 .....                                               | 55 |

|                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>7.1 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ PRO MĚŘENÍ<br/>VYBRANÝCH PARAMETRŮ AKT. PRVKU AD844.....</b>    | <b>55</b> |
| <b>7.2 REÁLNÉ MĚŘENÍ VYBRANÝCH<br/>PARAMETRŮ PRVKU AD844.....</b>                                 | <b>57</b> |
| <b>7.3 VÝSLEDKY REÁLNÉHO MĚŘENÍ PRVKU AD844 A<br/>POROVNÁNÍ SE SIMULACEMI MĚŘÍCÍ METODY .....</b> | <b>58</b> |
| 7.3.1 Reálné měření AD844 – Měření proudového přenosu ( $I/I_{IN}$ ) .....                        | 58        |
| 7.3.2 Reálné měření AD844 – Měření vstupní impedance ( $Z_{IN}$ ) .....                           | 59        |
| 7.3.3 Reálné měření AD844 – Měření výstupní impedance ( $Z_{OUT}$ ) .....                         | 60        |
| <b>7.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ REÁLNÉHO<br/>MĚŘENÍ PRVKU AD844.....</b>                               | <b>62</b> |
| <b>8 ZÁVĚR.....</b>                                                                               | <b>63</b> |
| <b>9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>                                                          | <b>65</b> |
| <b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>                                                                        | <b>66</b> |

## SEZNAM OBRÁZKŮ:

|                |                                                                                                                           |    |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Obr.1:</b>  | Aktivní a pasivní prvky.....                                                                                              | 2  |
| <b>Obr.2:</b>  | Rozdělení prvků podle počtu vývodů .....                                                                                  | 2  |
| <b>Obr.3:</b>  | Rozdělení prvků podle základní charakteristiky .....                                                                      | 3  |
| <b>Obr.4:</b>  | Zatěžovací charakteristika ideálního zdroje napětí .....                                                                  | 4  |
| <b>Obr.5:</b>  | a) Schéma reálného zdroje napětí.....                                                                                     | 5  |
|                | b) Zatěžovací charakteristika reálného zdroje napětí.....                                                                 | 5  |
| <b>Obr.6:</b>  | Zatěžovací charakteristika ideálního zdroje proudu.....                                                                   | 5  |
| <b>Obr.7:</b>  | a) Schéma reálného zdroje proudu .....                                                                                    | 6  |
|                | b) Zatěžovací charakteristika reálného zdroje proudu .....                                                                | 6  |
| <b>Obr.8:</b>  | Zdroj napětí řízený napětím .....                                                                                         | 7  |
| <b>Obr.9:</b>  | Zdroj proudu řízený proudem .....                                                                                         | 7  |
| <b>Obr.10:</b> | Zdroj proudu řízený napětím.....                                                                                          | 8  |
| <b>Obr.11:</b> | Zdroj napětí řízený proudem.....                                                                                          | 8  |
| <b>Obr.12:</b> | a) Přiřazení vývodů OZ MAA741 .....                                                                                       | 9  |
|                | b) Zapojení pro nastavení napěťové nesymetrie vstupů $U_{IO}$ .....                                                       | 9  |
| <b>Obr.13:</b> | Typické zapojení MAX435.....                                                                                              | 14 |
| <b>Obr.14:</b> | Využití zesilovače AD844 .....                                                                                            | 17 |
| <b>Obr.15:</b> | Rozložení vývodů prvku OPA660.....                                                                                        | 20 |
| <b>Obr.16:</b> | Nastavení zisku prvku OPA660 .....                                                                                        | 20 |
| <b>Obr.17:</b> | Ideální případ při měření frekvenční charakteristiky proudového přenosu.....                                              | 22 |
| <b>Obr.18:</b> | Blokové schéma s generátorem napětí a převodníky .....                                                                    | 22 |
| <b>Obr.19:</b> | Měření pomocí ideálního zdroje napětí a voltmetru.....                                                                    | 23 |
| <b>Obr.20:</b> | Skutečný případ při měření frekvenční charakteristiky proudového přenosu pomocí spektrálního analyzátoru AGIENT 4395..... | 24 |
| <b>Obr.21:</b> | Skutečný případ při měření frekvenční charakteristiky proudového přenosu s uvažováním $Z_{OUT}$ .....                     | 26 |
| <b>Obr.22:</b> | Měření výstupní impedance $Z_{OUT}$ .....                                                                                 | 28 |
| <b>Obr.23:</b> | a) COAK – pohled shora.....                                                                                               | 29 |
|                | b) COAK – pohled z boku .....                                                                                             | 30 |
|                | c) COAK – Detail A .....                                                                                                  | 30 |
|                | d) COAK – Detail B .....                                                                                                  | 30 |
| <b>Obr.24:</b> | COAK – Schématická značka jednoho ze čtyř CCCS.....                                                                       | 31 |
| <b>Obr.25:</b> | COAK- Měření frekvenční charakteristiky proudového přenosu .....                                                          | 33 |

|                |                                                                                                     |    |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Obr.26:</b> | Simulační měření v programu PSpice<br>– CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi .....             | 35 |
| <b>Obr.27:</b> | Amplitudová charakteristika proudového přenosu<br>– CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi ..... | 36 |
| <b>Obr.28:</b> | Fázová charakteristika proudového přenosu<br>– CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi .....      | 36 |
| <b>Obr.29:</b> | Závislost vstupní impedance na frekvenci<br>– CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi .....       | 37 |
| <b>Obr.30:</b> | Fázová charakteristika vstupní impedance<br>– CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi .....       | 37 |
| <b>Obr.31:</b> | Závislost výstupní impedance na frekvenci<br>– CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi .....      | 38 |
| <b>Obr.32:</b> | Fázová charakteristika výstupní impedance<br>– CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi .....      | 38 |
| <b>Obr.33:</b> | MAX435 - simulační měření v programu PSpice .....                                                   | 39 |
| <b>Obr.34:</b> | Amplitudová charakteristika proudového přenosu – MAX435 .....                                       | 40 |
| <b>Obr.35:</b> | Fázová charakteristika proudového přenosu – MAX435 .....                                            | 40 |
| <b>Obr.36:</b> | Závislost vstupní impedance na frekvenci – MAX435 .....                                             | 41 |
| <b>Obr.37:</b> | Fázová charakteristika vstupní impedance – MAX435 .....                                             | 41 |
| <b>Obr.38:</b> | Závislost výstupní impedance na frekvenci – MAX435 .....                                            | 42 |
| <b>Obr.39:</b> | Fázová charakteristika výstupní impedance – MAX435 .....                                            | 42 |
| <b>Obr.40:</b> | AD844 - simulační měření v programu PSpice .....                                                    | 43 |
| <b>Obr.41:</b> | Amplitudová charakteristika proudového přenosu – AD844 .....                                        | 43 |
| <b>Obr.42:</b> | Fázová charakteristika proudového přenosu – AD844 .....                                             | 44 |
| <b>Obr.43:</b> | Závislost vstupní impedance na frekvenci – AD844 .....                                              | 45 |
| <b>Obr.44:</b> | Měření náhradního obvodu vstupní impedance prvku AD844 .....                                        | 45 |
| <b>Obr.45:</b> | Porovnávací měření - vstupní impedance prvku AD844 .....                                            | 46 |
| <b>Obr.46:</b> | Fázová charakteristika vstupní impedance – AD844 .....                                              | 46 |
| <b>Obr.47:</b> | Závislost výstupní impedance na frekvenci – AD844 .....                                             | 47 |
| <b>Obr.48:</b> | Fázová charakteristika výstupní impedance – AD844 .....                                             | 47 |
| <b>Obr.49:</b> | OPA660 - simulační měření v programu PSpice .....                                                   | 48 |
| <b>Obr.50:</b> | Amplitudová charakteristika proudového přenosu – OPA660 .....                                       | 48 |
| <b>Obr.51:</b> | Fázová charakteristika proudového přenosu – OPA660 .....                                            | 49 |
| <b>Obr.52:</b> | Závislost vstupní impedance na frekvenci – OPA660 .....                                             | 49 |
| <b>Obr.53:</b> | Fázová charakteristika vstupní impedance – OPA660 .....                                             | 50 |

|                |                                                                                                                             |          |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Obr.54:</b> | Závislost výstupní impedance na frekvenci – OPA660.....                                                                     | 50       |
| <b>Obr.55:</b> | Fázová charakteristika výstupní impedance – OPA660 .....                                                                    | 51       |
| <b>Obr.56:</b> | Zjištěná orientace proudu při měření prvků s CCCS.....                                                                      | 52       |
| <b>Obr.57:</b> | Náhradní obvod vstupní impedance prvku AD844 .....                                                                          | 52       |
| <b>Obr.58:</b> | Správná simulace náhradního obvodu<br>vstupní impedance prvku AD844 .....                                                   | 53       |
| <b>Obr.59:</b> | Správné porovnávací měření<br>– vstupní impedance prvku AD844 .....                                                         | 53       |
| <b>Obr.60:</b> | Porovnání fáze výst. impedancí $Z_{OUT}$ u prvků AD844, OPA660,<br>CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi a MAX435 ..... | 54       |
| <b>Obr.61:</b> | Náhradní obvod výstupní impedance prvků AD844 .....                                                                         | 54       |
| <b>Obr.62:</b> | a) Cesty plošného spoje pro měření prvků AD844.....<br>b) Osazovací plán součástek na desce .....                           | 55<br>55 |
|                | c) Celkový návrh plošné desky .....                                                                                         | 55       |
| <b>Obr.63:</b> | Amplitudová charakteristika proud. přenosu AD844 – porovnání .....                                                          | 58       |
| <b>Obr.64:</b> | Fázová charakteristika proudového přenosu AD844 – porovnání .....                                                           | 58       |
| <b>Obr.65:</b> | Frekvenční charakteristika vstupní impedance AD844 – porovnání.....                                                         | 59       |
| <b>Obr.66:</b> | Fázová charakteristika vstupní impedance AD844 – porovnání.....                                                             | 60       |
| <b>Obr.67:</b> | Frekvenční charakteristika výstupní impedance AD844 – porovnání....                                                         | 61       |
| <b>Obr.68:</b> | Fázová charakteristika výstupní impedance AD844 – porovnání.....                                                            | 61       |

**SEZNAM TABULEK:**

|               |                                                                                 |    |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tab.1:</b> | Základní parametry prvku MAX435 .....                                           | 15 |
| <b>Tab.2:</b> | Základní parametry prvku AD844B .....                                           | 18 |
| <b>Tab.3:</b> | Základní parametry prvku OPA660 .....                                           | 21 |
| <b>Tab.4:</b> | COAK - Jednotlivé rozměry .....                                                 | 30 |
| <b>Tab.5:</b> | COAK - Rozložení vývodů.....                                                    | 31 |
| <b>Tab.6:</b> | COAK - Zesílení dle nastavení<br>jednotlivých digitální vstupů CTRL (0-3) ..... | 32 |
| <b>Tab.7:</b> | Seznam použitých součástek pro realizaci reálného měření.....                   | 56 |

## ÚVOD:

Práce seznamuje s problematikou řešení metod pro měření přenosových a imitančních charakteristik aktivních obvodových prvků. Na jejím začátku je popsáno obecné rozdělení prvků elektrických obvodů. Dá se tak získat přehled o základních pojmech, ideálních a skutečných napěťových a proudových zdrojích.

Dále jsou uvedeny základní parametry aktivních obvodových prvků, které udává výrobce v katalogových listech. Nejprve u prvku MAA741, který už dnes patří do historie operačních zesilovačů a následně jsou popsány novější aktivní prvky. Mezi takovéto prvky patří transkondukční širokopásmový zesilovač MAX435, vysokorychlostní monolitický zesilovač AD844, univerzální monolitický prvek OPA660 a integrovaný obvod COAK.

Na konci tohoto pojednání jsou stanoveny metody pro zjištění některých parametrů u těchto vybraných aktivních prvků. Zjištěné metody se týkají frekvenčních charakteristik proudového přenosu, vstupní a výstupní impedance zkoumaného prvku. U těchto vlastností nás také zajímaly i fázové charakteristiky. Měření bylo prováděno v programovém prostředí PSpice a výsledky jsou zhodnoceny v grafické podobě ke konci práce.

Praktická část práce vycházela z navržené metody a pomocí programu EAGLE byla zhotovena nejprve deska plošných spojů, na které se následně uskutečnilo reálné měření vybraného prvku AD844.

V závěru byly zhodnoceny a vzájemně porovnány výsledky simulací a reálného měření prvku na AD844.

# 1 KLASIFIKACE PRVKŮ ELEKTICKÝCH OBVODŮ

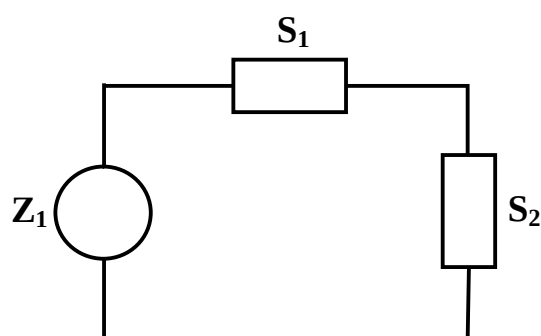
## 1.1 Podle toho, zda-li energii do obvodu dodávají nebo z obvodů spotřebovávají

### 1.1.1 Pasivní prvky

Tzv. spotřebiče  $S_1$ ,  $S_2$ , které energii z obvodů spotřebovávají.

### 1.1.2 Aktivní prvky

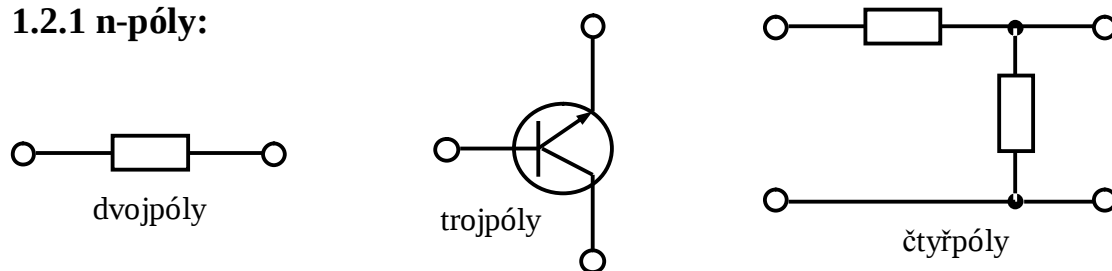
Tzv. zdroje  $Z_1$ , které do obvodů energii dodávají.



Obr.1: Aktivní a pasivní prvky

## 1.2 Podle počtu vývodů (póly, brány)

### 1.2.1 n-póly:



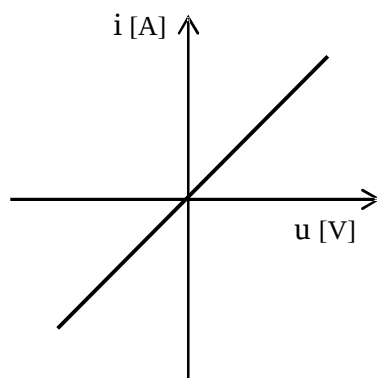
Obr.2: Rozdělení prvků podle počtu vývodů

### 1.2.2 n-brany:

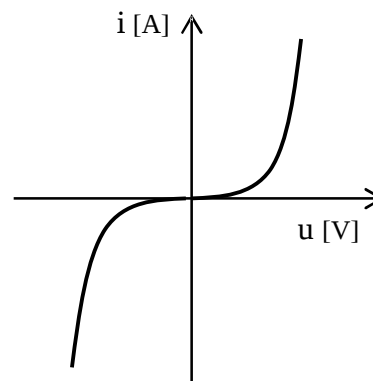
- Ø jednobrany
- Ø dvoubrany
- Ø vícebrany

### 1.3 Podle tvaru základní charakteristiky (V-A charakteristiky)

#### 1.3.1 Lineární:



#### 1.3.2 Nelineární:



Obr.3: Rozdělení prvků podle základní charakteristiky

### 1.4 Podle možnosti řízení

- Ø řízené
- Ø neřízené

### 1.5 Podle schopnosti akumulace energie

- Ø setrvačné (C - kondenzátor, L - induktor)
- Ø nesetrvačné (R - rezistor)

### 1.6 Podle technologie výroby

- Ø integrované
- Ø diskrétní

### 1.7 Podle vnitřní složitosti

- Ø elementární
- Ø složené

### 1.8 Podle časové závislosti parametrů

- Ø prvky s parametry konstantními
- Ø prvky s časově proměnnými parametry

### 1.9 Podle popisu regulárnosti

- Ø regulární
- Ø neregulární

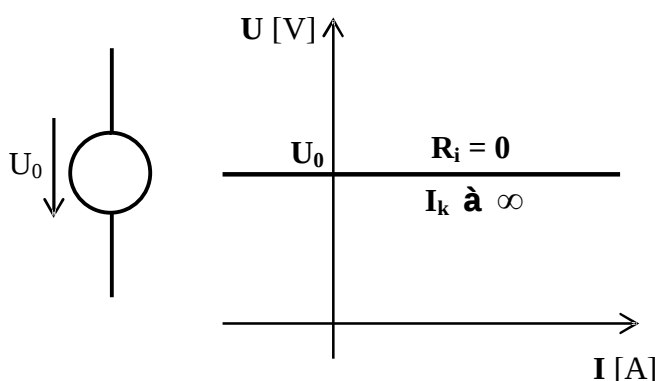
## 2 AKTIVNÍ OBVODOVÉ PRVKY

Působí v elektrických obvodech jako zdroje energie. Energii získávají z energie různých druhů (tepelné, světelné, chemické,...). Díky této energii se udržuje na svorkách trvalý potenciálový rozdíl - vznik trvalého el.proudu v uzavřeném obvodu.

### 2.1 Dělení aktivních prvků

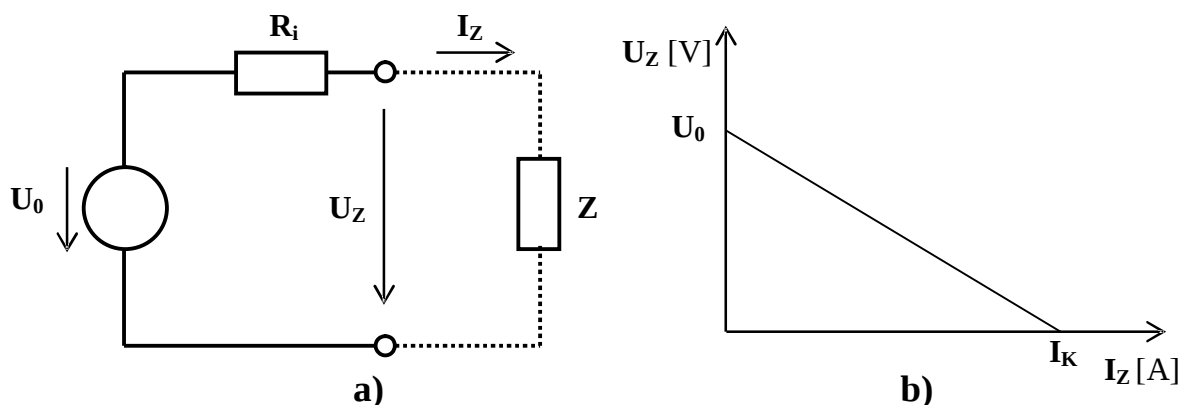
#### 2.1.1 Nezávislé (autonomní) napěťové zdroje

**Ideální nezávislý zdroj napětí:** Bez ohledu na velikosti odebíraného proudu udržuje na svých výstupních svorkách konstantní potenciálový rozdíl. Prochází bodem  $U_0$  rovnoběžně s vodorovnou osou **Obr.4**. Při zvětšování zatěžovacího proudu nevzniká na vnitřním odporu zdroje žádný úbytek napětí. Schematická značka je na **Obr.4**.



**Obr.4:** Zatěžovací charakteristika ideálního zdroje napětí

**Reálný nezávislý zdroj napětí:** Reálný (skutečný) zdroj elektrické energie nemá zatěžovací charakteristiku rovnoběžnou ani s osou proudu ani s osou napětí. Jeho náhradní obvod si můžeme představit jako sériové zapojení ideálního zdroje napětí a vnitřního odporu **Obr.5a**



**Obr.5:** a) Schéma reálného zdroje napětí  
b) Zatěžovací charakteristika reálného zdroje napětí

Vztah (1.1) vyplývající z Obr.5a :

$$U_Z = U_0 - R_i I_Z \quad (1.1)$$

$R_i$  ..... vnitřní odpor

$Z$  ..... zátěž

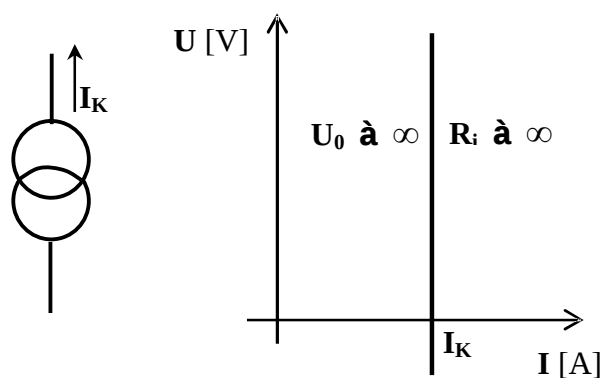
$U_0$  ..... svorkové napětí na prázdko

$U_Z$  ..... svorkové napětí na zátěži

$I_K$  ..... proud nakrátko

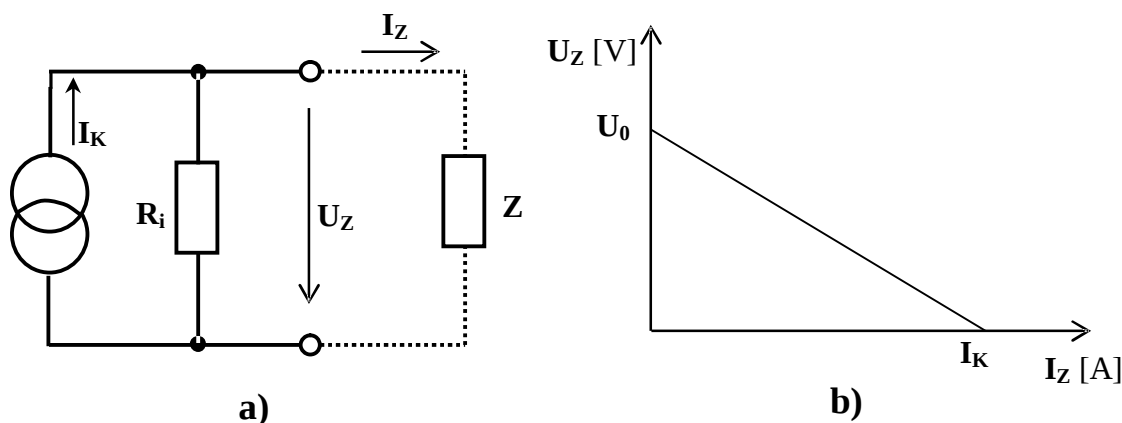
### 2.1.2 Nezávislé (autonomní) proudové zdroje

**Ideální nezávislý zdroj proudu:** Je takový zdroj, který dodává proud nezávisle na vlastnostech připojené zátěže. Zatěžovací charakteristika prochází bodem  $I_K$  a je rovnoběžná s osou napětí **Obr.6**. Jakékoliv konečné změně svorkového napětí odpovídá nulová změna proudu. Vnitřní odpor takového zdroje je nekonečný a napětí naprázdno není definováno ( $U_0 \rightarrow \infty$ ).



**Obr.6:** Zatěžovací charakteristika ideálního zdroje proudu

**Reálný nezávislý zdroj proudu:** Reálný (skutečný) zdroj elektrické energie nemá zatěžovací charakteristiku rovnoběžnou ani s osou proudu ani s osou napětí. Jeho náhradní obvod si můžeme představit jako paralelní zapojení ideálního zdroje proudu a vnitřního odporu **Obr.7a**.



**Obr.7:** a) Schéma reálného zdroje proudu

b) Zatěžovací charakteristika reálného zdroje proudu

Vztah (1.2) vyplývající z Obr.7a :

$$\boxed{I_Z = I_K - U_Z / R_i} \quad (1.2)$$

$R_i$  ..... vnitřní odpor

$Z$  ..... zátěž

$I_K$  ..... proud nakrátko

$I_Z$  ..... proud na zátěži

### 2.1.3 Závislé (řízené) zdroje elektrické energie

**Ideální řízený zdroj:** Ze zdroje napájecího napětí zprostředkovává přenos el. energie a je řízen zpracovávaným signálem. Ze signálového obvodu neodebírá energii – je schopen dodávat nekonečný výkon a jeho řízené signály (napětí nebo proud) jsou nezávislé na zatížení.

**Reálný (skutečný) řízený zdroj:** Chybí mu základní vlastnost ideálního zdroje.

### 2.1.4 Dělení řízených (závislých) zdrojů

- Ø zdroj napětí řízený napětím ZNŘN (napěťový zesilovač)
- Ø zdroj proudu řízený proudem ZPŘP (proudový zesilovač)

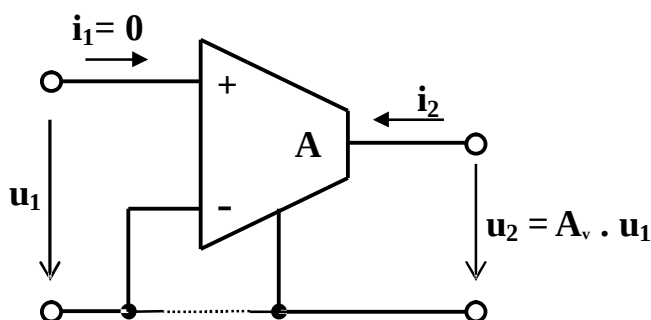
Ø zdroj proudu řízený napětím na ZPŘN

Ø zdroj napětí řízený proudem na ZNŘP

#### 2.1.4.1 Zdroj napětí řízený napětím

**ZNŘN** = ideální zesilovač napětí (IZN)

Anglické označení: **VCVS (Voltage Controlled Voltage Source)**



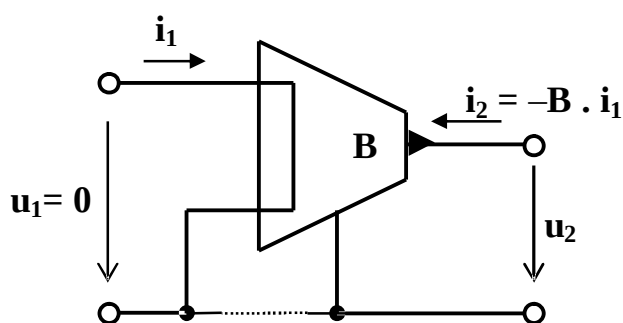
$Z_{vst} \rightarrow \infty$  (vstupní impedance)  
 $Z_{výst} \rightarrow 0$  (výstupní impedance)  
 $A_v$  ..... přenos napětí  
 $u_1$  ..... vstupní napětí  
 $u_2$  ..... výstupní napětí

**Obr.8:** Zdroj napětí řízený napětím

#### 2.1.4.2 Zdroj proudu řízený proudem

**ZPŘP** = ideální zesilovač proudu (IZP)

Anglické označení: **CCCS (Current Controlled Current Source)**



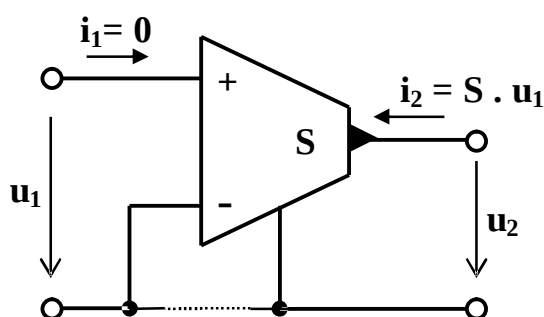
$Z_{vst} \rightarrow 0$  (vstupní impedance)  
 $Z_{výst} \rightarrow \infty$  (výstupní impedance)  
 $B$  ..... přenos proudu  
 $i_1$  ..... vstupní proud  
 $i_2$  ..... výstupní proud

**Obr.9:** Zdroj proudu řízený proudem

#### 2.1.4.3 Zdroj proudu řízený napětím

**ZPŘN** = převodník  $U \rightarrow I$  = transkonduktor

Anglické označení: **VCCS (Voltage Controlled Current Source)**



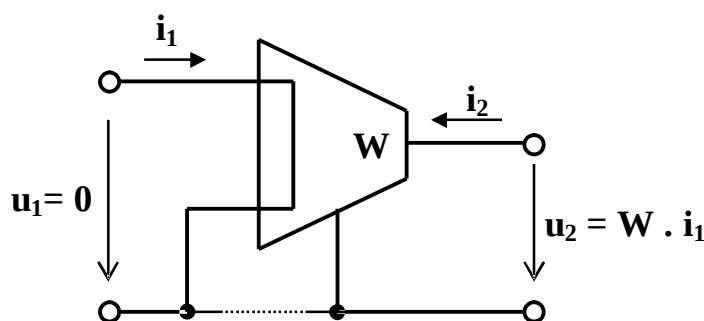
$Z_{vst} \rightarrow \infty$  (vstupní impedance)  
 $Z_{výst} \rightarrow \infty$  (výstupní impedance)  
 $S$  ..... strmost  
 $S = g_m =$  transkonduktance  
 $u_1$  ..... vstupní napětí  
 $i_2$  ..... výstupní proud

Obr.10: Zdroj proudu řízený napětím

#### 2.1.4.4 Zdroj napětí řízený proudem

ZNŘP = převodník  $I \rightarrow U$  = transrezistor

Anglické označení: CCVS (Current Controlled Voltage Source)



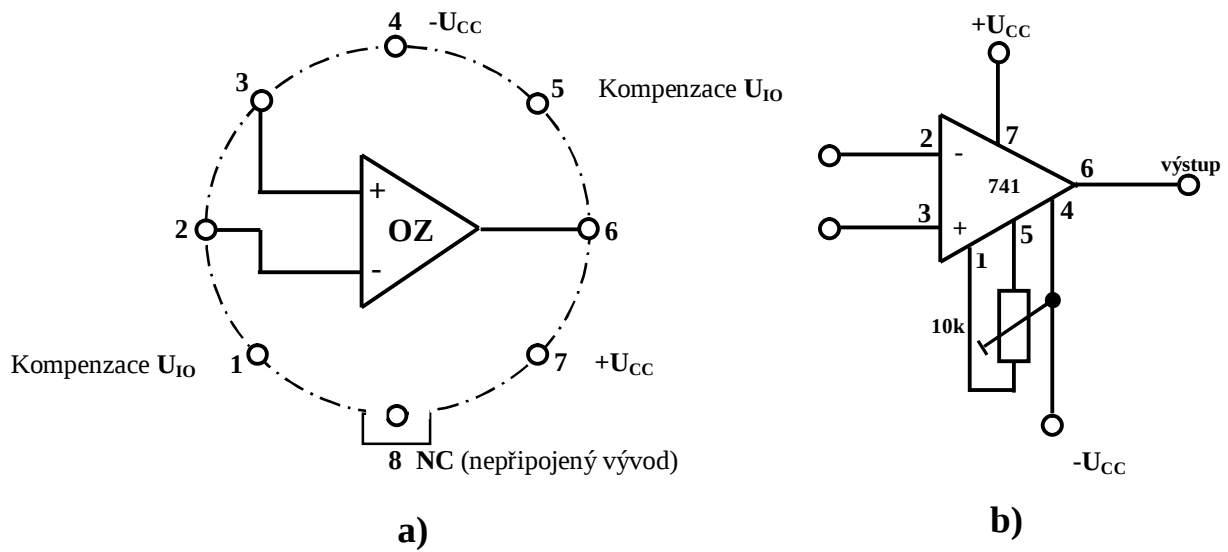
$Z_{vst} \rightarrow 0$  (vstupní impedance)  
 $Z_{výst} \rightarrow 0$  (výstupní impedance)  
 $W$  ..... transrezistance  
 $i_1$  ..... vstupní proud  
 $u_2$  ..... výstupní napětí

Obr.11: Zdroj napětí řízený proudem

## 3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY AKTIVNÍCH OBVODOVÝCH PRVKŮ

### 3.1 Operační zesilovač MAA741 – základní údaje v katalogu

První skupinu údajů tvoří údaje o pouzdru, zapojení vývodů a zapojení pro nastavení napěťové nesymetrie vstupů (pokud zesilovač tuto možnost umožňuje). Nastavení pro operační zesilovač MAA741 v osmi-vývodovém kovovém pouzdře je vidět na Obr.12b.



Obr.12: a) Přiřazení vývodů OZ MAA741

b) Zapojení pro nastavení napěťové nesymetrie vstupů  $U_{IO}$ 

Druhou skupinou jsou údaje mezních hodnot:

**1) Mezní napájecí napětí -  $U_{ccmax}$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj  $\pm 3$  až  $\pm 22V$ .

Při překročení napětí  $\pm 22V$  může dojít ke zničení obvodu nebo k jeho nevratným ztrátám. Obvod přestává správně pracovat pro napájecí napětí menší jak  $\pm 3V$ . Napětí mezi vývody 7 a 4 nesmí překročit hodnotu 44V při nesymetrickém napájecím napětí.

**2) Mezní rozdílové napětí -  $U_{IDmax}$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj  $\pm 30V$ . Ke zničení obvodu může dojít při nedodržení této hodnoty. Jedná se o mezní hodnotu napětí mezi kladným a záporným vstupem, která je výrobcem dovolena.

**3) Mezní vstupní napětí -  $U_{Imax}$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj  $\pm 15V$ . Jedná se o mezní hodnotu napětí na kladném a záporném vstupu (proti zemní svorce), která je výrobcem dovolena. Při překročení této hodnoty může dojít ke zničení obvodu nebo k jeho nevratným ztrátám.

**4) Mezní ztrátový výkon -  $P_{tot}$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj 500mW. Jedná se o mezní ztrátový výkon, který je výrobcem povolen, aby nedocházelo k přehřívání

integrovaného obvodu. Tato hodnota se většinou uvádí v závislosti na teplotě okolí  $v_a$ . Pro MAA741 se uvádí 500mW až do hodnoty teploty okolí  $v_a=70^\circ\text{C}$ .

**5) Rozsah pracovních teplot -  $v_a$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj  $v_a = -55^\circ\text{C}$  až  $+125^\circ\text{C}$ . Tento rozsah uvádí, pro jaké okolní teploty daný zesilovač pracuje, aniž by došlo k jeho poškození.

**6) Údaje o odolnosti proti zkratu výstupu -** Pro MAA741 platí, že zkrat výstupu není časově omezen. Některé operační zesilovače mohou mít zkrat výstupu časově omezen či zakázán.

## **7) Ostatní údaje dané výrobcem.**

Třetí skupinu tvoří charakteristické údaje, ty popisují vlastnosti zesilovače. Uváděny jsou jak typické (nominální) hodnoty, kterých výrobce dosahuje, tak i minimální a maximální hodnoty, které výrobce zaručuje. U každého parametru musí být uvedeny podmínky, za kterých byl měřen. Nejčastěji to bývají tyto parametry:

**1) Napět'ová nesymetrie vstupů -  $U_{I0}$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj 2mV.

**2) Proudová nesymetrie vstupů -  $I_{I0}$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj 20nA.

**3) Vstupní klidový proud -  $I_{IB}$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj 80nA.

**4) Vstupní odpor -  $R_{ISE}$  ( $R_D$ ):** Pro MAA741 se uvádí údaj  $2M\Omega$ . Jedná se o vstupní odpor mezi kladným a záporným vstupem

**5) Napět'ové zesílení otevřené smyčky -  $A_U$ :** Pro MAA741 se uvádí 150000.

**6) Napájecí proud -  $I_{CC}$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj 1,2mA. Jedná se o proud odebíraný z napájecího zdroje při nulovém výstupním napětí.

**7) Rozkmit výstupního napětí -  $U_{omax}$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj  $\pm 13V$ .

**8) Vstupní napět'ový rozsah –  $U_I$**  (mezni souhlasné napětí): Pro MAA741 se uvádí údaj  $\pm 13V$ . Rozsah napětí na kladném vstupu. Pro větší napětí se už vlastnosti zesilovače zhoršují.

**9) Potlačení souhlasného signálu - CMR:** Pro MAA741 se uvádí údaj 90dB. Měníme-li vstupní napětí proti zemní svorce při spojeném kladném a záporném vstupu, mělo by být výstupní napětí stále nulové. Ideální zesilovač zesiluje pouze rozdílové napětí  $u_d$  - u skutečného zesilovače se ovšem mění.

**10) Potlačení vlivu změn napájecího napětí - SVR:** Pro MAA741 se uvádí údaj 86dB či  $50\mu V/V$ . U ideálního zesilovače se při změně  $U_{cc}$  nesmí měnit výstupní napětí – u skutečného zesilovače se ovšem mění.

**11) Výstupní proud nakrátko -  $I_{os}$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj  $\pm 25mA$ . Jedná se o proud, který dodává operační zesilovač do zkratu proti zemní svorce.

**12) Výstupní odpor -  $R_0$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj  $75\Omega$ . Jedná se o odpor, který je ve výstupu operačního zesilovače, není-li zapojená zpětná vazba. Je-li zavedená záporná zpětná vazba je  $R_0 < 0,1 \Omega$  (napět'ová).

**13) Vstupní kapacita -  $C_I$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj  $2,7pF$ . Jedná se o kapacitu mezi kladným a záporným vstupem.

**14) Mezní průchozí (tranzitní) kmitočet -  $f_T$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj 1MHz.

**15) Rychlost přeběhu -  $S$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj  $0,5V/\mu s$ .

**16) Teplotní drift napět'ové nesymetrie -  $\alpha U_{I0}$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj  $10\mu V/^{\circ}C$ . Popisuje změny napět'ové nesymetrie s teplotou.

**17) Teplotní drift proudové nesymetrie -  $\alpha I_{I0}$ :** Pro MAA741 se uvádí údaj  $160pA/^{\circ}C$ . Popisuje změny proudové nesymetrie s teplotou.

**18) Další údaje udávané výrobcem**

### 3.2 Transkonduktanční širokopásmový zesilovač MAX435 - údaje z katalogového listu

#### Všeobecný popis:

MAX435 je vysokorychlostní širokopásmový transkonduktanční zesilovač (OTA) s přesnými vysokoimpedančními symetrickými vstupy. Jejich unikátní architektura jim umožňuje dosáhnout přesného zesílení. Zesílení lze upravit poměrem dvou impedancí a vnitřně nastaveným proudovým zesilovacím činitelem.

Obvod MAX435 umožňuje dosažení šíře přenosového pásma až 275MHz a rychlosti přeběhu 800V/μs. Potlačení souhlasného signálu dosahuje hodnoty 53dB při kmitočtu 10MHz.

Podle pracovních podmínek je nejlepší vstupní napěťová nesymetrie jen 0,3mV. Vstupy s vysokou impedancí snášejí velké rozdílové napětí bez nebezpečí uvedení zesilovače do saturace, vstupní napětí se může pohybovat od -2,5 V do +2,5 V.

Pro své vlastnosti se hodí především na funkci linkového budiče nebo přijímače ve videotechnice, ale lze vytvořit i součtový zesilovač, nebo pásmové filtry i krystalový oscilátor.

Obvody jsou určeny pro symetrické napájení  $\pm 5$  V (lit.[5]).

#### Příklady použití MAX435:

- Ø Přístrojový zesilovač s vysokou rychlostí
- Ø Pásmové filtry, propusti
- Ø Širokopásmové zesilovače s vysokým zesílením
- Ø Rozdílové linkové budiče a přijímače

#### Vlastnosti:

- Ø Šířka pásma 275MHz
- Ø Rychlost přeběhu 800 V/μs
- Ø CMRR (potlačení souhlasného signálu) 53dB při 10MHz
- Ø Nízký šum, 7nV/√Hz při 1kHz
- Ø Bez zpětné vazby
- Ø Rozdílové vstupy s vysokou impedancí
- Ø Vypínací schopnost: 450μA

**Mezní hodnoty:**

- Ø Napájecí napětí celkové: 12 V
- Ø Kladné napájecí napětí proti GND (U<sub>+</sub>): +6 V
- Ø Záporné napájecí napětí proti GND (U<sub>-</sub>): -6 V
- Ø Vstupní napětí: (U<sub>+</sub>) +0,3 V, (U<sub>-</sub>) -0,3 V
- Ø Proudový limit Z<sub>+</sub> nebo Z<sub>-</sub>: 10mA
- Ø Odolnost proti zkratu na výstupu: trvale
- Ø Zkrat I<sub>SET</sub> proti GND nebo U<sub>EE</sub>: 1sec
- Ø Ztrátový výkon (T<sub>A</sub> = +70°C):
  - Plastové pouzdro DIP (10,0mW/°C) 800mW
  - SQ (8,33mW/°C) 667mW
  - CERDIP (9,09mW/°C) 727mW
- Ø Rozsah pracovních teplot:
  - MAX43 C: 0°C až +70°C
  - MAX43 E: -40°C až +85°C
  - MAX43 MJD: -55°C až +125°C
- Ø Skladovací teplota: -65°C až +160°C
- Ø Pájení 10sec: +300°C

**Nastavení zisku:**

Obvody MAX435 jsou v podstatě napětím řízené proudové zdroje s vnitřně pevně nastaveným ziskem (K). U obvodu MAX435 je to  $4 \pm 2,5\%$ . Zisk lze upravit pomocí poměru dvou impedancí podle rovnice (2.1) - připojením vnějšího odporu s impedancí (Z<sub>T</sub>) k nastavovacím vývodům Z<sub>+</sub> a Z<sub>-</sub> a druhou impedancí (Z<sub>L</sub>), která je reprezentovaná zatěžovací impedancí. Tato rovnice popisuje napětový zisk - napětový proto, že proudový výstup je zatížen impedancí (Z<sub>L</sub>), která výstupní proud převede na napětí (U<sub>OUT</sub>). Typické zapojení MAX435 je vidět na **Obr.13**.

Výstupní proud MAX435 je úměrný k rozdílovému napětí na vstupu obvodu. Proud vzniklý na impedanci Z<sub>T</sub> je roven:  $I_T = U_{IN} / Z_T$ . Výstupní proud je potom určen násobkem předvolitelného proudového zisku (K) z OTA a objeví se na výstupních vývodech jako proud rovnající se:  $I_{OUT} = K \cdot I_T = K \cdot (U_{IN} / Z_T)$ . Tento proud teče v zatěžovací impedanci a vytvoří výstupní napětí shodné s rovnicí (2.2).

**Rovnice nastavení zisku:**

$$A_V = K \cdot (Z_L / Z_T) \quad (2.1)$$

$A_V$  ..... požadovaný zisk

$K$  ..... proudový zisk

$Z_L$  ..... zatěžovací impedance

$Z_T$  ..... zvolená impedance dle zisku

**Výstupní napětí je potom:**

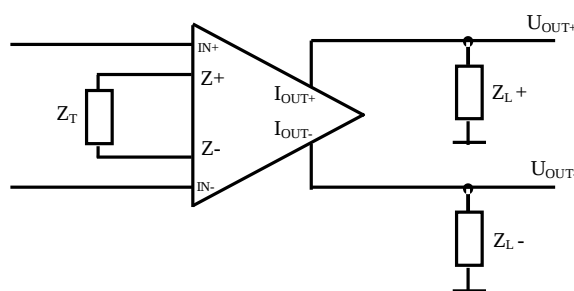
$$U_{OUT} = A_V \cdot U_{IN} = K \cdot (Z_L / Z_T) \cdot U_{IN} \quad (2.2)$$

$A_V$  ..... požadovaný zisk

$U_{OUT}$  ..... výstupní napětí

$U_{IN}$  ..... vstupní napětí

Pro přesný výpočet je nutné uvažovat i vnitřní impedanci nastavovacího vstupu, která je v sérii s vnějším rezistorem, i vnitřní výstupní impedanci, která je paralelně k zátěži (viz. lit[6]).



**Obr.13:** Typické zapojení MAX435

**Tab.1:** Základní parametry prvku MAX435

|                                  |                   | MAX435                                          |            |            |            |                                |
|----------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------|------------|------------|------------|--------------------------------|
|                                  |                   | Podmínky                                        | Min.       | Typ.       | Max.       |                                |
| Napájecí napětí                  | $\pm U$           | $-55^{\circ}\text{C} \div +125^{\circ}\text{C}$ | $\pm 4,75$ | $\pm 5,00$ | $\pm 5,25$ | V                              |
| Napájecí proud                   | $I_s$             | $-55^{\circ}\text{C} \div +125^{\circ}\text{C}$ | 30         | 35         | 41         | mA                             |
| Vstupní napětí                   | IN+, IN-          | $-55^{\circ}\text{C} \div +125^{\circ}\text{C}$ | -2,5       |            | +2,5       | V                              |
| Napěťová nesymetrie              | $U_{os}$          |                                                 |            | 0,3        | 3          | mV                             |
| Teplotní součinitel              | $U_{os}/\Delta T$ |                                                 |            | 3,5        |            | $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ |
| Vstupní klidový proud            | $I_B$             | $T_A = +25^{\circ}\text{C}$                     |            | 1          | 3          | $\mu\text{A}$                  |
|                                  |                   | $0^{\circ}\text{C} \div +70^{\circ}\text{C}$    |            |            | 5          |                                |
|                                  |                   | $-40^{\circ}\text{C} \div +85^{\circ}\text{C}$  |            |            | 10         |                                |
|                                  |                   | $-55^{\circ}\text{C} \div +125^{\circ}\text{C}$ |            |            | 10         |                                |
| Vstupní odpor                    | $R_{IN}$          |                                                 | 200        | 800        |            | k $\Omega$                     |
| Stejnoseměrný odpor mezi Z+ a Z- | $R_Z$             |                                                 |            | 0,15       | 1,5        | $\Omega$                       |
| Výstupní napětí                  | $U_{0+}, U_{0-}$  | $Z_{L+}=500\Omega$                              | -3,5       |            | +3,5       | V                              |
| Výstupní impedance               | $R_0$             |                                                 | 2          | 3,5        |            | k $\Omega$                     |
| Výstupní proud                   | $I_0$             |                                                 | -10        |            | 10         | mA                             |
| Proudový zesilovací činitel      | K                 | $T_A = +25^{\circ}\text{C}$                     | 3,9        | 4          | 4,1        | -                              |
|                                  |                   | $0^{\circ}\text{C} \div +70^{\circ}\text{C}$    | 3,8        |            | 4,15       |                                |
|                                  |                   | $-40^{\circ}\text{C} \div +85^{\circ}\text{C}$  | 3,7        |            | 4,15       |                                |
|                                  |                   | $-55^{\circ}\text{C} \div +125^{\circ}\text{C}$ | 3,6        |            | 4,2        |                                |
| Potlačení souhlasného signálu    | CMRR              | 10 MHz,<br>$Z_t=200\Omega, Z_L=25\Omega$        |            | 53         |            | dB                             |
| Potlačení změn napájecího napětí | PSSR              |                                                 | 50         | 77         |            | dB                             |
| Rychlost přeběhu                 | SR                | $Z_t=0\Omega$                                   |            | 800        |            | V/ $\mu\text{s}$               |
|                                  |                   | $Z_t=0\Omega,$<br>$Z_{L+}=Z_{L-}=25\Omega$      |            | 550        |            |                                |
| Šířka pásma -3dB                 | BW                | $Z_t=200\Omega, Z_L=25\Omega$                   |            | 275        |            | MHz                            |
| Šum                              | $e_n$             | 1kHz, $Z_t=50\Omega$                            |            | 7          |            | nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$         |

### 3.3 Vysokorychlostní monolitický operační zesilovač AD844 - údaje z katalogového listu

#### Všeobecný popis:

V AD844 je vysokorychlostní monolitický operační zesilovač konstruovaný pomocí technologie Analog Devices'. Kombinuje vysokou šířku pásma a velmi rychlé reakce signálu s vynikajícími stejnosměrnými vlastnostmi.

I když je optimalizován pro použití v běžných proudových i napěťových aplikacích a to jako invertující mód zesilovače, je také vhodný i pro použití v mnoha neinvertujících aplikacích.

AD844 může být použit v místě tradičních OP zesilovačů, ale díky jeho proudové zpětné vazbě dosahuje lepších vlastností. Zejména: vysoké linearity a výjimečně čisté impulzní odezvy.

AD844 je dostupný ve čtyřech provedeních. Vyrábějí se jak v 8 vývodové, tak i v 16 vývodové podobě. AD844 jsou univerzální, levné komponenty poskytující výbornou kombinaci střídavých a stejnosměrných vlastností. Mohou se použít jako alternativa k EL2020 a CLC400 / 1.

AD844 kombinuje nízké zkreslení, nízkou hladinu šumu a nízký drift s širokou šířkou pásma, což je vynikající pro použití jako vstupní zesilovač.

#### Příklady použití AD844:

- Ø Pulzní zesilovače
- Ø Vyrovnávací paměti ve videotechnice
- Ø Vysokorychlostní proudové DAC rozhraní

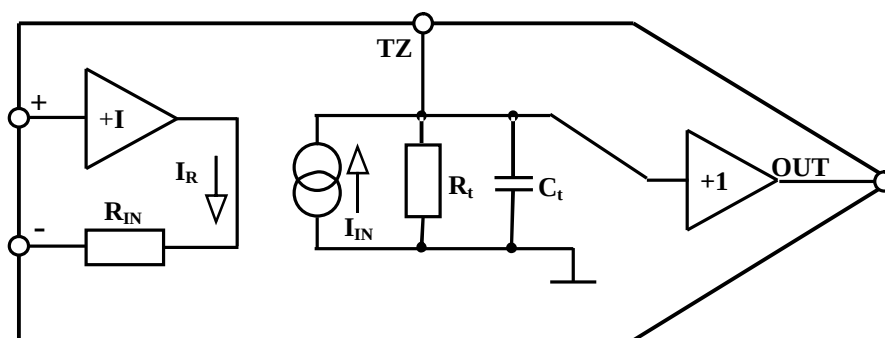
#### Vlastnosti:

- Ø Šířka pásma: 60 MHz (při nastaveném zisku –1)  
33 MHz (při nastaveném zisku –10)
- Ø Rychlost přeběhu: až do 2000V/μs
- Ø Doba ustálení: 100ns do 0,1% (skok 10V)
- Ø Chyba zesílení: 0,03% při 4.4 MHz
- Ø Fázová chyba: 0,15° při 4.4 MHz
- Ø Vysoký výstupní proud: ±50mA v 50Ω zátěži
- Ø Nízké ofsetové (vyrovnávací) napětí: 150μV (B třídy)
- Ø Nízký klidový proud: 6,5mA

**Mezní hodnoty:**

- Ø Napájecí napětí celkové:  $\pm 18\text{V}$
- Ø Ztrátový výkon:  $1,1\text{W}$
- Ø Odolnost proti zkratu na výstupu: neomezená
- Ø Souhlasné vstupní napětí:  $\pm \text{VS}$
- Ø Rozdílové vstupní napětí:  $6\text{V}$
- Ø Invertující vstup proudu: Trvale  $5\text{mA}$   
Přechodně  $10\text{mA}$
- Ø Skladovací teplota (Q):  $-65^\circ\text{C}$  do  $+150^\circ\text{C}$   
(N, R):  $-65^\circ\text{C}$  do  $+125^\circ\text{C}$
- Ø Pájení  $60\text{sec}$ :  $+300^\circ\text{C}$
- Ø Elektrostatické napětí:  $1000\text{V}$

Na **Obr.14** je vidět principiální schéma zesilovače AD844. Nejdůležitějším parametrem zisku je transrezistance  $R_t$ , která je v ideálním případě nekonečná. Napěťové zesílení je dáno poměrem  $R_t/R_{IN}$ . Při typické hodnotě  $R_t=3\text{M}\Omega$  a  $R_{IN}=50\Omega$  je napěťový zisk kolem 60 000.



**Obr.14 :** Využití zesilovače AD844

**Tab.2:** Základní parametry prvku AD844B

|                                  | Podmínky             | AD844B    |      |          | Jednotky                     |
|----------------------------------|----------------------|-----------|------|----------|------------------------------|
|                                  |                      | Min       | Typ  | Max      |                              |
| Vstupní vyrovnávací napětí       |                      |           | 50   | 150      | $\mu\text{V}$                |
| Napájecí napětí                  | 5V - 18V             |           |      |          |                              |
| Vstupní proud                    |                      |           | 150  | 250      | nA                           |
| Vstupní impedance: svorka (-)    |                      |           | 50   | 65       | $\Omega$                     |
| svorka (+)                       |                      | 7         | 10   |          | $\Omega$                     |
| Vstupní kapacita: svorka (-)     |                      |           | 2    |          | pF                           |
| svorka (+)                       |                      |           | 2    |          | pF                           |
| Vstupní napěťový šum             | $f > 1\text{kHz}$    |           | 2    |          | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| Vstupní proudový šum: svorka (-) | $f \geq 1\text{kHz}$ |           | 10   |          | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| svorka (+)                       | $f \geq 1\text{kHz}$ |           | 20   |          | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| Chyba zesílení                   | $f = 4,4\text{MHz}$  |           | 0,03 |          | %                            |
| Fázová chyba                     | $f = 4,4\text{MHz}$  |           | 0,15 |          | °                            |
| Frekvenční odezva: zisk=-1       |                      |           | 60   |          | MHz                          |
| zisk=-10                         |                      |           | 33   |          | MHz                          |
| Výstupní rychlost přeběhu        |                      |           | 2000 |          | $\text{V}/\mu\text{s}$       |
| Výstupní napětí                  | $R_L = 500\Omega$    | 10        | 11   |          | $\pm\text{V}$                |
| Zkratový proud                   |                      |           | 80   |          | mA                           |
| Výstupní impedance               | Otevřená smyčka      |           | 15   |          | $\Omega$                     |
| Provozní rozsah                  |                      | $\pm 4,5$ |      | $\pm 18$ | V                            |
| Klidový proud                    |                      |           | 6,5  |          | mA                           |

### 3.4 Univerzální monolitický prvek OPA660 - údaje z katalogového listu

#### Všeobecný popis:

OPA660 patří mezi univerzální monolitické prvky, navržené pro širokou šířku pásma zahrnující systémy s vysokou výkonností ve videotechnice. Obsahuje širokopásmový, bipolární integrovaný napětím řízený proudový zdroj a jednotkový zesilovač (Buffer).

Napětím řízený zdroj proudu či operační transkonduktanční zesilovač (OTA) může být chápán jako "ideální tranzistor." Má stejně jako tranzistor 3 vývody, vysoko-impedanční vstup B (báze), nízko-impedanční vstup/výstup E (emitor) a proudový výstup C (kolektor). AC vstupy soustředěné okolo nuly vytvoří výstupní proud, který je bipolární a jeho hodnota se pohybuje také okolo nuly.

Transkonduktance OTA může být nastavena vnějším rezistorem, kterým lze nastavit šířku pásma, klidový proud a zesílení. Jednotkový zesilovač (Buffer) umožní OPA660 pracovat se šířkou pásma 850MHz a s rychlostí přeběhu 3000V/ $\mu$ s.

OPA660 se používá jako základní blok na AGC zesilovačích, dále jako ovládací obvody LED pro přenos po optických vláknech, integrátory pro rychlé pulsy, pro rychlé ovládání smyčky zesilovače, ovládací zesilovače pro kapacitní senzory a aktivní filtry. Vyrábějí se v 8 vývodovém provedení.

#### **Příklady použití AD844:**

- Ø Bázová linka pro obnovovací obvody
- Ø Video/vysílací vybavení
- Ø Telekomunikační zařízení
- Ø Vysoko-rychlostní získávání dat
- Ø Širokopásmové LED ovladače
- Ø Pulzní integrátory
- Ø Zesilovače pro řízení smyčky
- Ø 400MHz rozdílový vstupní zesilovač

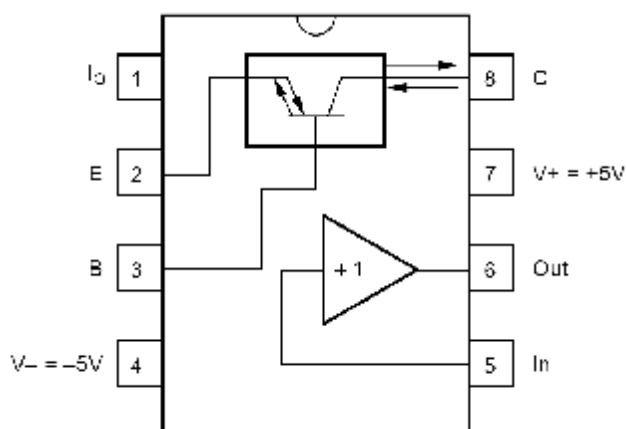
#### **Vlastnosti:**

- Ø Šířka pásma: 850MHz
- Ø Vysoká rychlost přeběhu: až do 3000V/ $\mu$ s
- Ø Chyba zesílení: 0,06%
- Ø Fázová chyba: 0,02°
- Ø Ovládání externím proudem  $I_Q$

#### **Mezní hodnoty:**

- Ø Napájecí napětí celkové:  $\pm 6V$
- Ø Vstupní napětí:  $\pm V_S \pm 0,7V$
- Ø Provozní teplota: -40°C až +85°C
- Ø Skladovací teplota: -40°C do +125 °C
- Ø Plošná teplota: +175°C
- Ø Pájení 10sec: +300°C

OPA660 pracuje od  $\pm 5V$  napájecí napětí ( $\pm 6V$  maximum). Vlivem většího napájecího napětí může dojít k trvalému poškození.



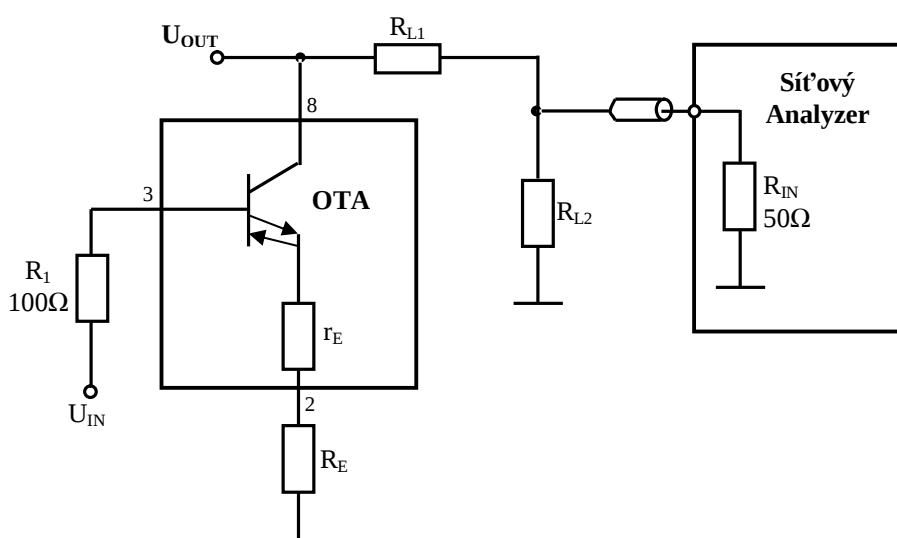
**Obr.15 :** Rozložení vývodů prvku OPA660

Vývod označený 1 jak je vidět na **Obr.15**, slouží pro zajištění řídicího proudu  $I_Q$  přes odpor  $R_Q$ , který umístěn z vývodu 1 do vývodu 4 označený jako  $V_-$ .

Řídicí proud  $I_Q$  ovlivňuje klidové proudy bufferu a OTA sekce. Doporučená hodnota odporu  $R_Q$  je rovna  $250\Omega$ . Spojením s napětím  $-5V$  vznikne hodnota  $I_Q$  rovna  $20mA$  (při pokojové teplotě  $25^\circ C$ ). Výrobce označuje tento proud jako klidový a udává rozmezí jeho hodnot  $16mA$  až  $20mA$ .

#### Ukázka nastavení zisku:

Transconductance může být nastavena například podle **Obr.16**:



**Obr.16:** Nastavení zisku prvku OPA660

Vnitřní odpor  $R_L$  je dán vztahem (3.1), odpor emitoru (3.2), celkový zisk  $A_U$  pro přenos napětí (3.3) - vztahy vyplývající z **Obr.16**:

$$R_L = R_{L1} + \frac{R_{L2} \cdot R_{IN}}{R_{L2} + R_{IN}} \quad (3.1)$$

$$r_E = \frac{1}{g_m} \quad (3.2)$$

$$A_U = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{R_L}{R_E + r_E} = \frac{R_L}{R_E + \frac{1}{g_m}} \quad (3.3)$$

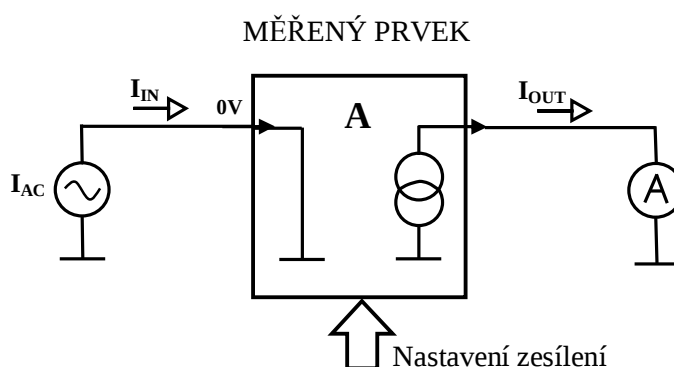
**Tab.3:** Základní parametry prvku OPA660

|                               | Podmínky             | OPA660AP,AU |                     |           | Jednotky                       |
|-------------------------------|----------------------|-------------|---------------------|-----------|--------------------------------|
|                               |                      | Min         | Typ                 | Max       |                                |
| <b>Transkonduktance</b>       | $U_C = 0V$           | 75          | 125                 | 200       | <b>mA/V</b>                    |
| <b>Napájecí napětí</b>        |                      | $\pm 4,5$   | $\pm 5$             | $\pm 5,5$ | <b>V</b>                       |
| <b>Vstupní klidový proud</b>  |                      |             | $\pm 3$ až $\pm 26$ |           | <b>mA</b>                      |
| <b>Vstupní napětí</b>         | $U_B = 0V$           |             | 10                  | $\pm 30$  | <b>mV</b>                      |
| <b>Vstupní bázeový proud</b>  |                      |             | -2,1                | $\pm 5$   | <b><math>\mu A</math></b>      |
| <b>Výstupní klidový proud</b> | $U_B = 0V, U_C = 0V$ |             | 10                  | $\pm 20$  | <b><math>\mu A</math></b>      |
| <b>Výstupní proud OTA</b>     |                      | $\pm 10$    | $\pm 15$            |           | <b>mA</b>                      |
| <b>Výstupní napětí OTA</b>    | $I_C = \pm 1mA$      | $\pm 4$     | $\pm 4,7$           |           | <b>V</b>                       |
| <b>Výstupní impedance OTA</b> |                      |             | 25k/4,2             |           | <b><math>\Omega</math> /pF</b> |
| <b>Zesílení</b>               | $f = 1kHz$           |             | 70                  |           | <b>dB</b>                      |

## 4 METODY PRO URČENÍ NĚKTERÝCH PARAMETRŮ AKTIVNÍCH PRVKŮ

### 4.1 Určení frekvenční charakteristiky proudového přenosu

Ideální případ nám popisuje **Obr.17**, kde na vstup měřené součástky přivedeme generátor proudu  $I_{AC}$  a na výstupu daného obvodu měříme proud příslušným střídavým ampérmetrem.



**Obr.17:** Ideální případ při měření frekvenční charakteristiky proudového přenosu

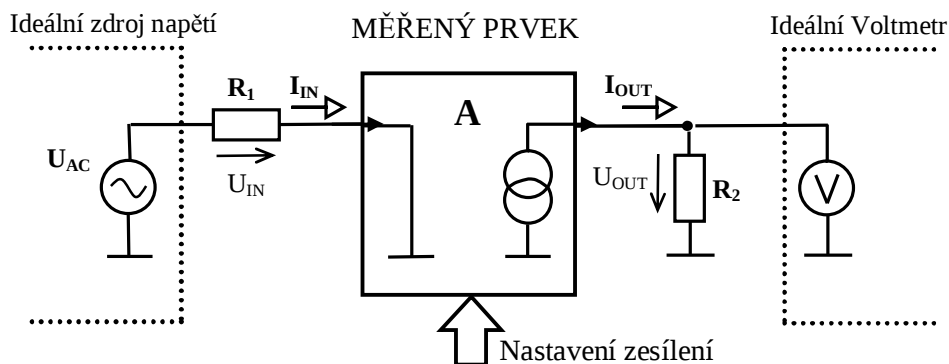
Ve skutečnosti ale dochází k problému, jak zajistit na vstupu proudy z generátoru o vysokých kmitočtech až 1GHz. Běžné proudové generátory vytváří proudy se síťovým kmitočtem 50Hz. Další problém nastává při měření proudu o vysokých kmitočtech na výstupních svorkách měřeného obvodu. Takového širokopásmové ampérmetry se nevyrábí.

Blokové schéma na **Obr.18** popisuje situaci, při které bychom se již zmíněným problémům vyhnuli.



**Obr.18:** Blokové schéma s generátorem napětí a převodníky

Jednou z možností jak určit frekvenční charakteristiky proudového přenosu je měření pomocí tzv. obvodového analyzátoru (AGILENT 4395A). Tento přístroj umožňuje mimo jiné měřit poměr dvou napětí. V našem případě nás bude zajímat poměr  $U_{OUT}/U_{IN}$ .



**Obr.19:** Měření pomocí ideálního zdroje napětí a voltmetru

**Legenda k Obr.19:**

$R_1$  ..... odpor sloužící jako převodník U/I (napětí na proud)

$R_2$  ..... odpor sloužící jako převodník I/U (proud na napětí)

Z Ohmova zákona pro vstupní napětí  $U_{IN}$  a výstupní napětí  $U_{OUT}$  platí:

$$U_{IN} = R_1 \cdot I_{IN} \quad (4.1)$$

$$U_{OUT} = R_2 \cdot I_{OUT} \quad (4.2)$$

Poměr výstupního napětí ke vstupnímu napětí je pak:

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{R_2 \cdot I_{OUT}}{R_1 \cdot I_{IN}} \quad (4.3)$$

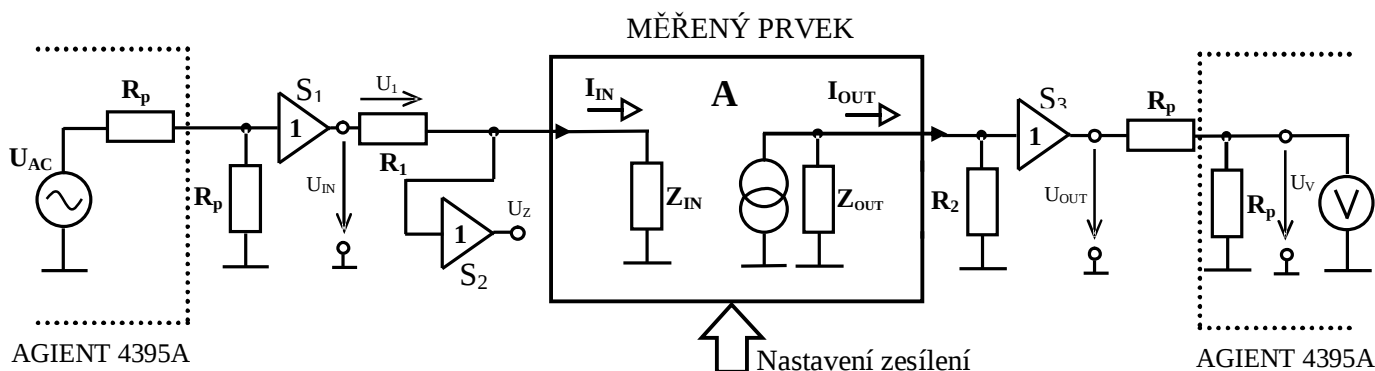
Proudový poměr  $I_{OUT}/I_{IN}$  získáme odvozením z poměru napětí  $U_{OUT}/U_{IN}$ :

$$\frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{R_1 \cdot U_{OUT}}{R_2 \cdot U_{IN}} \quad (4.4)$$

Na **Obr.17** a **Obr.19** je vždy považován ideální stav měřeného prvku. Ve skutečnosti uvažujeme:

- Ø se vstupní impedancí  $Z_{IN}$  a výstupní impedancí  $Z_{OUT}$  měřeného prvku
- Ø s vnitřní impedancí zdroje a zátěže měřícího zařízení ( $R_p = 50\Omega$ )
- Ø s přizpůsobením vedení ( $R_p = 50\Omega$ )

Zapojení s výše uvedenými úvahami je znázorněno na **Obr.20**, kde je zkoumaný prvek měřen pomocí obvodového analyzátoru (AGILENT 4395A).



**Obr.20:** Skutečný případ při měření frekvenční charakteristiky proudového přenosu pomocí spektrálního analyzátoru AGIENT 4395A

**Legenda k Obr.20:**

$R_1$  ..... odpor sloužící jako převodník U/I (napětí na proud)

$R_2$  ..... odpor sloužící jako převodník I/U (proud na napětí)

$S_{1-3}$  ..... buffery (napěťové sledovače) - pro posílení napětí (impedanční oddělení)

$R_p$  ..... odpory o hodnotě  $50\Omega$  - pro přizpůsobení celkového vedení

$Z_{IN}$  ..... vstupní impedance měřeného prvku

$Z_{OUT}$  ..... výstupní impedance měřeného prvku

Veškeré následující vzorce jsou sestavovány tak, aby obsahovaly poměry napětí  $U_{IN}$ ,  $U_Z$ ,  $U_{OUT}$ , protože jsou výhodně měřitelné pomocí obvodového analyzátoru.

**Výpočty pro vstupní část vyplývající z Obr.20:**

**Stanovení vstupního proudu  $I_{IN}$ :**

$$-U_{IN} + R_1 I_{IN} + Z_{IN} I_{IN} = 0$$

$$U_{IN} = R_1 I_{IN} + Z_{IN} I_{IN}$$

$$I_{IN} = \frac{U_{IN}}{R_1 + Z_{IN}} \quad (4.5)$$

**Určení vstupní impedance  $Z_{IN}$ :**

$$U_Z = \frac{Z_{IN}}{R_1 + Z_{IN}} \cdot U_{IN}$$

$$\frac{U_Z}{U_{IN}} = \frac{Z_{IN}}{R_1 + Z_{IN}}$$

$$\left( \frac{U_{IN}}{U_Z} - 1 \right) = \frac{R_1}{Z_{IN}}$$

$$Z_{IN} = R_1 \cdot \frac{1}{\left( \frac{U_{IN}}{U_Z} - 1 \right)} \quad (4.6)$$

**Výpočty pro výstupní část vyplývající z Obr.20:**

**Stanovení výstupního proudu  $I_{OUT}$ :**

Předpoklad pro výpočty:  $Z_{OUT} \rightarrow \infty$

$$U_V = \frac{R_p}{R_p + R_p} \cdot U_{OUT}$$

$$\frac{U_{OUT}}{U_V} = \frac{2R_p}{R_p} \Rightarrow U_{OUT} = 2U_V$$

$$I_{OUT} = \frac{U_{OUT}}{R_2} = \frac{2U_V}{R_2} \quad (4.7)$$

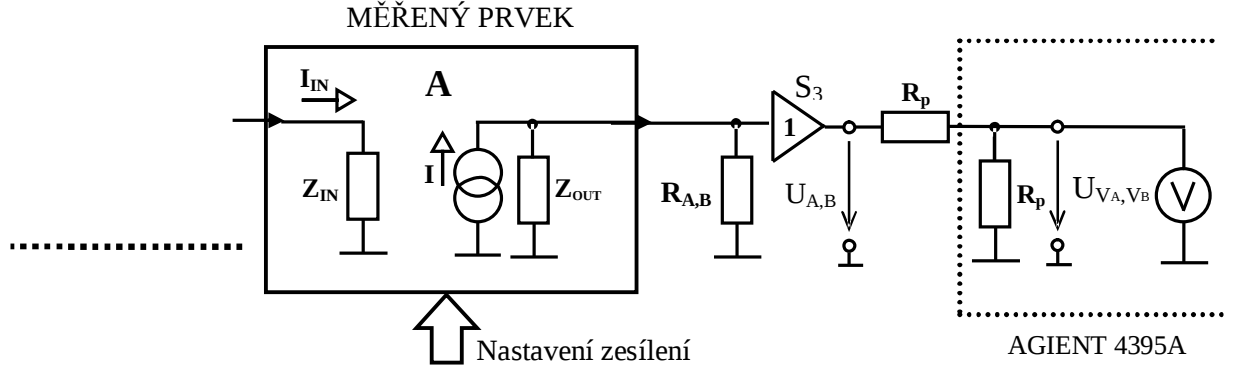
Proudový přenos (za předpokladu  $Z_{OUT} \rightarrow \infty$ ) potom získáme poměrem proudů  $I_{OUT}/I_{IN}$  dosazením z rovnic (4.5), (4.6), (4.7):

$$\frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{\frac{U_{OUT}}{R_2}}{\frac{U_{IN}}{R_1 + Z_{IN}}} = \left( \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right) \cdot \frac{R_1 + \frac{R_1}{\left( \frac{U_{IN}}{U_Z} - 1 \right)}}{R_2} = \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \cdot \left( \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{1}{\left( \frac{U_{IN}}{U_Z} - 1 \right)} \right) \quad (4.8)$$

Pro ověření vztahu (4.8) bylo provedeno několik simulací reálných prvků (MAX435, OPA660, AD844) pomocí programu PSpice. Výsledky simulací vlivem předpokladu  $Z_{OUT} \rightarrow \infty$  nebyly dostatečně přesné.

Jiná situace nastane při uvažování s výstupní impedancí  $Z_{OUT}$ . Výpočty pro vstupní část vyplývající z **Obr.20** zůstávají beze změny. Výstupní část pro měření je změněna na **Obr.21**. Výstup měřeného prvku zatížíme dvěma různými odpory

$R_A$  a  $R_B$  se známou hodnotou (viz kapitola 4.3) pro určení výstupní impedance  $Z_{OUT}$ , vstup je buzen stále stejným proudem.



**Obr.21:** Skutečný případ při měření frekvenční charakteristiky proudového přenosu s uvažováním  $Z_{OUT}$

Pro lepší matematické úpravy si přepočítáme odpory  $R_A$ ,  $R_B$  na vodivosti  $G_A$ ,  $G_B$  a výstupní impedance  $Z_{OUT}$  na admitanci  $Y_{OUT}$  (viz kapitola 4.3). Pak lze psát:

$$I = U_A \cdot (Y_{OUT} + G_A) = U_B \cdot (Y_{OUT} + G_B) \quad (4.9)$$

Po dosazení vztahu (4.20) do (4.9) získáme:

$$I = U_A \cdot \left( \frac{G_B - G_A \frac{U_A}{U_B} + G_A}{\frac{U_A}{U_B} - 1} \right) = U_B \cdot \left( \frac{G_B - G_A \frac{U_A}{U_B} + G_B}{\frac{U_A}{U_B} - 1} \right) \quad (4.10)$$

Proudový poměr  $I/I_{IN}$  získáme dosazením vztahů (4.10), (4.5):

$$\frac{I}{I_{IN}} = \frac{U_A \cdot \left( \frac{G_B - G_A \frac{U_A}{U_B} + G_A}{\frac{U_A}{U_B} - 1} \right)}{\frac{U_{IN}}{R_1 + Z_{IN}}} \quad (4.11)$$

Dosadíme  $Z_{IN}$  ze vztahu (4.6) do (4.11) a po úpravách dostáváme výsledný proudový přenos (4.12):

$$\frac{I}{I_{IN}} = \frac{U_A \cdot \left( \frac{G_B - G_A \frac{U_A}{U_B} + G_A}{\frac{U_A}{U_B} - 1} \right)}{R_1 + R_1 \cdot \frac{1}{\left( \frac{U_{IN}}{U_Z} - 1 \right)}} = \left( \frac{U_A}{U_{IN}} \right) \left( \frac{G_B - G_A \frac{U_A}{U_B} + G_A}{\frac{U_A}{U_B} - 1} \right) \left( R_1 + R_1 \cdot \frac{1}{\left( \frac{U_{IN}}{U_Z} - 1 \right)} \right) \quad (4.12)$$

Tento vztah lze napsat i pomocí napětí  $U_{VA}$  a  $U_{VB}$ , když víme, že napětí  $U_A = 2 \cdot U_{VA}$ ,  $U_B = 2 \cdot U_{VB}$ . Potom lze psát (4.13):

$$\frac{I}{I_{IN}} = \left( \frac{2 \cdot U_{VA}}{U_{IN}} \right) \left( \frac{G_B - G_A \frac{U_{VA}}{U_{VB}} + G_A}{\frac{U_{VA}}{U_{VB}} - 1} \right) \left( R_1 + R_1 \cdot \frac{1}{\left( \frac{U_{IN}}{U_Z} - 1 \right)} \right) \quad (4.13)$$

Proudový přenos v decibelech je pak:

$$\frac{I_{[dB]}}{I_{IN[dB]}} = 20 \cdot \log \left( \frac{I}{I_{IN}} \right) \quad (4.14)$$

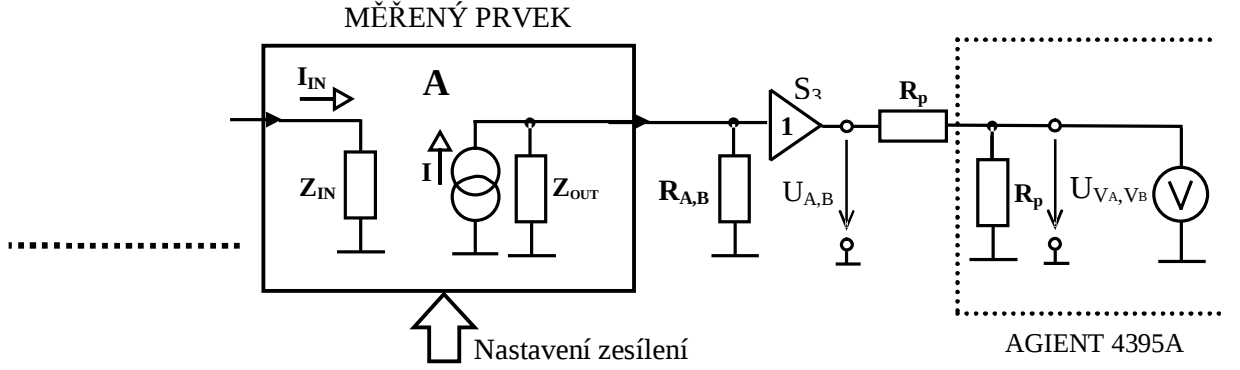
## 4.2 Určení vstupní impedance $Z_{IN}$ :

Rovnice (4.6) určuje výpočet vstupní impedance  $Z_{IN}$ , která vyplývá z **Obr.20**:

$$Z_{IN} = R_1 \cdot \frac{1}{\left( \frac{U_{IN}}{U_Z} - 1 \right)} \quad (4.6)$$

## 4.3 Určení výstupní impedance $Z_{OUT}$ :

Výstupní impedanci určíme tak, že výstup měřeného obvodu zatížíme dvěma různými odpory  $R_A$  a  $R_B$  se známou hodnotou viz **Obr.22**.

**Obr.22:** Měření výstupní impedance  $Z_{OUT}$ 

Přepočet odporů  $R_A$ ,  $R_B$  na vodivosti  $G_A$ ,  $G_B$  (4.15), (4.16) :

$$G_A = \frac{1}{R_A} \quad (4.15)$$

$$G_B = \frac{1}{R_B} \quad (4.16)$$

Přepočet výstupní impedance  $Z_{OUT}$  na admitanci  $Y_{OUT}$  (4.17):

$$Y_{OUT} = \frac{1}{Z_{OUT}} \quad (4.17)$$

Výpočet výstupního napětí  $U_A$  a  $U_B$  určují vztahy (4.18), (4.19):

$$U_A = I \left( \frac{1}{G_A + Y_{OUT}} \right) \quad (4.18)$$

$$U_B = I \left( \frac{1}{G_B + Y_{OUT}} \right) \quad (4.19)$$

Z poměrů napětí  $U_A/U_B$  lze vyjádřit výstupní admitanci (4.20):

$$\begin{aligned} \frac{U_A}{U_B} &= \frac{I \cdot \frac{1}{G_A + Y_{OUT}}}{I \cdot \frac{1}{G_B + Y_{OUT}}} = \frac{G_B + Y_{OUT}}{G_A + Y_{OUT}} \Rightarrow \\ \Rightarrow Y_{OUT} &= \frac{U_B G_B - U_A G_A}{U_A - U_B} = \frac{G_B - G_A \frac{U_A}{U_B}}{\frac{U_A}{U_B} - 1} = \frac{G_B - G_A \frac{U_{VA}}{U_{VB}}}{\frac{U_{VA}}{U_{VB}} - 1} \quad (4.20) \end{aligned}$$

Určení výstupní impedance  $Z_{OUT}$  získáme pomocí vztahů (4.20) a (4.17):

$$Z_{OUT} = \frac{1}{Y_{OUT}} = \frac{\frac{U_A}{U_B} - 1}{G_B - G_A \frac{U_A}{U_B}} = \frac{\frac{U_{VA}}{U_{VB}} - 1}{G_B - G_A \frac{U_{VA}}{U_{VB}}} \quad (4.21)$$

## 5 SEZNÁMENÍ S INTEGROVANÝM OBVODEM COAK:

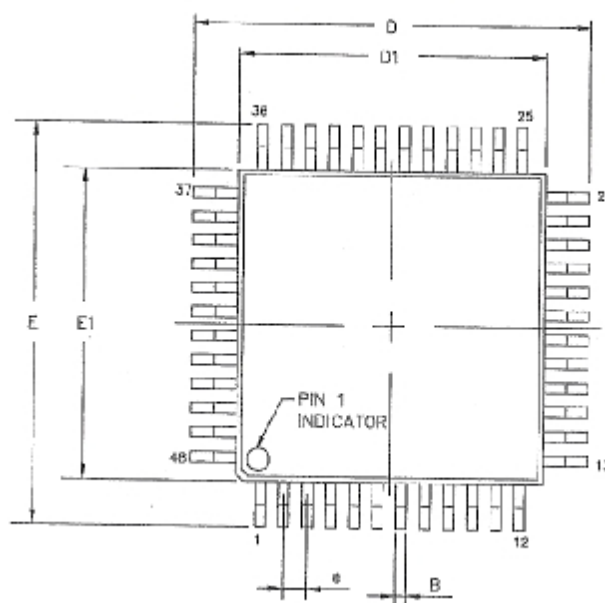
Součástka COAK od firmy AMI SEMICONDUCTOR, Inc., patří mezi integrované obvody. Jak už je popsáno výše, jedná se o aktivní součástku, která obsahuje čtyři zdroje proudu řízené proudem (CCCS) s digitálně nastavitelným zesílením – schematická značka jednoho takového zdroje řízeného proudem je na **Obr.24**. Každý z těchto čtyř CCCS má 12 vývodů – celkem tedy  $4 \times 12 = 48$  vývodů viz **Obr. 23 a,b,c,d**, na kterých jsou zakótovány rozměry, které jsou pak dále definovány v **Tab.4**. V této tabulce jsou uvedeny nominální (typické) hodnoty, které výrobce ovšem nezaručuje a hodnoty minimální a maximální (v tomto rozmezí jsou hodnoty zaručeny).

Rozložení vývodů je zřejmé z tabulky **Tab.5** a **Obr.23a**, na kterých jsou popsány, co které vývody znamenají. Jak už bylo zmíněno, jedná se o aktivní prvek s digitálně nastavitelným zesílením. Jednotlivé digitálně nastavovací vstupy jsou označeny CTRL0 až CTRL3 (v **Tab.6** jsou uvedeny tyto vstupy jako D<sub>0</sub>-D<sub>3</sub>).

Díky těmto čtyřem vstupům můžeme u každého ze čtyř CCCS nastavit až 16 různých kombinací zesílení, které jsou uvedeny v tabulce **Tab.6**. Lze tak dosáhnout zesílení od 9,54 dB až do hodnoty 39,37 dB.

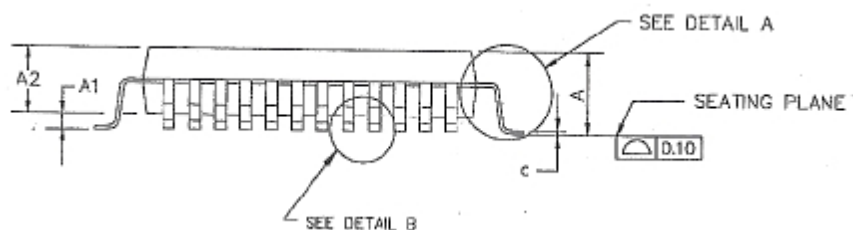
### 5.1 Konstrukční parametry obvodu COAK

Půdorys:



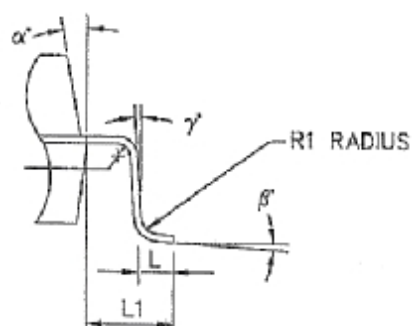
**Obr.23:** a) COAK – pohled shora

Bokorys:



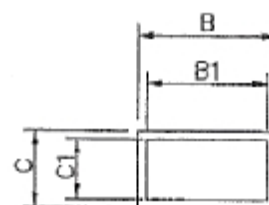
**Obr.23:** b) COAK – pohled z boku

Detail A:



c)

Detail B:



d)

**Obr.23:** c) COAK – Detail A  
d) COAK – Detail B

**Tab.4:** COAK - Jednotlivé rozměry

| SYMBOL     | MIN.     | TYP. | MAX. |
|------------|----------|------|------|
| A          | -        | -    | 1.60 |
| A1         | 0.05     | -    | 0.15 |
| A2         | 1.35     | 1.40 | 1.45 |
| B          | 0.17     | 0.22 | 0.27 |
| B1         | 0.17     | 0.20 | 0.23 |
| C          | 0.09     | -    | 0.20 |
| C1         | 0.09     | -    | 0.16 |
| D          | 9.00 BSC |      |      |
| D1         | 7.00 BSC |      |      |
| E          | 9.00 BSC |      |      |
| E1         | 7.00 BSC |      |      |
| e          | 0.50 BSC |      |      |
| L          | 0.45     | 0.60 | 0.75 |
| L1         | 1.00     |      |      |
| R1         | 0.08     | -    | 0.20 |
| $\alpha^*$ | 11       | -    | 13   |
| $\beta^*$  | 0        | -    | 7    |
| $\gamma^*$ | 0        | -    | -    |

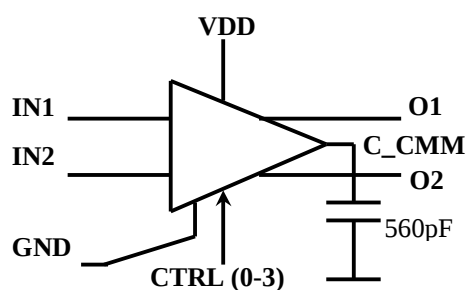
**Tab.5:** COAK - Rozložení vývodů

|              | A  | B  | C  | D  |
|--------------|----|----|----|----|
| <b>GND</b>   | 1  | 13 | 25 | 37 |
| <b>IN1</b>   | 2  | 14 | 26 | 38 |
| <b>IN2</b>   | 3  | 15 | 27 | 39 |
| <b>CCMM</b>  | 4  | 16 | 28 | 40 |
| <b>CTRL3</b> | 5  | 17 | 29 | 41 |
| <b>CTRL2</b> | 6  | 18 | 30 | 42 |
| <b>VDD</b>   | 7  | 19 | 31 | 43 |
| <b>CTRL1</b> | 8  | 20 | 32 | 44 |
| <b>CTRL0</b> | 9  | 21 | 33 | 45 |
| <b>O1</b>    | 10 | 22 | 34 | 46 |
| <b>O2</b>    | 11 | 23 | 35 | 47 |
| <b>GND</b>   | 12 | 24 | 36 | 48 |

## 5.2 Nastavení digitálního zesílení

*Popis jednotlivých vývodů prvku COAK:*

- GND** - zem
- IN1** - vstup 1
- IN2** - vstup 2
- CCMM** - připojení kompenzační kapacity
- CTRL (0-3)** - čtyři vstupy pro nastavení digitálního zesílení
- VDD** - vstup pro kladné napájecí napětí
- O1** - výstup 1
- O2** - výstup 2

**Obr.24:** COAK - Schematická značka jednoho ze čtyř CCCS

**Tab.6:** COAK-Zesílení dle nastavení jednotlivých digitálních vstupů CTRL (0-3)

| <b>i</b>  | <b>D<sub>3</sub></b> | <b>D<sub>2</sub></b> | <b>D<sub>1</sub></b> | <b>D<sub>0</sub></b> | <b>A<sub>i</sub> [-]</b> | <b>A<sub>i</sub> [dB]</b> |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|
| <b>0</b>  | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 3                        | 9,54                      |
| <b>1</b>  | 0                    | 0                    | 0                    | 1                    | 9                        | 19,08                     |
| <b>2</b>  | 0                    | 0                    | 1                    | 0                    | 15                       | 23,52                     |
| <b>3</b>  | 0                    | 0                    | 1                    | 1                    | 21                       | 26,44                     |
| <b>4</b>  | 0                    | 1                    | 0                    | 0                    | 27                       | 28,63                     |
| <b>5</b>  | 0                    | 1                    | 0                    | 1                    | 33                       | 30,37                     |
| <b>6</b>  | 0                    | 1                    | 1                    | 0                    | 39                       | 31,82                     |
| <b>7</b>  | 0                    | 1                    | 1                    | 1                    | 45                       | 33,06                     |
| <b>8</b>  | 1                    | 0                    | 0                    | 0                    | 51                       | 34,15                     |
| <b>9</b>  | 1                    | 0                    | 0                    | 1                    | 57                       | 35,12                     |
| <b>10</b> | 1                    | 0                    | 1                    | 0                    | 63                       | 35,99                     |
| <b>11</b> | 1                    | 0                    | 1                    | 1                    | 69                       | 36,78                     |
| <b>12</b> | 1                    | 1                    | 0                    | 0                    | 75                       | 37,50                     |
| <b>13</b> | 1                    | 1                    | 0                    | 1                    | 81                       | 38,17                     |
| <b>14</b> | 1                    | 1                    | 1                    | 0                    | 87                       | 38,79                     |
| <b>15</b> | 1                    | 1                    | 1                    | 1                    | 93                       | 39,37                     |

**i** -určuje binární kombinaci nastavovacích vstupů D<sub>0</sub>-D<sub>3</sub> v dekadické podobě

**D0 - D3** - nastavovací vstupy pro jednotlivá zesílení (max. 16 kombinací)

**A<sub>i</sub> [-]** - zesílení

**A<sub>i</sub> [dB]** - zesílení v dB

**Příklad výpočtu pro 1 řádek:**

$$A_i = 24 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 10^{-3} D_3 + 1 \cdot 10^{-3} D_2 + 0,5 \cdot 10^{-3} D_1 + 0,25 \cdot 10^{-3} D_0 + 0,125 \cdot 10^{-3}) =$$

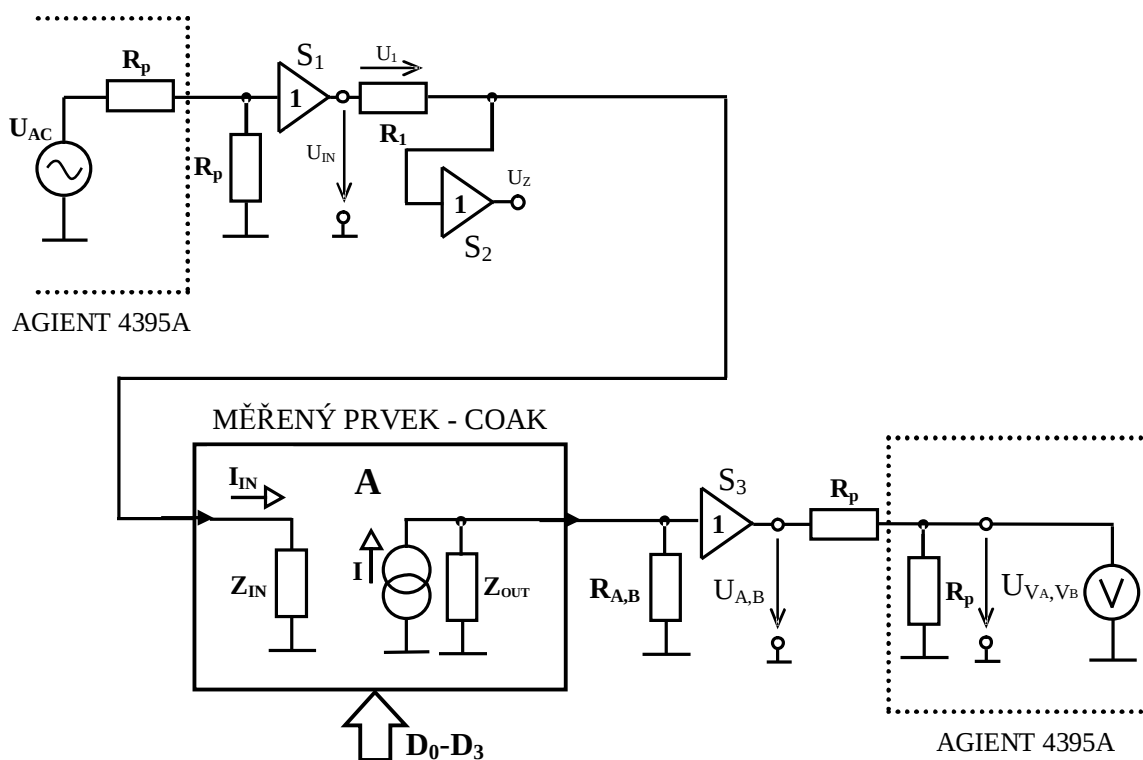
$$= 24 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 10^{-3} \cdot 0 + 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0 + 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0 + 0,125 \cdot 10^{-3}) = 3[-]$$

$$A_{i[dB]} = 20 \cdot \log(A_i) = 20 \cdot \log(3) = \underline{9,54dB}$$

### 5.3 COAK - Určení frekvenční charakteristiky proudového přenosu, vstupní a výstupní impedance

Určení frekvenční charakteristiky proudového přenosu bychom měřili pomocí tzv. obvodového analyzátoru (AGILENT 4395A). Změřili bychom poměr napětí na výstupu ke vstupu ( $U_{OUT}/U_{IN}$ ).

Jelikož prvek COAK patří do skupiny CCCS (zdroj proudu řízený proudem) a zajímá nás proudový přenos, provedeme přepočít poměru napětí  $U_{OUT}/U_{IN}$  na proudový poměr  $I/I_{IN}$ . Tuto část popisuje kapitola 4.



**Obr.25:** COAK- Měření frekvenční charakteristiky proudového přenosu

Stejně tak vztah (4.6) pro vstupní impedanci  $Z_{IN}$  a vztah (4.21) pro výstupní impedanci  $Z_{OUT}$  v kapitole 4. Měření těchto parametrů je uvedeno na **Obr.25**.

Vyrobený COAK, který byl předložen škole k měření, byl nefunkční, a proto se metody pro zjištění některých parametrů aktivních prvků budou měřit na integrovaných obvodech obsahující CCCS (zdroje proudu řízené proudem), popsány v kapitolách 3.2 - 3.4 – MAX435, AD844, OPA660. Nejprve byla metoda ověřena simulacemi v programu PSpice (viz následující kapitola 6).

## 6 SIMULACE NĚKTERÝCH PARAMETRŮ U VYBRANÝCH AKTIVNÍCH PRVKŮ

Simulace byly prováděny z balíčků ORCAD Family Release 9.2 – konkrétně pomocí programu PSpice. Ověřovaly se tyto parametry aktivních prvků:

- Ø Proudový přenos  $(I/I_{IN})_{dB}$ 
  - výsledkem byly frekvenční charakteristiky proudového přenosu (amplitudová a fázová charakteristika)
- Ø Vstupní impedance zdroje  $Z_{IN}$ 
  - výsledkem je grafická závislost vstupní impedance ( $Z_{IN}$ ) v závislosti na kmitočtu ( $f$ ) a její fázová charakteristika
- Ø Výstupní impedance zdroje  $Z_{OUT}$ 
  - výsledkem je grafická závislost výstupní impedance ( $Z_{OUT}$ ) v závislosti na kmitočtu ( $f$ ) a její fázová charakteristika

Veškeré úvahy a výpočty při simulacích vycházely z kapitoly 4.

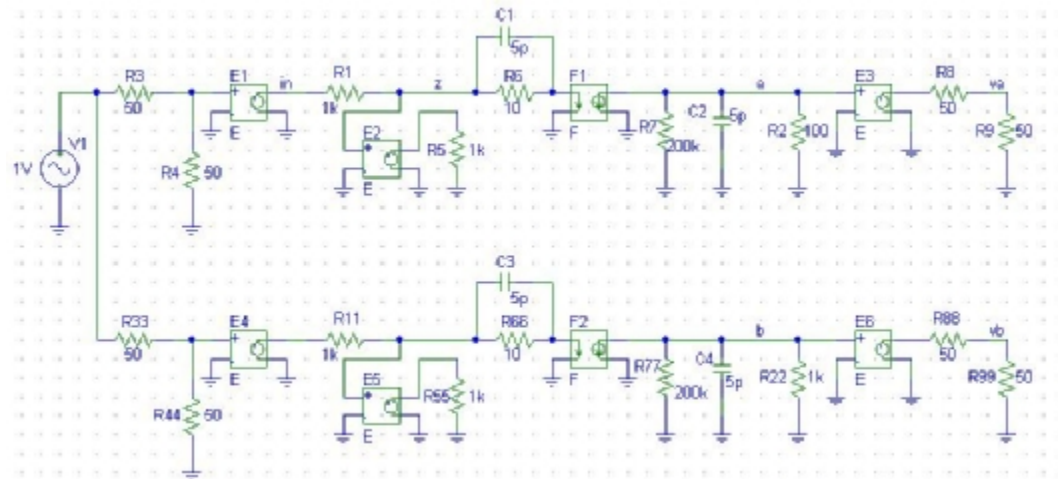
Pro ověření těchto úvah a výpočtů bylo nejdříve uskutečněno měření na CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi, následně byly podrobeny měřením tyto aktivní prvky: MAX435, AD844 a OPA660. Výsledky měření těchto aktivních prvků jsou zhodnoceny v kapitolách 6.1 - 6.4.

### 6.1 CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi – Simulace měřící metody

Měření bylo provedeno pro ověření úvah a výpočtů z kapitoly 4.

Programu PSpice obsahuje prvek označený jako F, který simuluje ideální proudový zdroj ( $Z_{IN} \rightarrow 0$ ,  $Z_{OUT} \rightarrow \infty$ ). Jak je vidět na **Obr.26** je na vstup přivedena paralelní kombinace rezistoru R6 (10Ω) s kapacitorem C1 (5pF) charakterizující vstupní impedanci  $Z_{IN}$ . Podobně i na výstupu prvku F je paralelní kombinace rezistoru R7 (200k) a kapacitoru C2 (5pF) určující výstupní impedanci  $Z_{OUT}$ . Odpory R2 a R22 s hodnotami  $R2=100\Omega$ ,  $R22=1k\Omega$  nám reprezentují odpory  $R_A$  a  $R_B$ , pomocí nichž měříme výstupní impedanci prvku. Abychom

metodu popsanou v kapitole 4 mohli simulovat najednou, je zde metoda 2x, v jedné větvi se nachází odpor R2 (resp.  $R_A$ ) a v druhé paralelní větvi odpor R22 (resp.  $R_B$ ). Ostatní části sloužící jako měřící metoda jsou popsány v kapitole 4. Podobně bude i u všech následujících simulací metoda vždy ve dvou větvích.



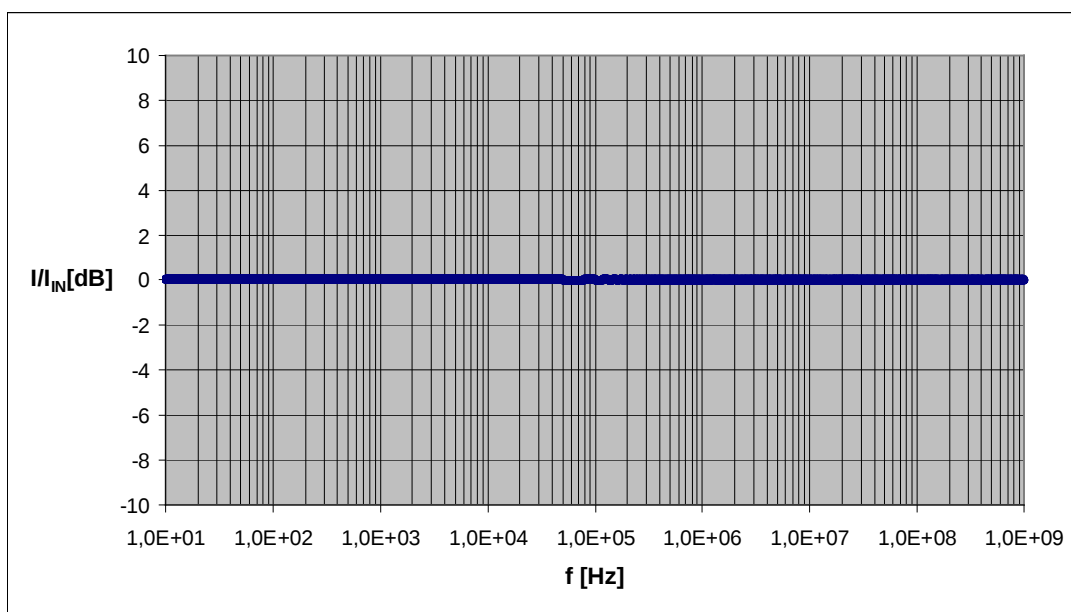
**Obr.26:** Simulační měření v programu PSpice – CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi

### 6.1.1 CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi – Měření proudového přenosu ( $I/I_{IN}$ )

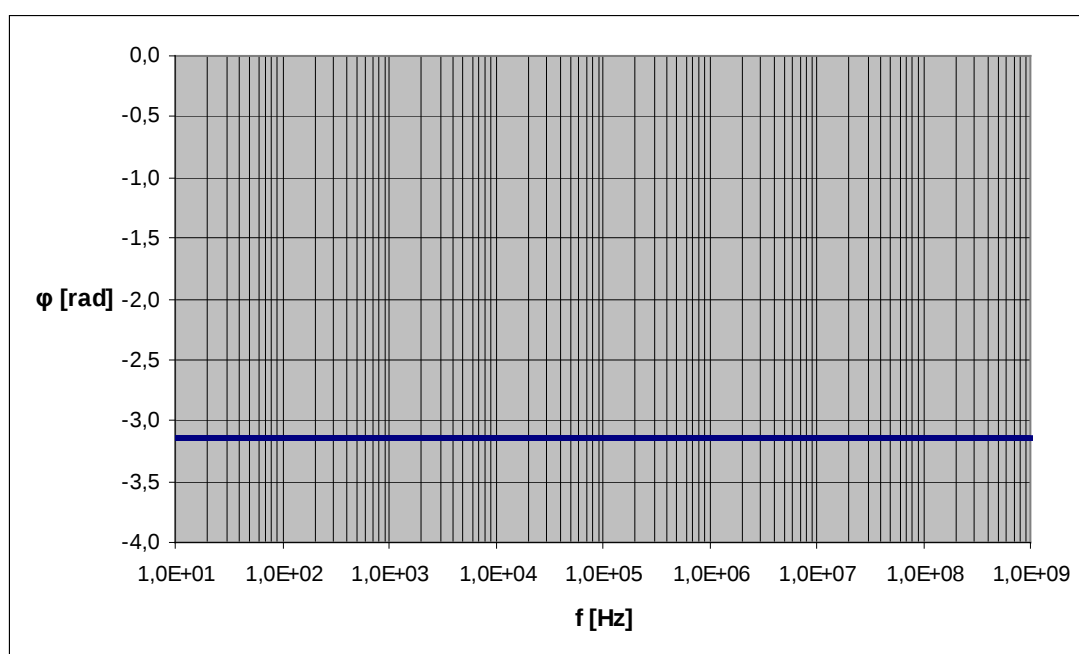
Při měření proudového přenosu bylo vycházeno z výsledného vztahu (4.12) respektive (4.14) z kapitoly 4. Tento vztah byl při dokončení AC Analýzy spočítán v samotném programu PSpice A/D. Výsledná grafická závislost je zobrazena na **Obr.27**.

Jak je patrné z **Obr.27** jedná se o ideální stav, kdy nedochází k žádnému útlumu až do frekvence 1GHz. Stejně tak i fázová charakteristika proudového přenosu je ideální. Fáze je konstantní pro všechny frekvence s hodnotou  $(-\pi)$ , jak popisuje **Obr.28**. To znamená, že při vstupním proudu směrem do CCCS, teče výstupní proud zase dovnitř CCCS.

Při návrhu této měřící metody bylo uvažováno, že výstupní proud označený ve schématu jako (I) teče přes odpory  $R_A$  resp.  $R_B$  směrem ven z měřeného obvodu. Touto simulací jsme se však přesvědčili podle fázového posunu, který má hodnotu  $(-\pi)$ , že proud má opačnou polaritu a teče směrem dovnitř měřeného obvodu. Takto budou určovány vzájemné směry proudů i u dalších měřených prvků.



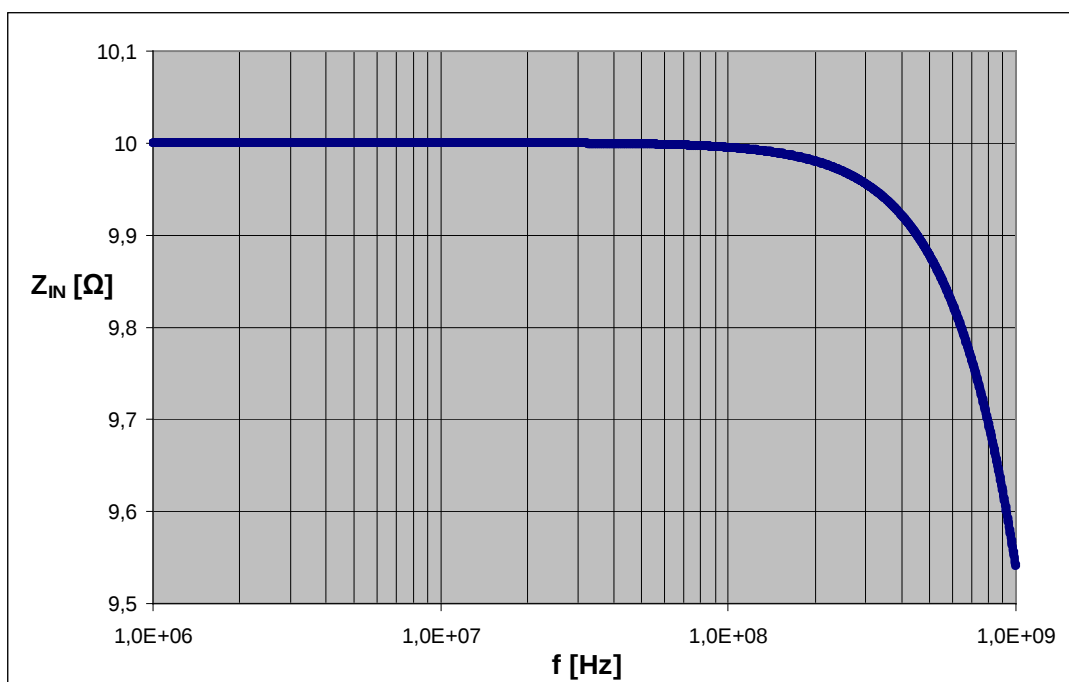
**Obr.27:** Amplitudová charakteristika proudového přenosu  
– CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi



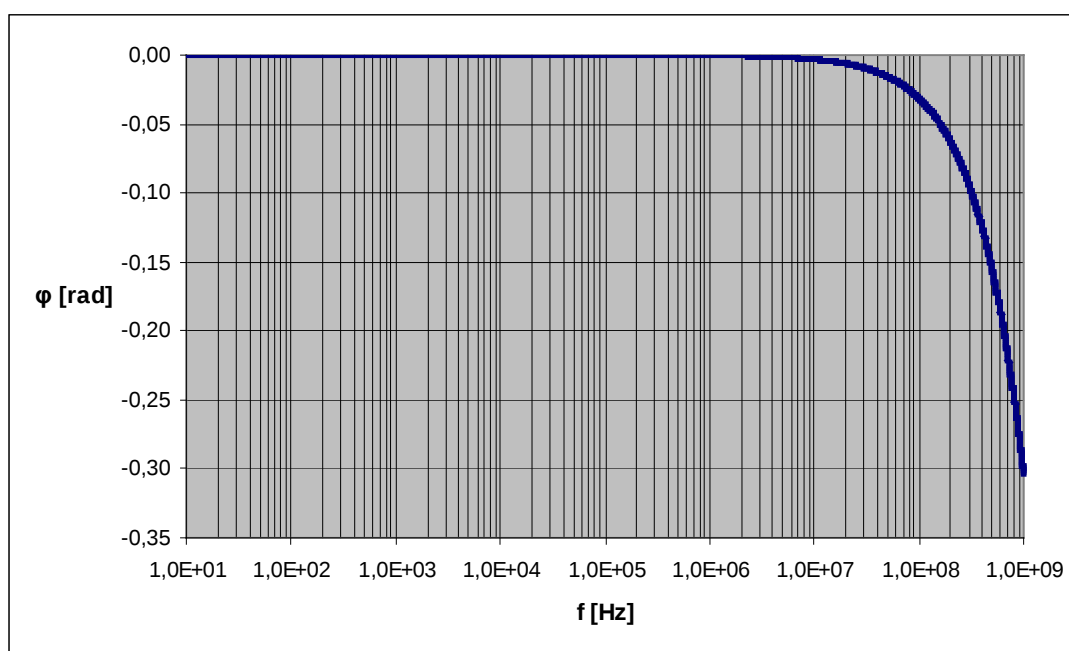
**Obr.28:** Fázová charakteristika proudového přenosu  
– CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi

### 6.1.2 CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi – Měření vstupní impedance $Z_{IN}$

Na **Obr.29** je zřejmé, že do 100MHz má vstupní impedance rezistivní hodnotu  $10\Omega$ . Od 100MHz dochází k nepatrnému poklesu – zde se začíná uplatňovat kapacita vstupu. Při hodnotě 1GHz je hodnota vstupní impedance rovna  $9,55\Omega$ .



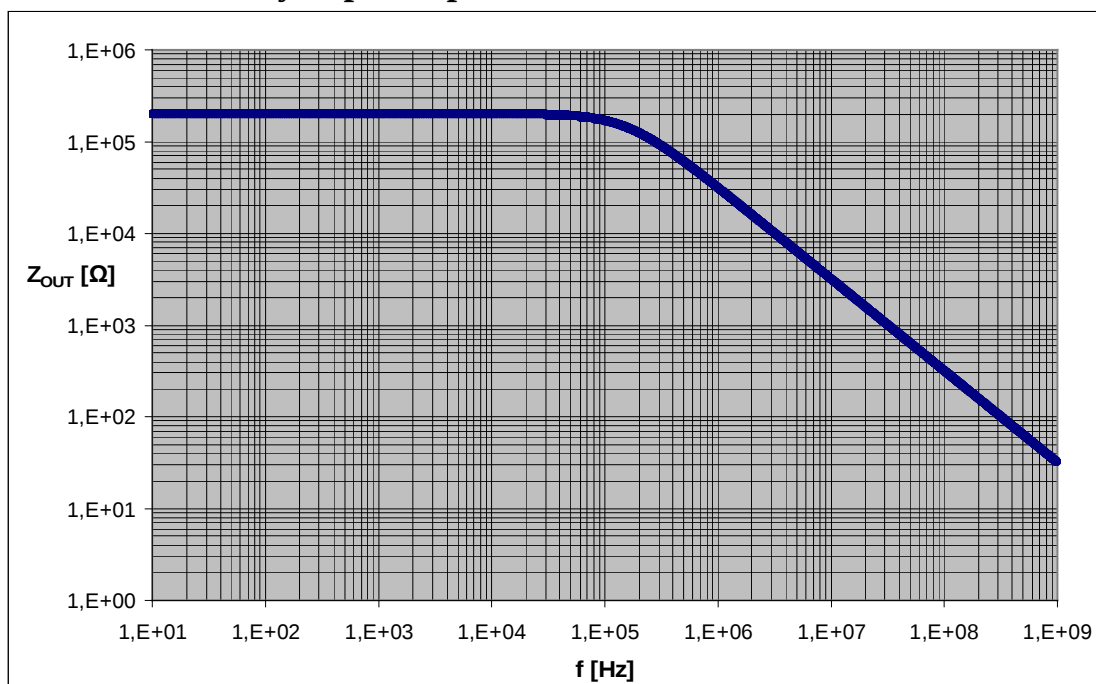
**Obr.29:** Závislost vstupní impedance na frekvenci  
– CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi



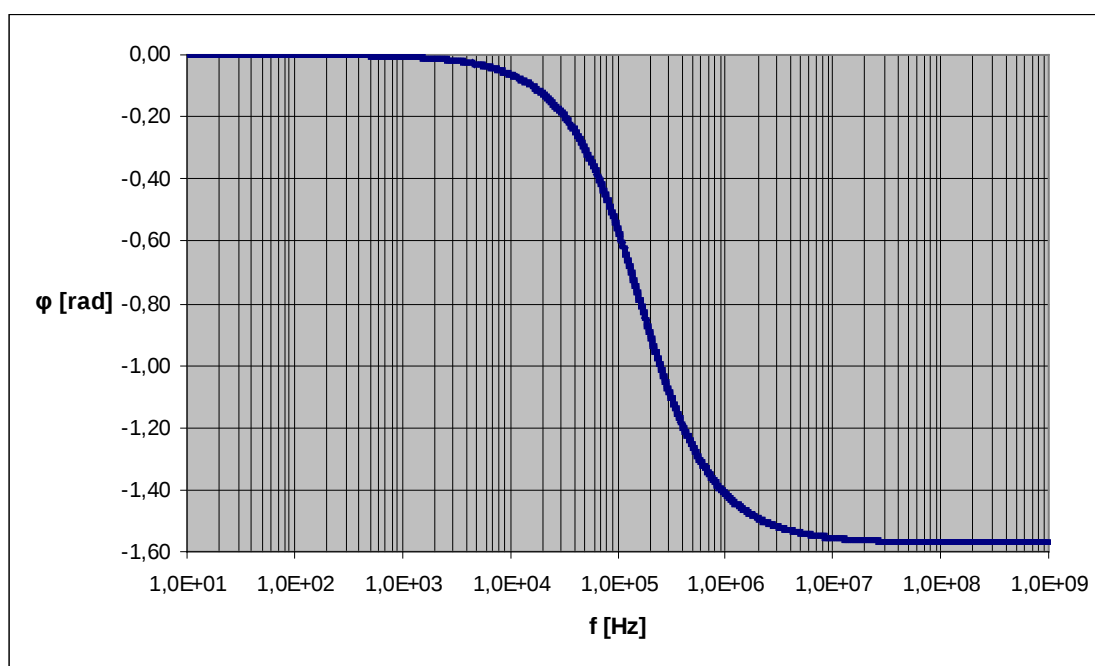
**Obr.30:** Fázová charakteristika vstupní impedance  
– CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi

**Obr.30** popisuje průběh fáze vstupní impedance, která se do frekvence 1,36MHz chová konstantně. Při vyšších frekvencích dochází k postupnému nepatrnému zvyšování fáze vlivem kapacity na vstupu.

### 6.1.3 CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi – Měření výstupní impedance $Z_{OUT}$



**Obr.31:** Závislost výstupní impedance na frekvenci  
– CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi



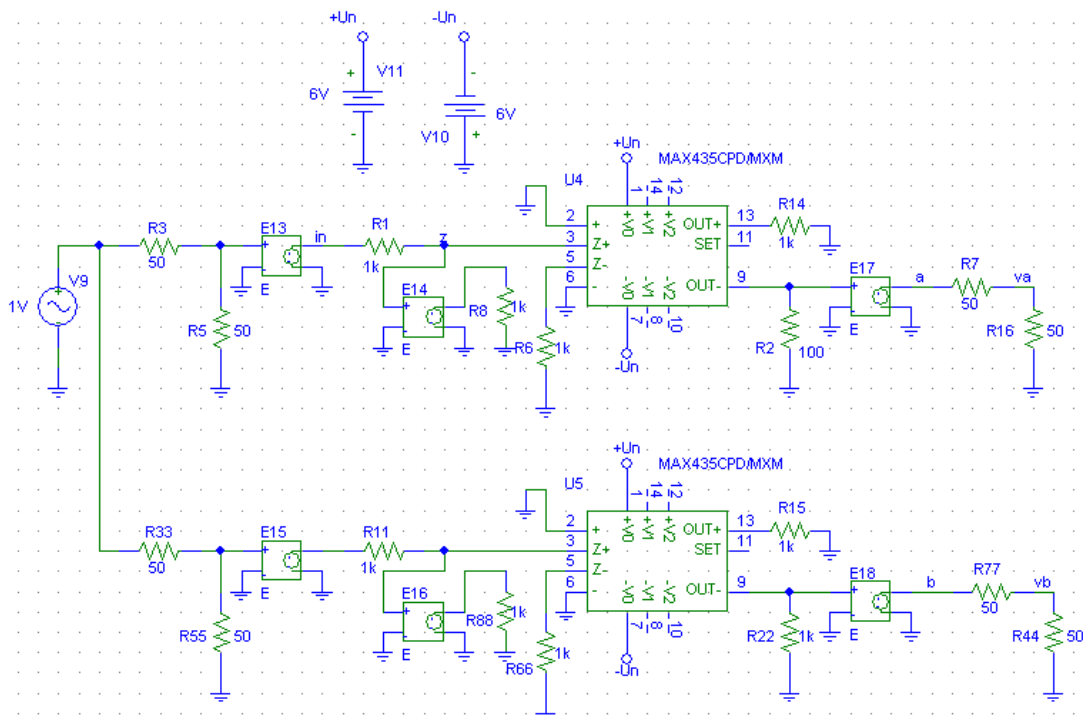
**Obr.32:** Fázová charakteristika výstupní impedance  
– CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi

Při hodnotě 100kHz dochází k útlumu výstupní impedance a impedance klesá z hodnoty  $200k\Omega$  viz **Obr.31**. Tedy do frekvence 100kHz má výstupní impedance

rezistivní charakter, ale při vyšších kmitočtech se již projevuje vliv parazitní kapacity. Fázová charakteristika výstupní impedance je zobrazena na **Obr.32**. Fáze se postupně mění od 0 do  $(-\pi/2)$ .

## 6.2 MAX435 – Simulace měřící metody

Měření bylo provedeno dle metody popsané v kapitole 4. Simulační schéma je na **Obr.33**.

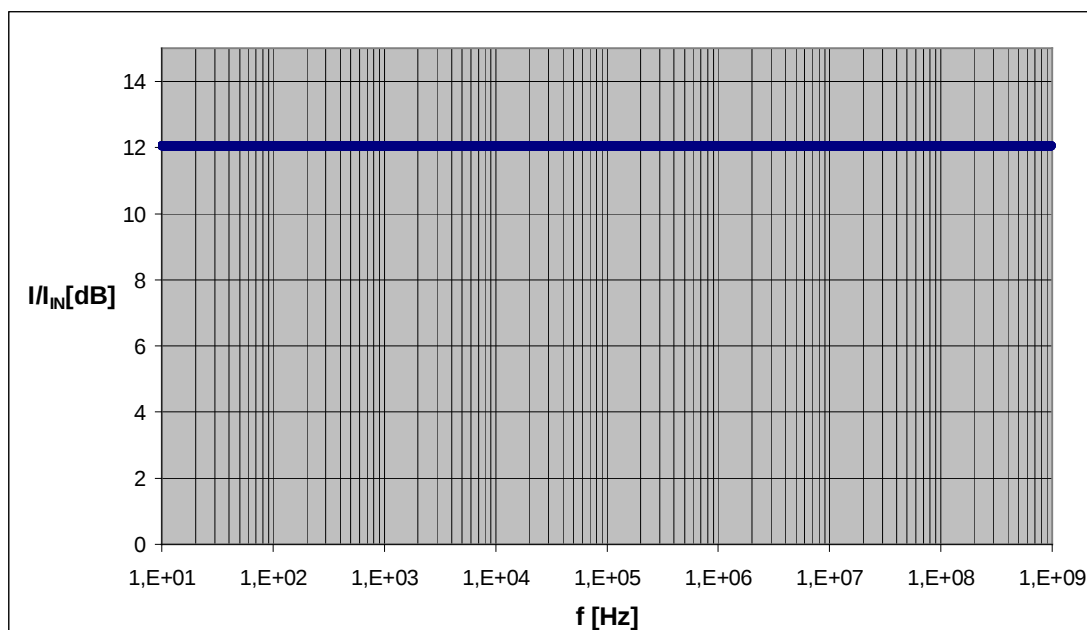


**Obr.33:** MAX435 - simulační měření v programu PSpice

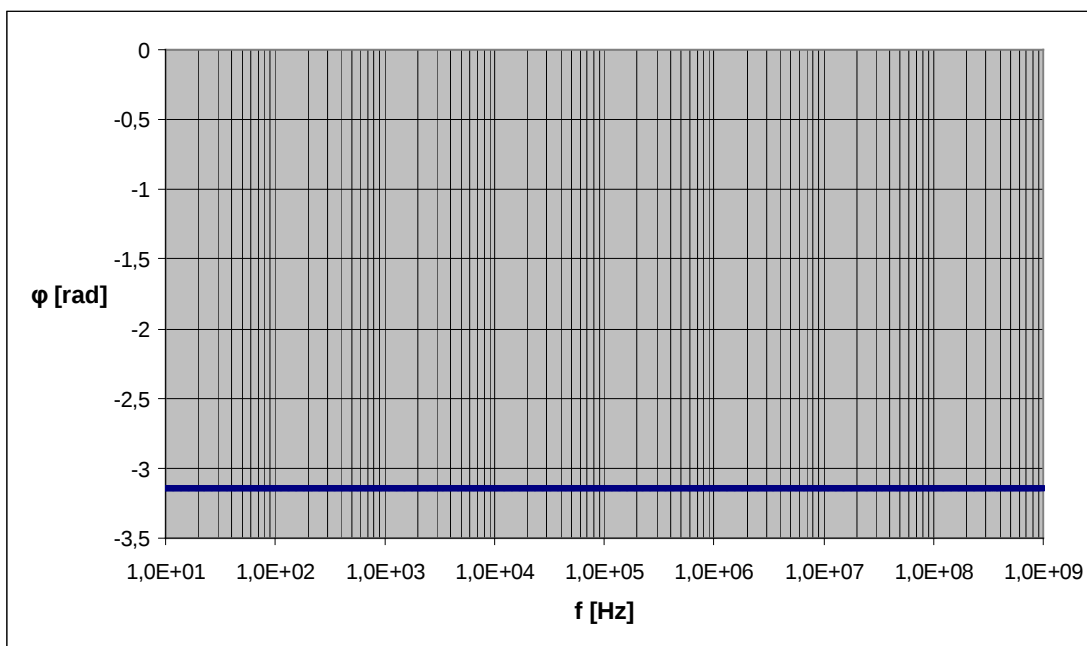
### 6.2.1 MAX435 – Měření proudového přenosu ( $I/I_{IN}$ )

Z výsledné grafické závislosti na **Obr.34** lze vydedukovat, že model prvku MAX435PCD/MXM v programu PSpice obsahuje ideální zdroj proudu, jak již bylo zmíněno při měření CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi (kapitola 6.1).

MAX435 má pevně nastavený zisk o hodnotě  $4[-] \Rightarrow 20 \cdot \log(4) = 12,04\text{dB}$ . Frekvenční charakteristika proudového přenosu je potom konstantní a začíná právě na hodnotě  $12,04\text{dB}$ . Na reálném prvku by docházelo při vyšších kmitočtech k útlumu proudového přenosu.



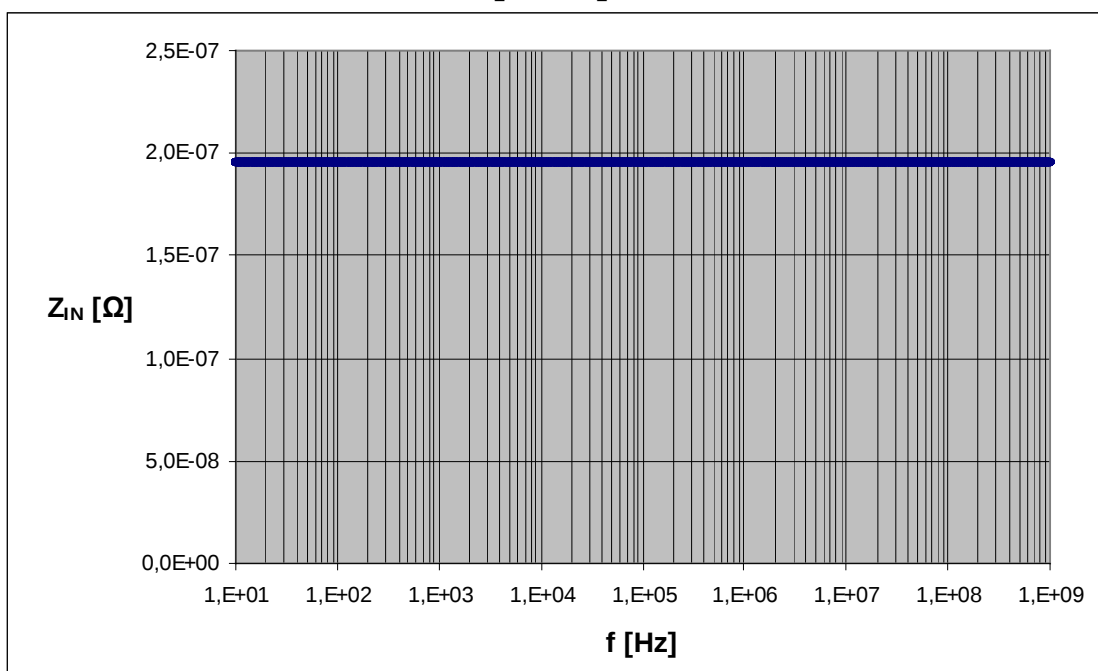
**Obr.34:** Amplitudová charakteristika proudového přenosu – MAX435



**Obr.35:** Fázová charakteristika proudového přenosu – MAX435

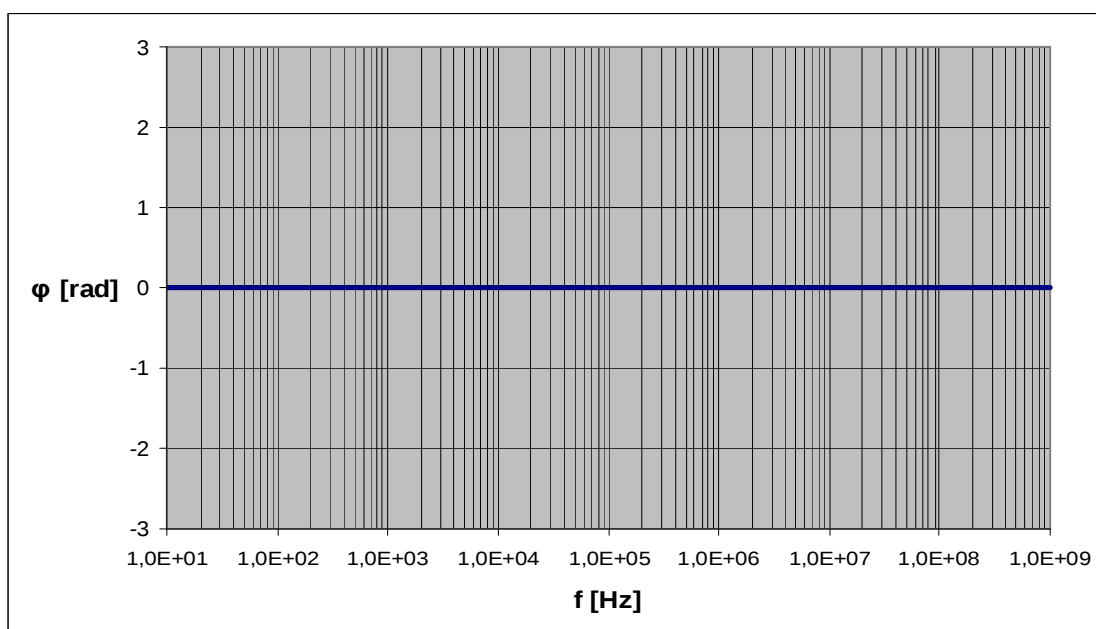
Fázová charakteristika proudového přenosu je pro celé kmitočtové pásmo konstantní a fáze je rovna  $(-\pi)$  viz **Obr.35**, což opět nasvědčuje o orientaci proudů směrem dovnitř MAX435.

### 6.2.2 MAX435 – Měření vstupní impedance $Z_{IN}$



**Obr.36:** Závislost vstupní impedance na frekvenci – MAX435

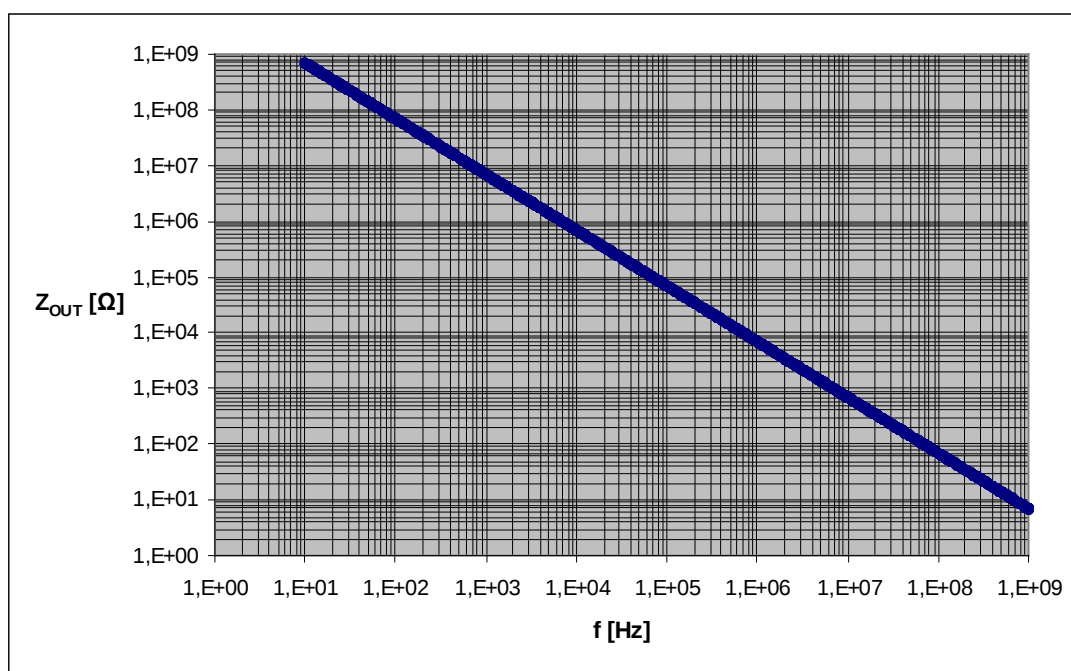
Vstupní impedance  $Z_{IN}$  se v ideálním zdroji proudu blíží k nule. Z **Obr.36** je vidět, že vstupní impedance je téměř nulová  $Z_{IN} = 0,19 \mu\Omega$ . Z tohoto vyplývá, že model MAX435PCD/MXM z programu PSpice s touto impedancí neuvažuje (je modelován jako ideální prvek).



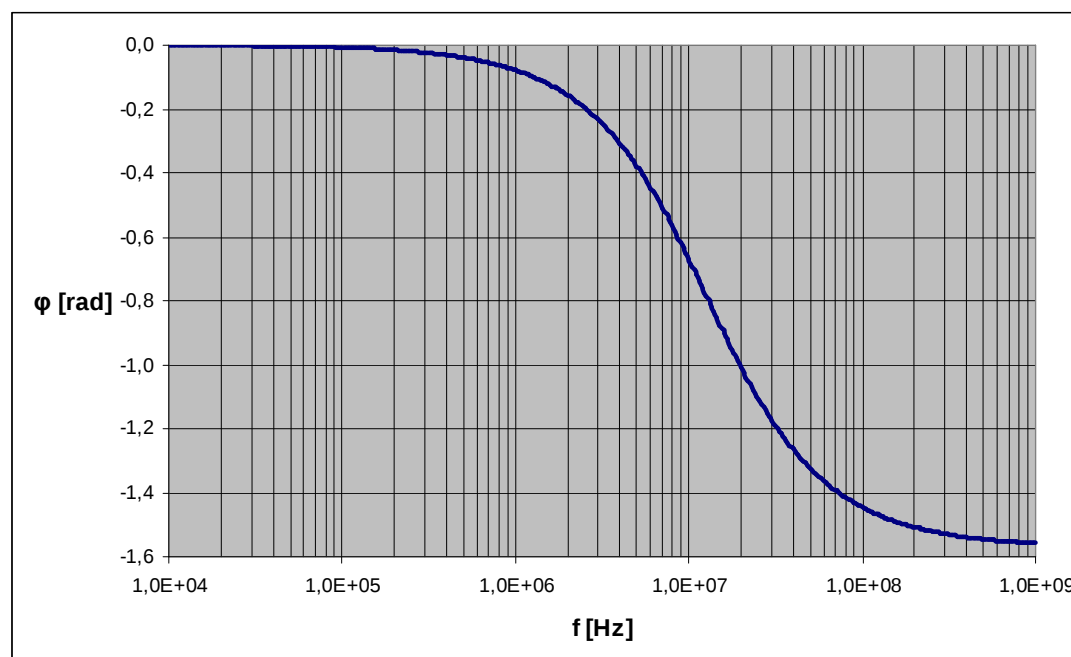
**Obr.37:** Fázová charakteristika vstupní impedance – MAX435

Na **Obr.37** je zobrazena fázová charakteristika výstupní impedance, která má pro celé kmitočtové pásmo konstantní hodnotu fáze 0 rad.

### 6.2.3 MAX435 – Měření výstupní impedance $Z_{OUT}$



**Obr.38:** Závislost výstupní impedance na frekvenci – MAX435



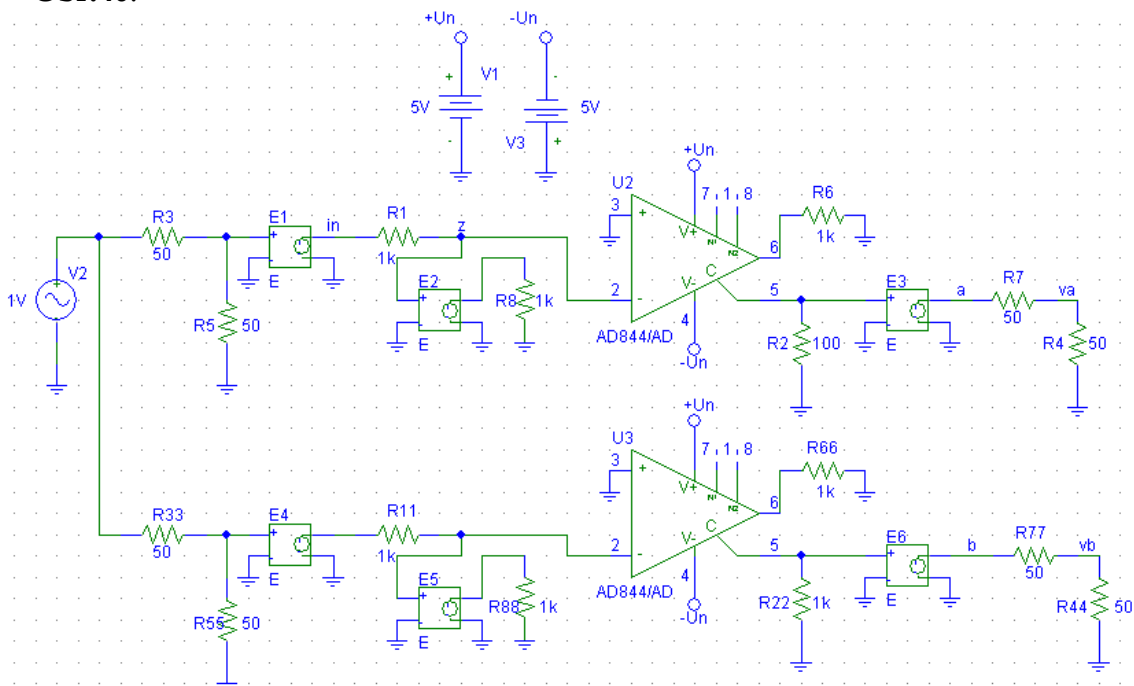
**Obr.39:** Fázová charakteristika výstupní impedance – MAX435

Z Obr.38 vyplývá, že výstupní impedance začíná na hodnotě téměř 700MΩ při frekvenci 10Hz a postupně klesá k nule při vyšších kmitočtech. O takovéto výstupní impedanci  $Z_{OUT}$  můžeme říci, že má kapacitní charakter. Výstupní impedance prvku je zřejmě modelována kapacitorem. Hodnota kapacity při frekvenci 100kHz je po dosazení do vztahu:  $C = 1/(2\pi \cdot f \cdot Z_{OUT}) = 1/(2\pi \cdot 1.10^5 \cdot 6920)$

= 0,23nF. Jak lze vidět z **Obr.39**, dochází k postupné změně fáze z nuly až do úrovně  $(-\pi/2)$  při frekvenci 1GHz.

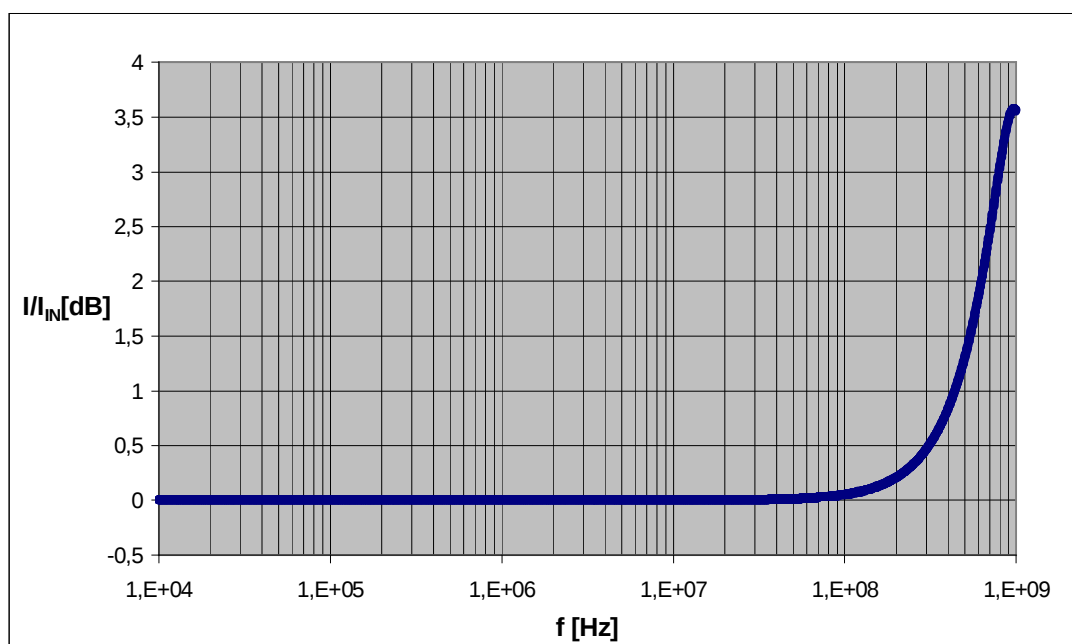
### 6.3 AD844 – Simulace měřící metody

Měření bylo provedeno dle metody popsané v kapitole 4. Simulační schéma je na **Obr.40**.



**Obr.40:** AD844 - simulační měření v programu PSpice

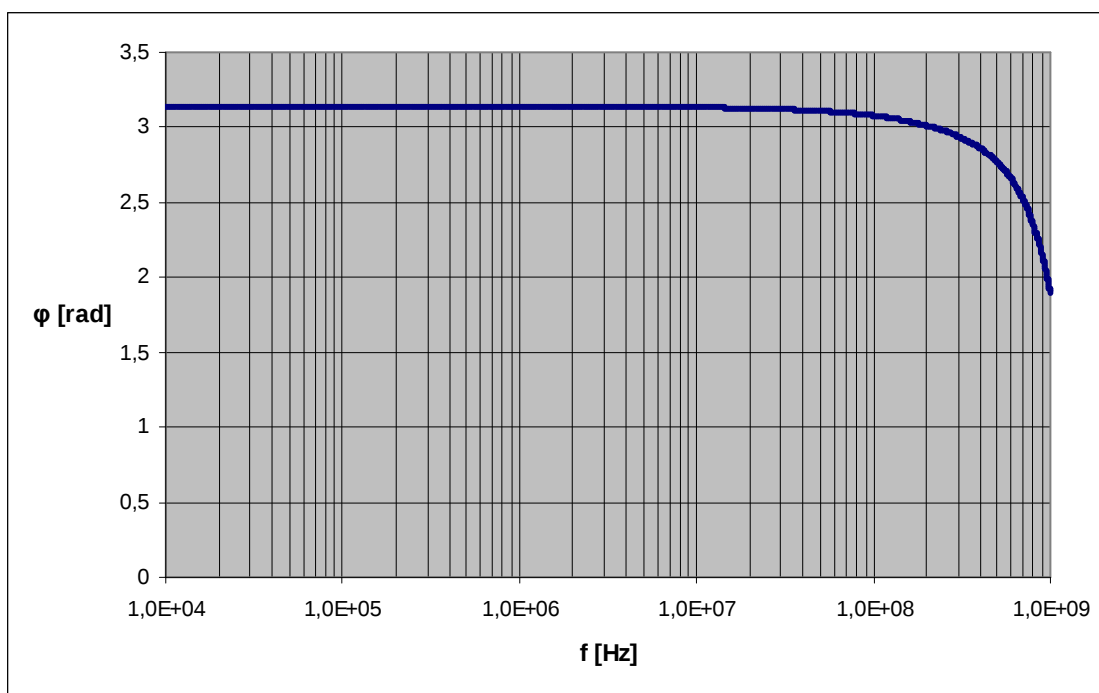
#### 6.3.1 AD844 – Měření proudového přenosu ( $I/I_{IN}$ )



**Obr.41:** Amplitudová charakteristika proudového přenosu – AD844

Z výsledné grafické závislosti na **Obr.41** lze pozorovat, že model AD844/AD se při simulacích chová více reálněji než-li model MAX435PCD/MXM v předchozí kapitole.

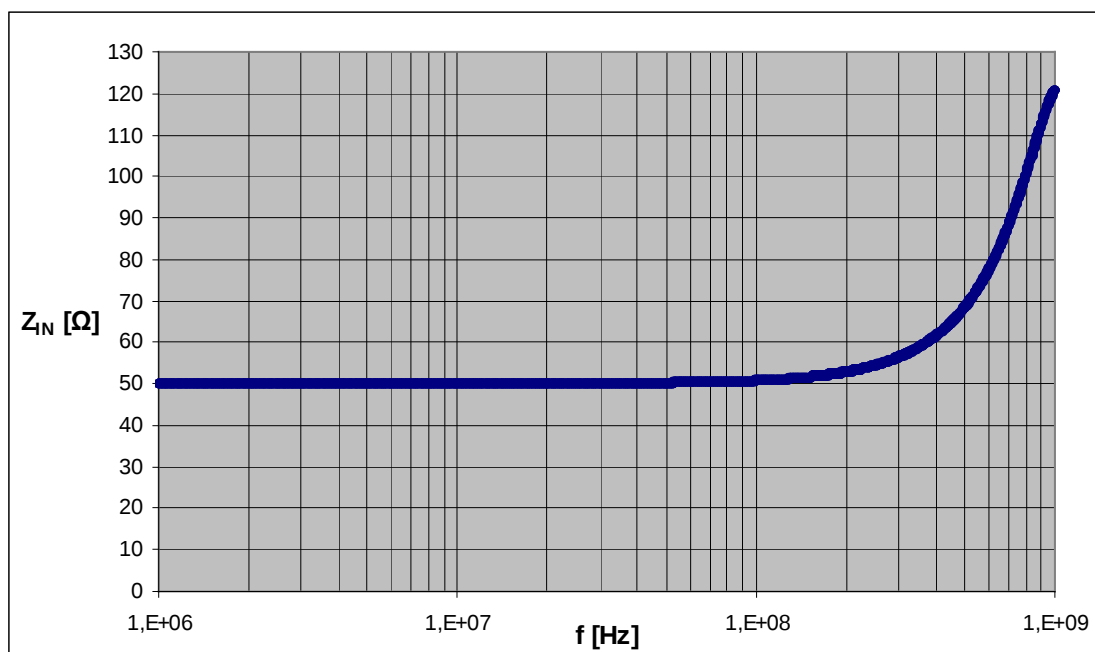
AD844 má pevně nastavený zisk o hodnotě  $1[-]$   $\Rightarrow 20 \cdot \log(1) = 0\text{dB}$ . Frekvenční charakteristika proudového přenosu je konstantní do kmitočtu 63,7MHz, pak postupně nabývá až do hodnoty 3,5dB.



**Obr.42:** Fázová charakteristika proudového přenosu – AD844

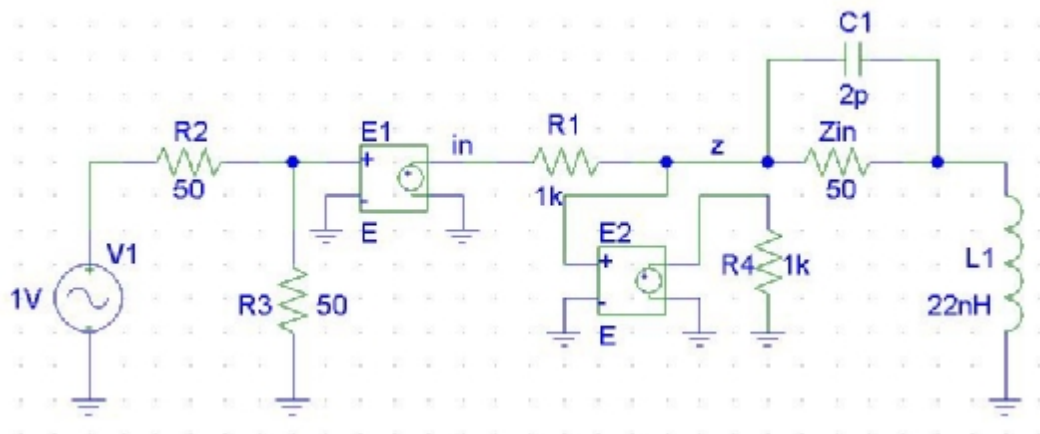
Fázová charakteristika je zobrazená na **Obr.42**. Fáze má počáteční hodnotu ( $\pi$ ) a je konstantní do hodnoty frekvence 6,44MHz. Pro vyšší frekvence se fáze začíná pozvolna měnit směrem k nule. Při frekvenci 1GHz je hodnota fáze 1,89 radiánů, což odpovídá fázovému posunu 108,3 stupňů. Podle hodnoty fáze lze opět určit směr toku proudů dovnitř obvodu AD844.

### 6.3.2 AD844 – Měření vstupní impedance $Z_{IN}$



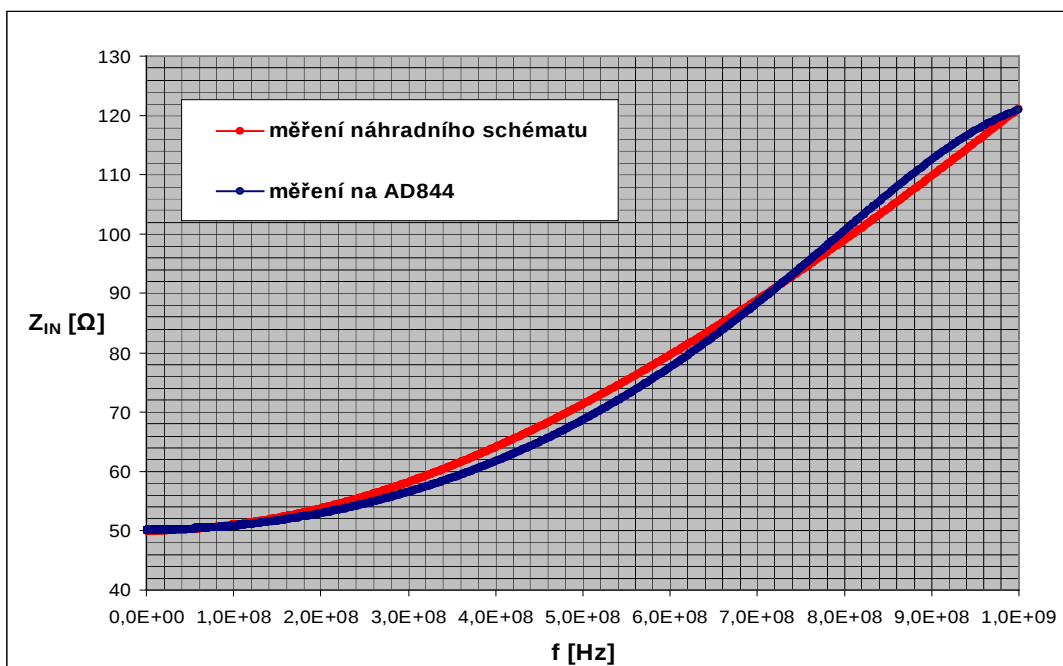
**Obr.43:** Závislost vstupní impedance na frekvenci – AD844

Z **Obr.43** vyplývá, že vstupní impedance  $Z_{IN}$  u prvku AD844 se pohybuje od  $50\Omega$  do  $120\Omega$  při frekvenci 1GHz. K postupnému zvyšování dochází při frekvenci 54MHz. Vzhledem k růstu hodnot lze chápat tuto impedanci jako impedanci s induktivním charakterem. Podobnou závislost lze získat simulací podle **Obr.44**.



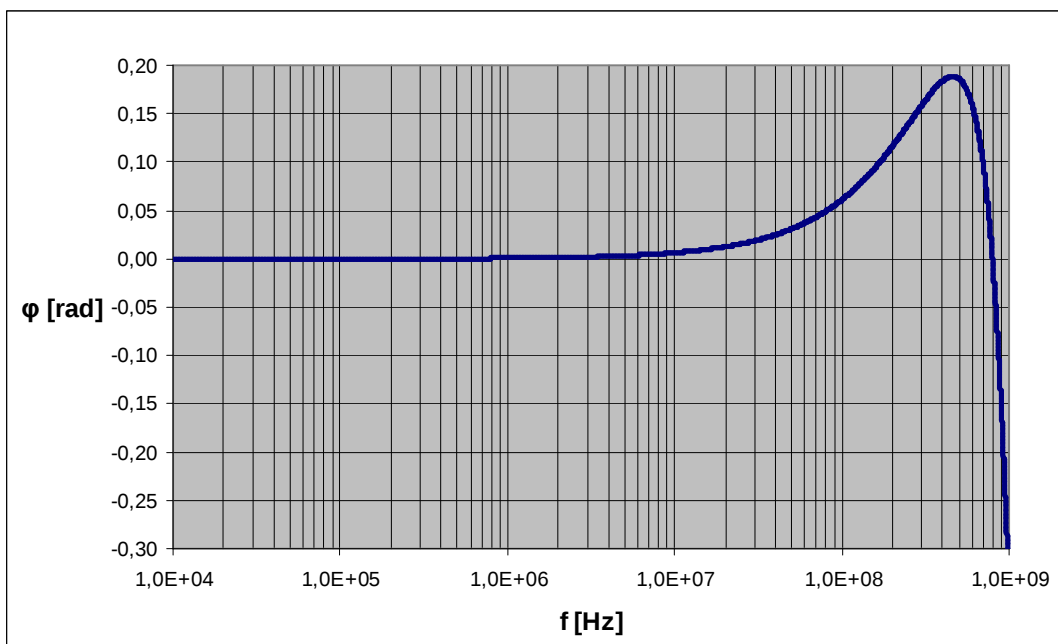
**Obr.44:** Měření náhradního obvodu vstupní impedance prvku AD844

Výrobce uvádí v katalogovém listu hodnotu vstupní impedance  $50\Omega$  a vstupní kapacitu 2pF. Podle **Obr.44** jsme si zjistili přibližnou hodnotu indukčnosti L. Tato hodnota je rovna okolo 22nH. Porovnání obou výsledků vstupní impedance (měření podle **Obr.40** a **Obr.44**) je vyhodnoceno na **Obr.45**.



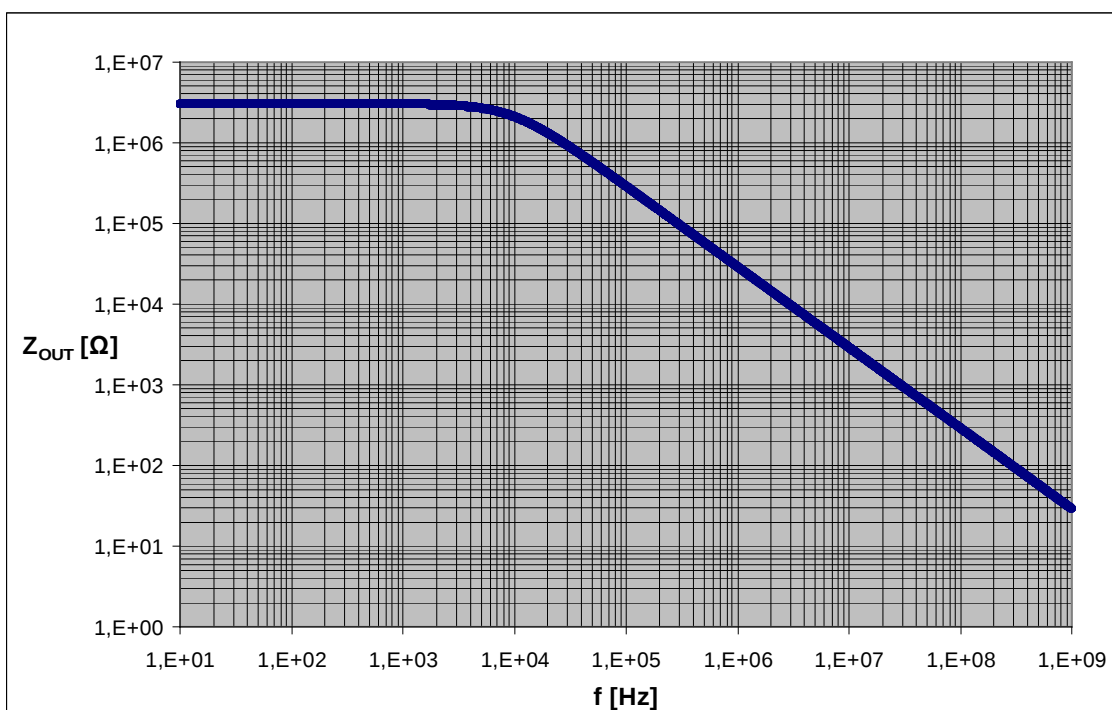
**Obr.45:** Porovnávací měření - vstupní impedance prvku AD844

Fázová charakteristika vstupní impedance je vidět na **Obr.46**. Její fáze má zpočátku hodnotu téměř nulovou a průběh konstantní do hodnoty frekvence 3,6MHz. Na vyšších frekvencích se fáze začíná měnit. Tuto změnu fáze, kdy stoupá směrem do kladných hodnot, má za následek induktivní charakter této impedance. Vstupní proud teče směrem do měřicího obvodu AD844. Podle této fázové závislosti je zřejmé, že původní předpoklad měření na **Obr.44** není zcela správný – prudký pokles fáze značí o výskytu kapacitní složky. Správné řešení je naznačeno v kapitole 6.5 Fázové charakteristiky-zhodnocení na **Obr.58**.



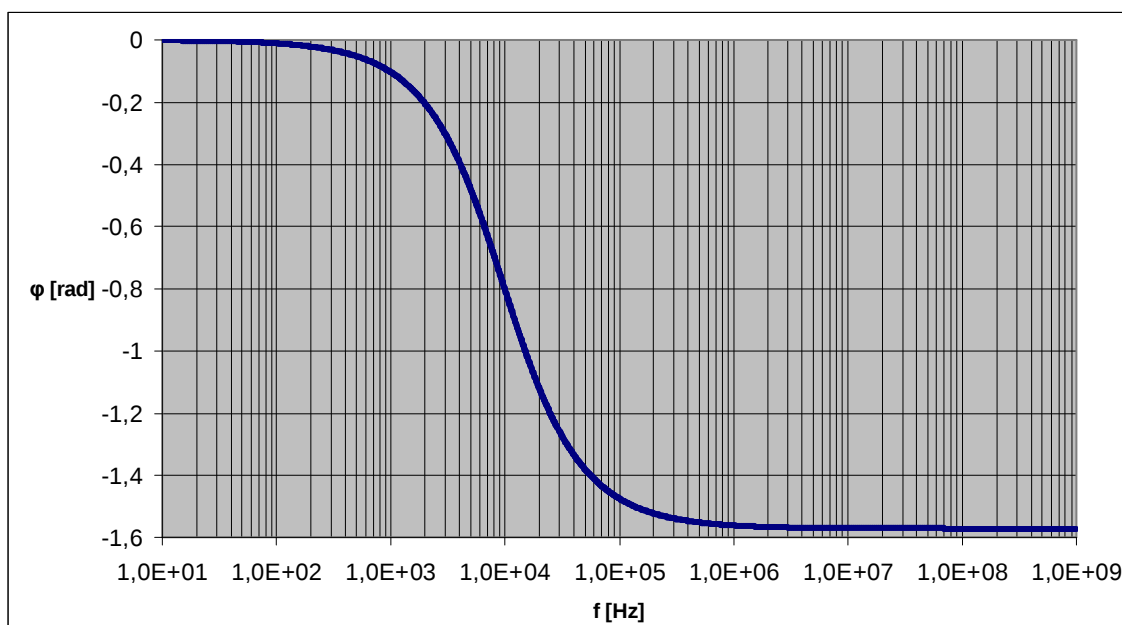
**Obr.46:** Fázová charakteristika vstupní impedance – AD844

### 6.3.3 AD844 – Měření výstupní impedance $Z_{OUT}$



**Obr.47:** Závislost výstupní impedance na frekvenci – AD844

Grafická závislost výstupní impedance  $Z_{OUT}$  je zobrazena na **Obr.47**. Postupně klesá od kmitočtu 1kHz při hodnotě  $3M\Omega$ .

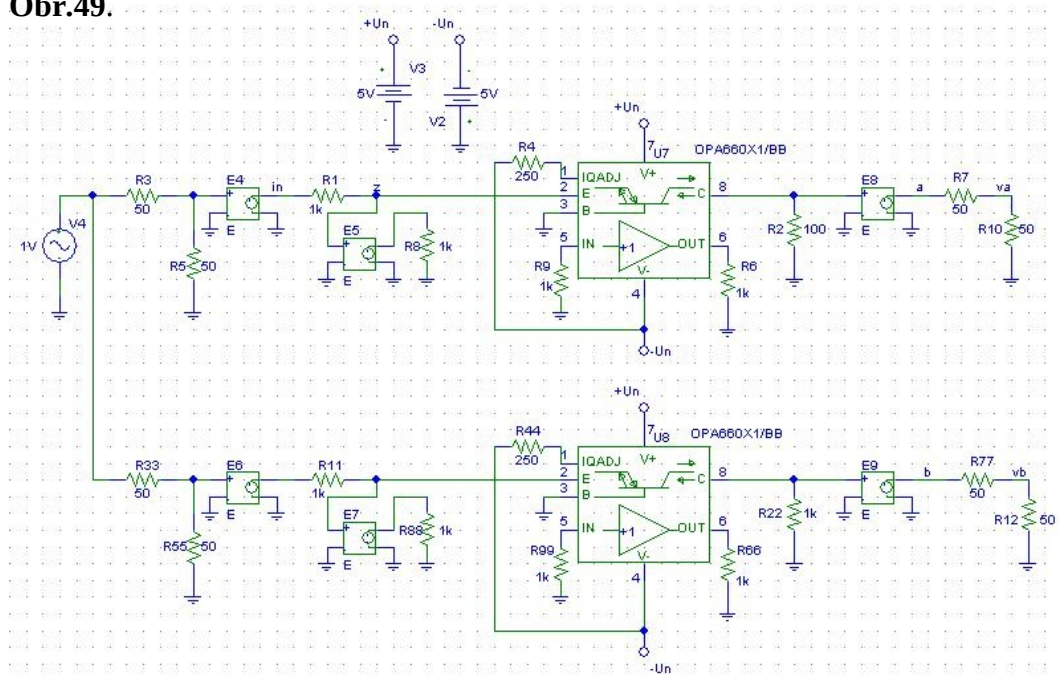


**Obr.48:** Fázová charakteristika výstupní impedance – AD844

Fázová charakteristika výstupní impedance je popsána na **Obr.48**. Fáze se mění postupně od nuly do  $(-\pi/2)$ .

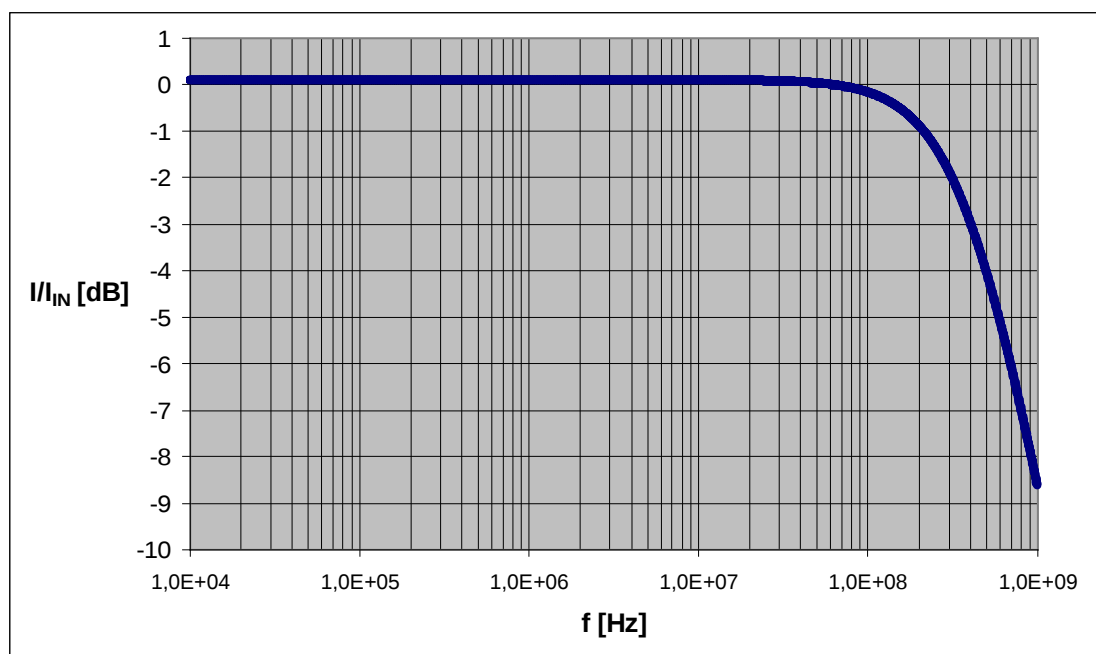
## 6.4 OPA660 – Simulace měřící metody

Měření bylo provedeno dle metody popsané v kapitole 4. Simulační schéma je na Obr.49.



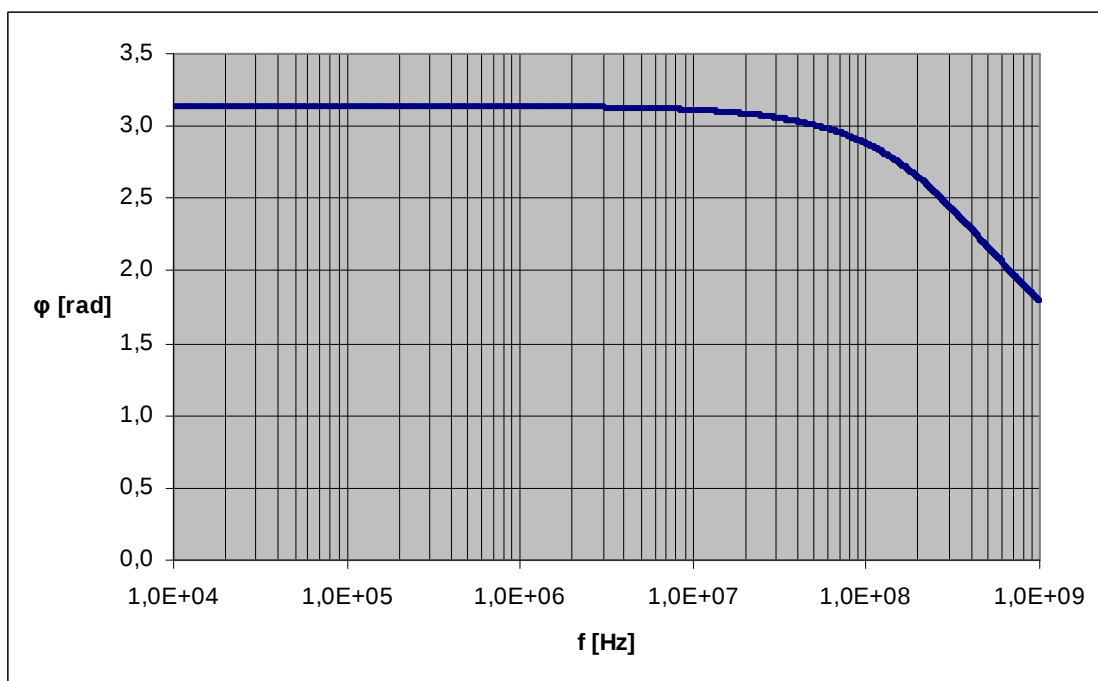
Obr.49: OPA660 - simulační měření v programu PSpice

### 6.4.1 OPA660 – Měření proudového přenosu ( $I/I_{IN}$ )



Obr.50: Amplitudová charakteristika proudového přenosu – OPA660

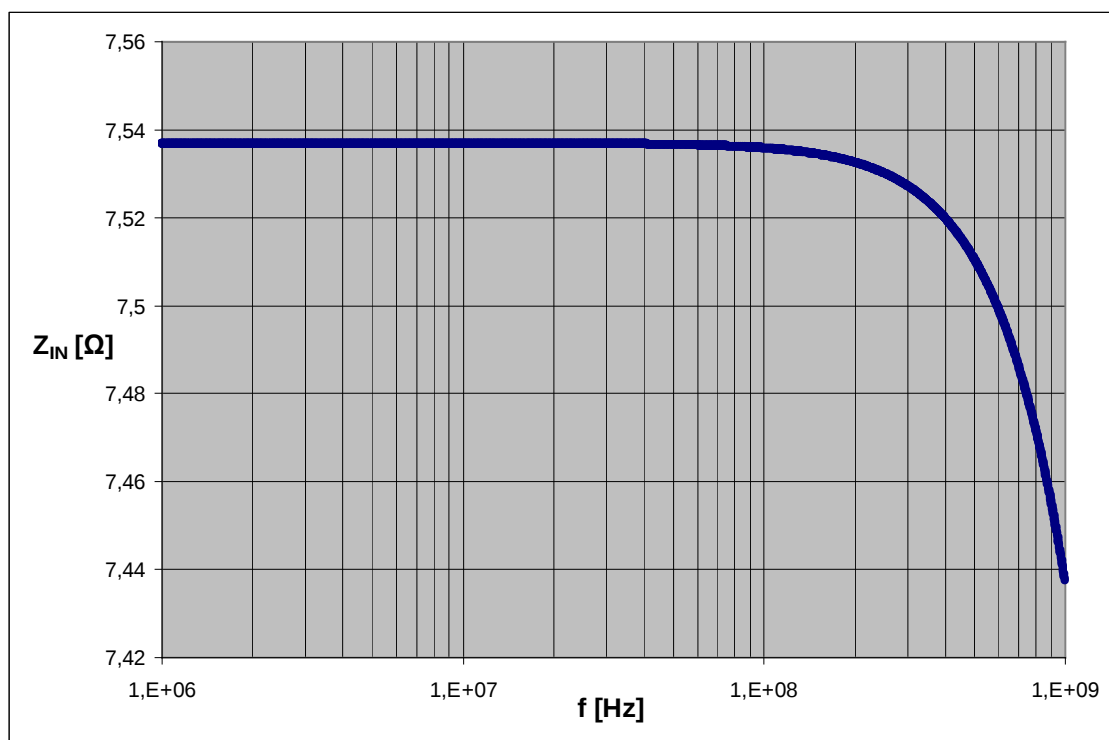
Obr.50 popisuje frekvenční charakteristiku proudového přenosu prvku OPA660. Charakteristika je konstantní do kmitočtu 34MHz a následně nastává útlum do hodnoty -8,5dB při frekvenci 1GHz.



**Obr.51:** Fázová charakteristika proudového přenosu – OPA660

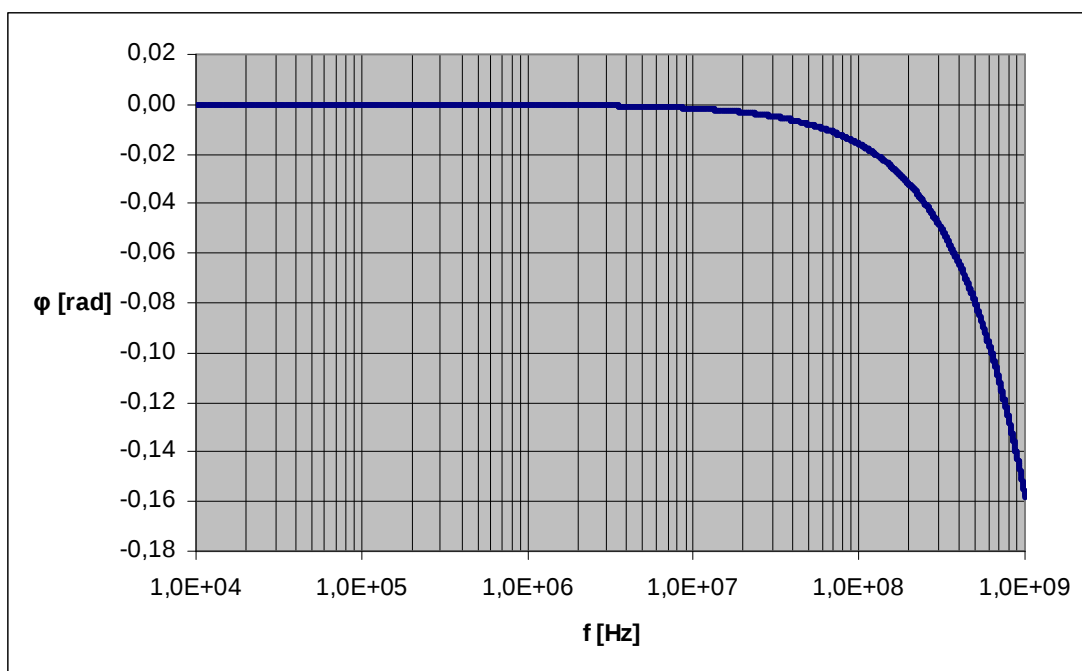
Z Obr.51 vyplývá, že fáze je konstantní do kmitočtu 2,86MHz, dále dochází při vyšších frekvencích k poklesu fáze. Při frekvenci 1GHz je její hodnota  $(\pi/2)$ . Opět z grafické závislosti lze vyčíst, že výstupní proud (I), teče směrem dovnitř.

#### 6.4.2 OPA660 – Měření vstupní impedance $Z_{IN}$



**Obr.52:** Závislost vstupní impedance na frekvenci – OPA660

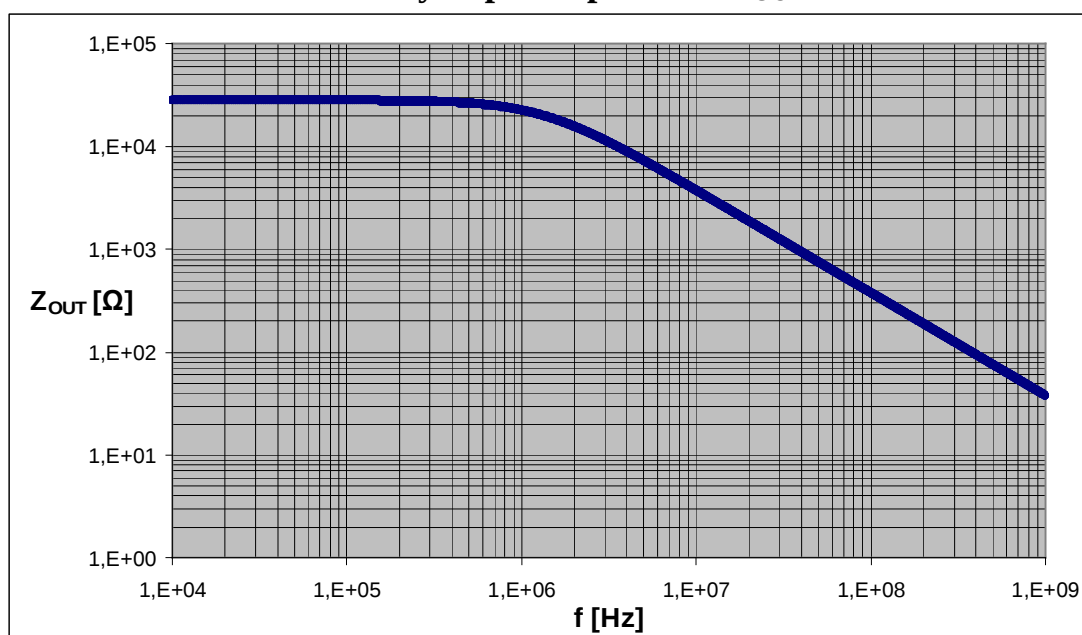
Z **Obr.52** vyplývá, že vstupní impedance  $Z_{IN}$  prvku OPA660 je konstantní do kmitočtu 60MHz při hodnotě  $7,535\Omega$ , pak dochází k nepatrnému útlumu k hodnotě  $7,437\Omega$  při kmitočtu 1GHz. Tento útlum je považován za zanedbatelný.



**Obr.53:** Fázová charakteristika vstupní impedance – OPA660

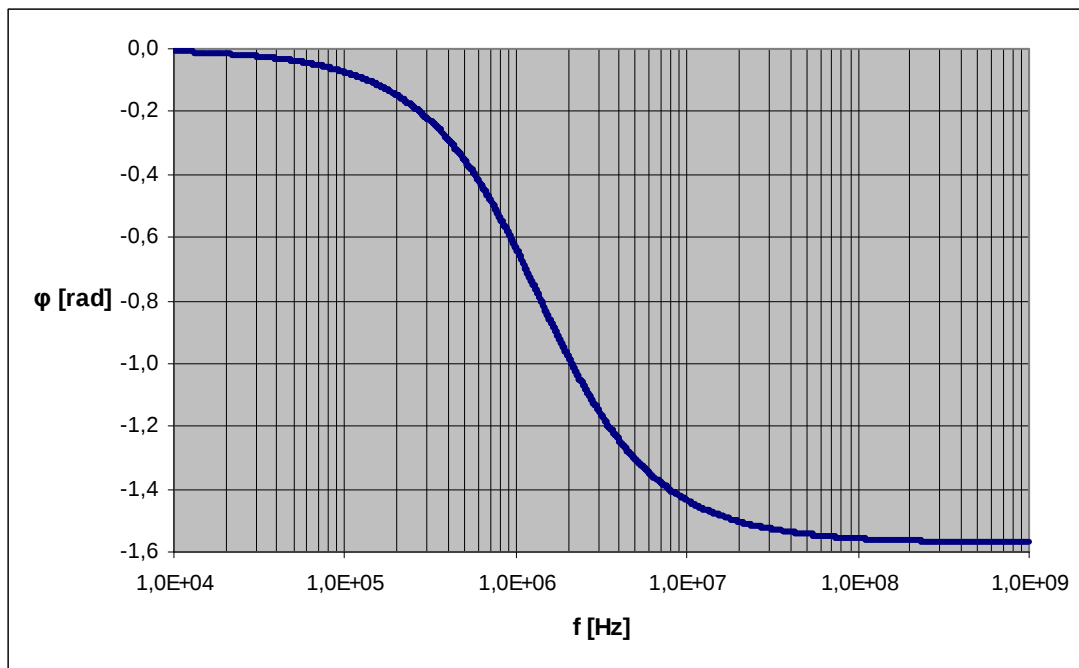
Fázová charakteristika vstupní impedance je zobrazena na **Obr.53**. Do frekvence 3,38MHz je fáze konstantní s téměř nulovou hodnotou. Pak dochází při vyšších frekvencích k zanedbatelnému poklesu fáze.

### 6.4.3 OPA660 – Měření výstupní impedance $Z_{OUT}$



**Obr.54:** Závislost výstupní impedance na frekvenci – OPA660

Grafická závislost výstupní impedance  $Z_{OUT}$  je zobrazena na **Obr.54**. Hodnota výstupní impedance je rovna  $28k\Omega$  do kmitočtu  $340kHz$ . Při vyšších frekvencích dochází k útlumu až do hodnoty  $38\Omega$  při kmitočtu  $1GHz$ .



**Obr.55:** Fázová charakteristika výstupní impedance – OPA660

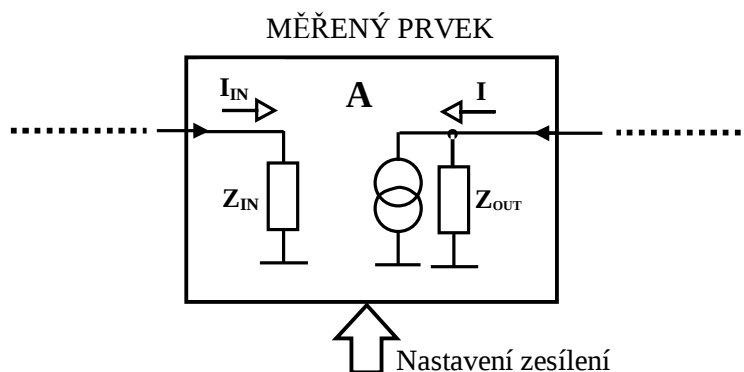
Z **Obr.55** vyplývá, že se fázová charakteristika postupně mění z nuly až do hodnoty  $(-\pi/2)$ .

## 6.5 Fázové charakteristiky - zhodnocení

### Fázové charakteristiky proudového přenosu $I/I_{IN}$ u všech měřených prvků:

Při návrhu této měřicí metody bylo uvažováno, že výstupní proud označený ve schématu jako (I) teče směrem ven z měřených obvodů. Tyto simulace nás však přesvědčily, že proud má opačnou orientaci a teče směrem dovnitř měřících obvodů, jak je naznačeno na **Obr.56**. Tato skutečnost byla zjištěna podle fázového posunu, který měl hodnotu  $(\pi)$  či  $(-\pi)$ , při měření proudu s orientací směrem ven z měřeného obvodu.

U prvků MAX435 a CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi byla fáze pro celé měřené frekvenční pásmo konstantní. U prvků AD844 a OPA660 docházelo při vyšších frekvencích k poklesu fáze.



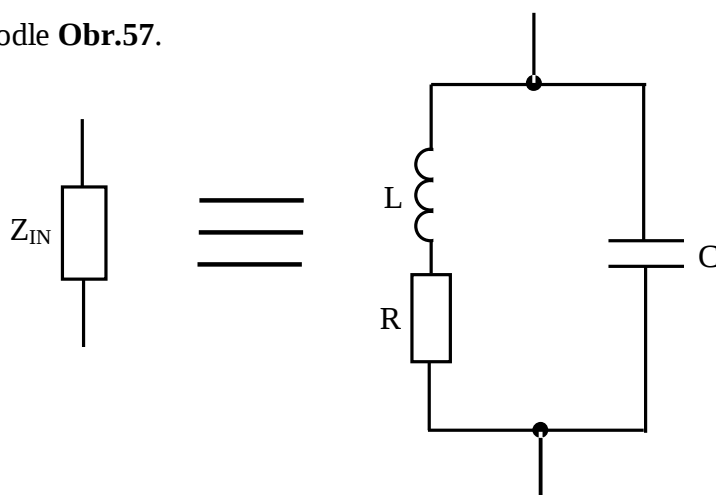
**Obr.56:** Zjištěná orientace proudu při měření prvků s CCCS

### **Fázové charakteristiky vstupní impedance $Z_{IN}$ u všech měřených prvků:**

U prvku OPA660 a CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi se projevovala vstupní impedance jako impedance s rezistivním charakterem (fázový posun byl nulový), při vyšších frekvencích sice docházelo k fázovému posunu, ale jen nepatrně (při frekvenci 1GHz měl u prvku OPA660 fázový posun hodnotu  $-0,158 \text{ rad} = -9,05^\circ$  a u CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi hodnotu  $-0,30 \text{ rad} = -17,19^\circ$ ).

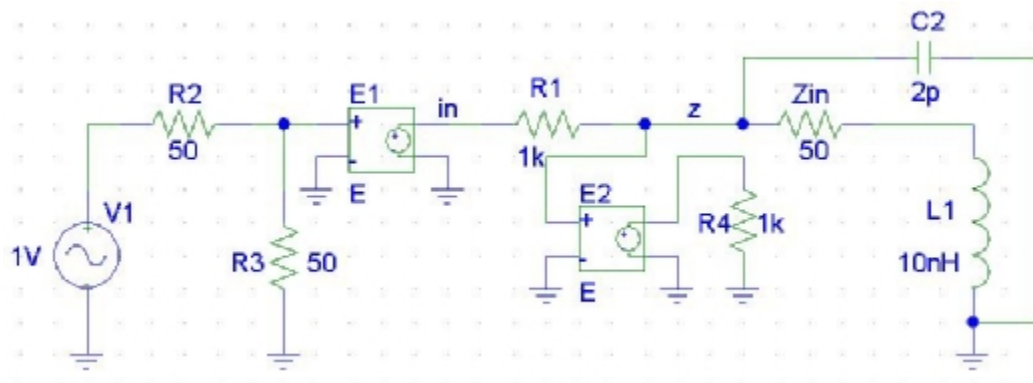
U prvku MAX435 byla fáze nulová po celém měřeném pásmu frekvencí, jeho vstupní impedance má pouze rezistivní hodnotu (imaginární část je nulová).

Vstupní impedance u AD844 měla fázový posun zpočátku nulový do hodnoty frekvence 2,38MHz a pak docházelo k nárůstu fáze až do hodnoty  $0,188 \text{ rad} = 10,77^\circ$  při frekvenci 478,63MHz (induktivní charakter impedance). Od tohoto kmitočtu směrem výš dochází k prudkému poklesu fáze až na hodnotu  $-0,30 \text{ rad}$  při frekvenci 1GHz. Při vyšších frekvencích zřejmě dojde k převážením kapacitního vlivu nad induktivním. Náhradní obvod vstupní impedance pro prvek AD844 by mohl vypadat podle **Obr.57**.



**Obr.57:** Náhradní obvod vstupní impedance prvku AD844

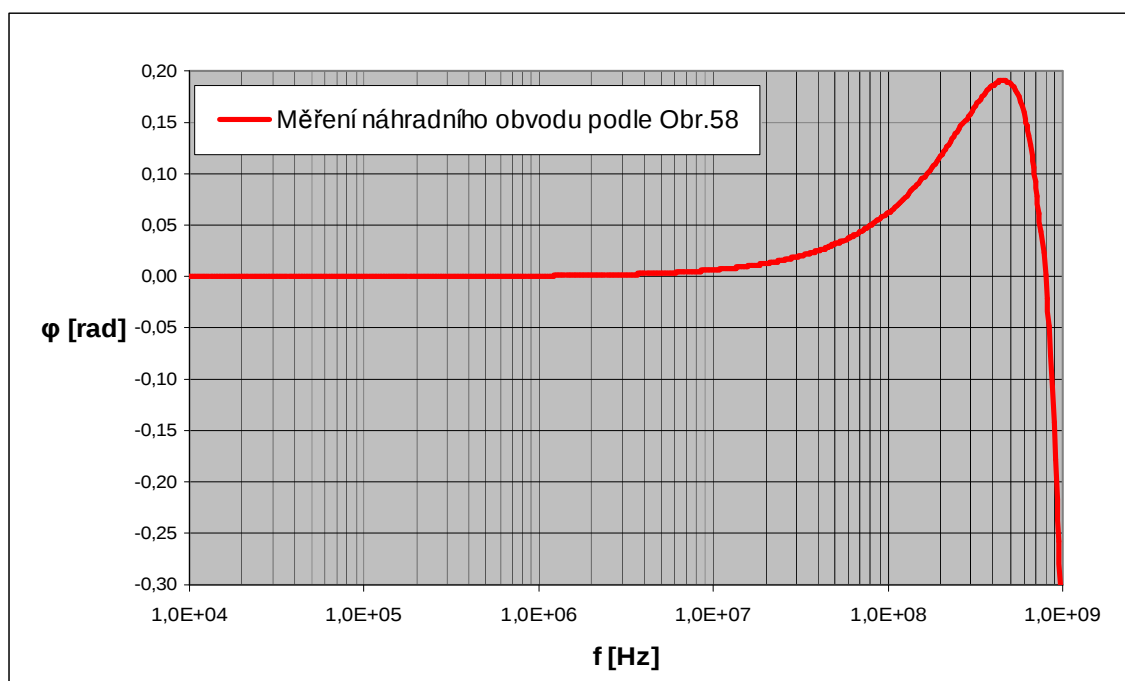
Pro nalezení hodnot jednotlivých složek vstupní impedance (C-kapacity a L-indukčnosti) byla provedena simulace náhradního obvodu podle **Obr.58**. Jako typickou hodnotu vstupní impedance výrobce uvádí  $50\Omega$ , proto vycházíme z rezistivní složky o hodnotě  $50\Omega$ .



**Obr.58:** Správná simulace náhradního obvodu vstupní impedance prvku AD844

Výsledkem simulace náhradního obvodu podle **Obr.58** je naprosto totožná charakteristika s fázovou závislostí vstupní impedance prvku AD844 (**Obr.46**).

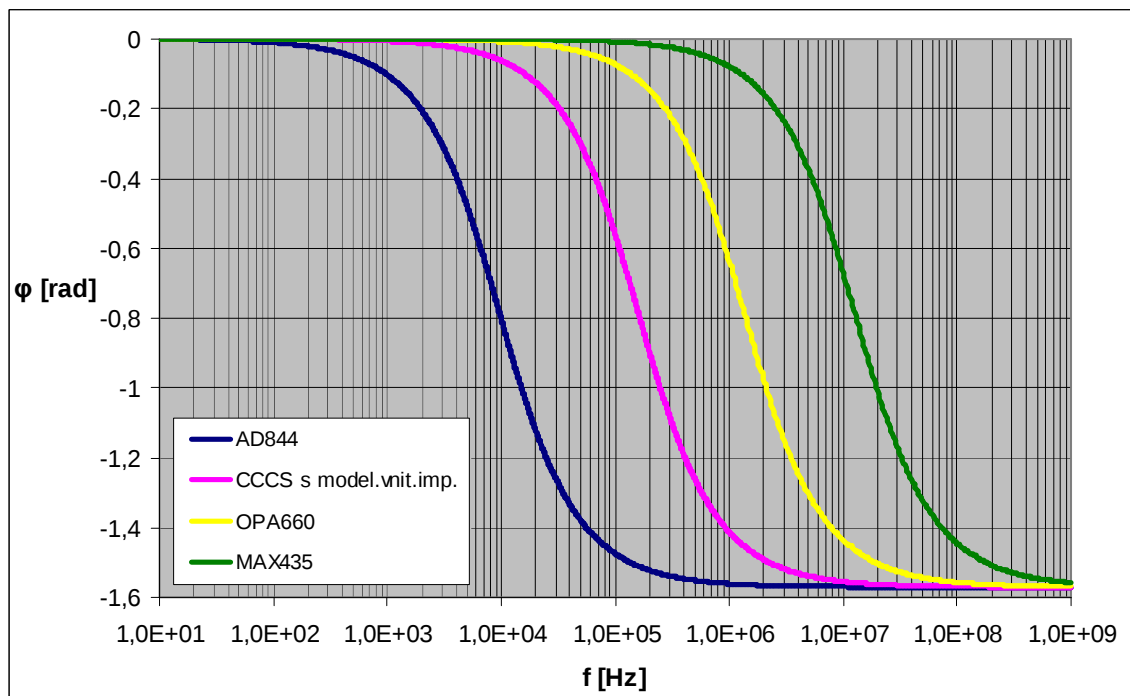
Jednotlivé prvky obvodu modelujícího vstupní impedanci AD844 mají hodnoty: rezistivní složka  $R=50\Omega$ , indukčnostní složka  $L=10\text{nH}$  a kapacitní složka  $C=2\text{pF}$ . Výsledná charakteristika náhradního obvodu je znázorněna na **Obr.59**.



**Obr.59:** Správné porovnávací měření - vstupní impedance prvku AD844

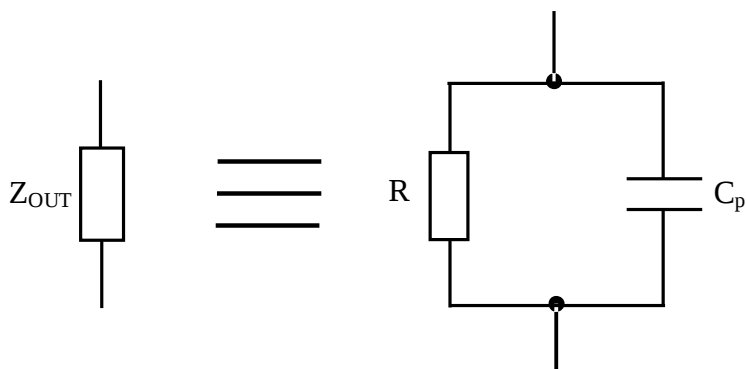
**Fázové charakteristiky výstupní impedance  $Z_{OUT}$  u všech měřených prvků:**

Fázové charakteristiky výstupních impedancí u prvků OPA660, AD844, CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi a MAX435 měly obdobné průběhy fáze. Porovnání fází výstupních impedancí je zobrazeno na **Obr.60**.



**Obr.60:** Porovnání fáze výstupních impedancí  $Z_{OUT}$  u prvků AD844, OPA660, CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi a MAX435

Náhradní obvod výstupní impedance pro tyto průběhy fáze by se mohl jevit podle **Obr.61**. Vlivem kapacitní parazitní složky ( $C_p$ ) zde dochází ke změně fáze, u prvku AD844 při frekvenci 26Hz, u CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi při 381Hz, u prvku OPA660 při 3,16kHz a u MAX435 při 25,2kHz. K ustálení fáze dojde na hodnotě  $(-\pi/2)$  u všech prvků, u prvku AD844 při frekvenci 3,82MHz, u CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi při 53,33MHz, u prvku OPA660 při 437,52MHz a u MAX435 při 1GHz.



**Obr.61:** Náhradní obvod výstupní impedance prvků AD844



Nejprve byla pomocí programu EAGLE vytvořena deska plošných spojů (**Obr.62** a,b,c). Seznam použitých součástek je uveden v **Tab.7**.

**Tab.7:** Seznam použitých součástek pro realizaci reálného měření

| OZNAČENÍ VE SCHEMATU    | NÁZEV        | POPIS/HODNOTA popř. TYP                    |
|-------------------------|--------------|--------------------------------------------|
| AD844, AD844(2)         | AD844JRZ     | Zkoumané prvky / 0612                      |
| S1 - S3                 | BUF602       | Jednotkové napěťové sledovače / 72X91      |
| $R_{P1} - R_{P3}$       | Odpory       | Přizpůsobovací odpory vedení / 50 $\Omega$ |
| $R_1$                   | Odpor        | Odpor jako převodník (U/I) / 1k $\Omega$   |
| $R_A$                   | Odpor        | Odpor jako převodník (I/U) / 100 $\Omega$  |
| $R_B$                   | Odpor        | Odpor jako převodník (I/U) / 1k $\Omega$   |
| $C_1 - C_4$             | Kondenzátory | Blokovací / keramické 10/16V               |
| $C_5 - C_{10}$          | Kondenzátory | Blokovací u IO /100nF                      |
| 1 a 3                   | Svorky       | Pro napájecí přívody / AK500-3             |
| 2                       | Svorka       | Pro přívod výstupu z AD844 / AK500-3       |
| VSTUP, $U_Z$ , $U_{AB}$ | Plošky       | Pro BNC konektory                          |

Po návrhu došlo k samotné praktické části, připájení všech součástek, uskutečnění reálného měření na tomto prvku. Měření bylo prováděno pomocí obvodového analyzátoru AGIENT 4395A, jak již bylo popsáno v kapitole 4. Výsledky reálného měření byly zhodnoceny a následně porovnány se simulacemi u prvku AD844.

## 7.2 Reálné měření vybraných parametrů prvku AD844

Byly provedeny tři měření. Pro zjištění vstupní impedance jsme potřebovali znát poměr  $U_{IN}/U_Z$  jak je vidět ze vztahu (4.6).

$$Z_{IN} = R_1 \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_{IN}}{U_Z} - 1\right)} \quad (4.6)$$

U výstupní impedance bylo nutné změřit poměr napětí  $U_A/U_B$ , bez kterého bychom vztah (4.21) nevyřešili.

$$Z_{OUT} = \frac{1}{Y_{OUT}} = \frac{\frac{U_A}{U_B} - 1}{G_B - G_A \frac{U_A}{U_B}} \quad (4.21)$$

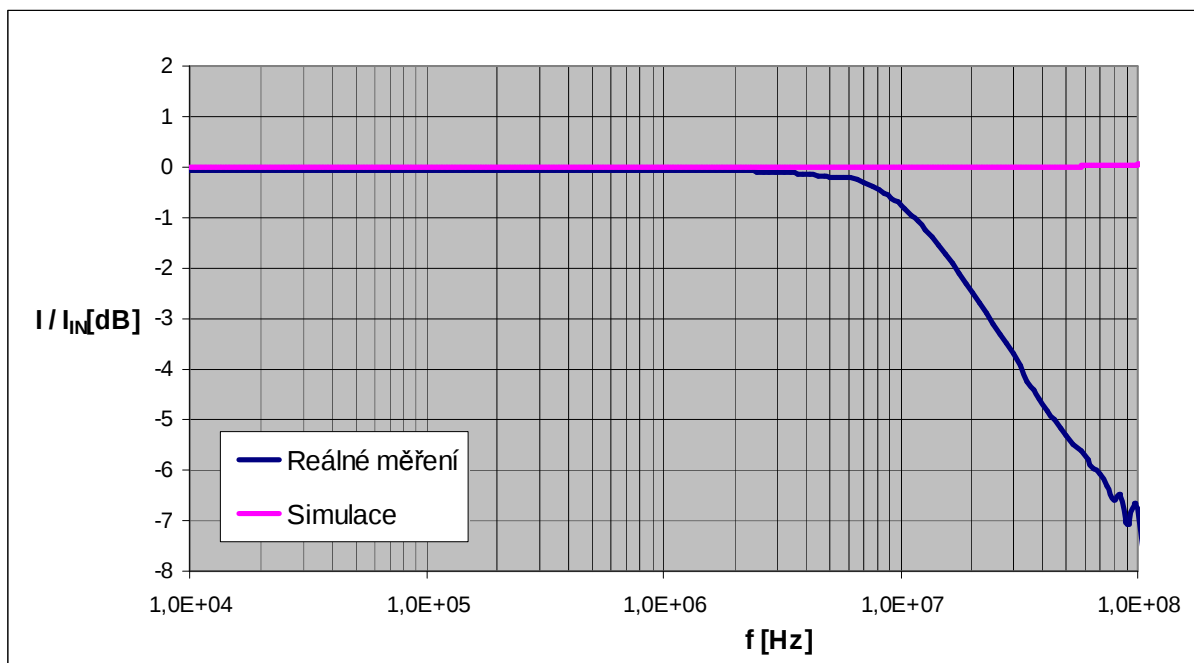
Ze vztahu pro výpočet proudového přenosu (4.12) jsme museli ještě navíc zjistit poměr  $U_A/U_{IN}$ .

$$\frac{I}{I_{IN}} = \left(\frac{U_A}{U_{IN}}\right) \left( \frac{G_B - G_A \frac{U_A}{U_B}}{\frac{U_A}{U_B} - 1} + G_A \right) \left( R_1 + R_1 \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_{IN}}{U_Z} - 1\right)} \right) \quad (4.12)$$

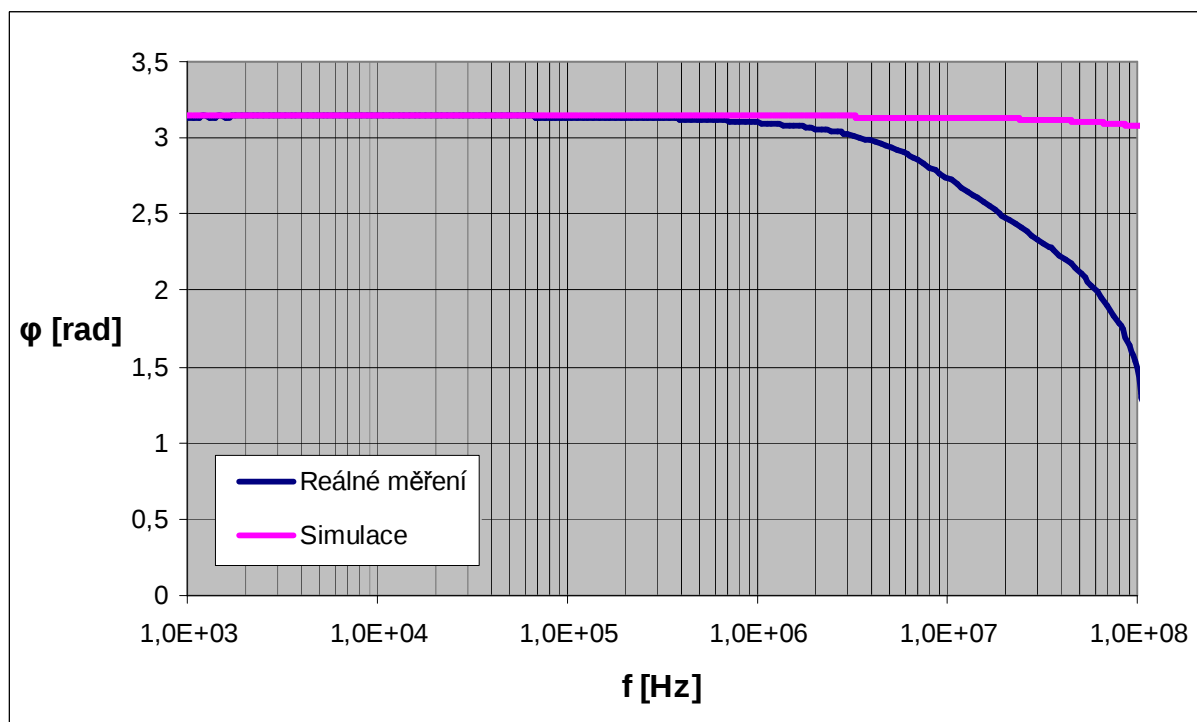
Naměřené hodnoty těchto tří poměrů byly pomocí synchronizace počítače s obvodovým analyzátozem AGIENT 4395A uloženy do prostředí Microsoft Excel. Microsoft Excel pro následné zacházení s komplexními čísly nebyl nejvhodnější, proto se výpočty podle těchto vztahů prováděly v programu Matlab. Vypočítané hodnoty byly dále zpracovány do grafických závislostí a porovnány se simulacemi. Reálné měření bylo uskutečněno v pásmu 1kHz - 100MHz při vyšších kmitočtech bylo měření ovlivněno parazitními vlivy.

## 7.3 Výsledky reálného měření prvku AD844 a porovnání se simulacemi měřící metody

### 7.3.1 Reálné měření AD844 – Měření proudového přenosu ( $I/I_{IN}$ )



**Obr.63:** Amplitudová charakteristika proudového přenosu AD844 – porovnání



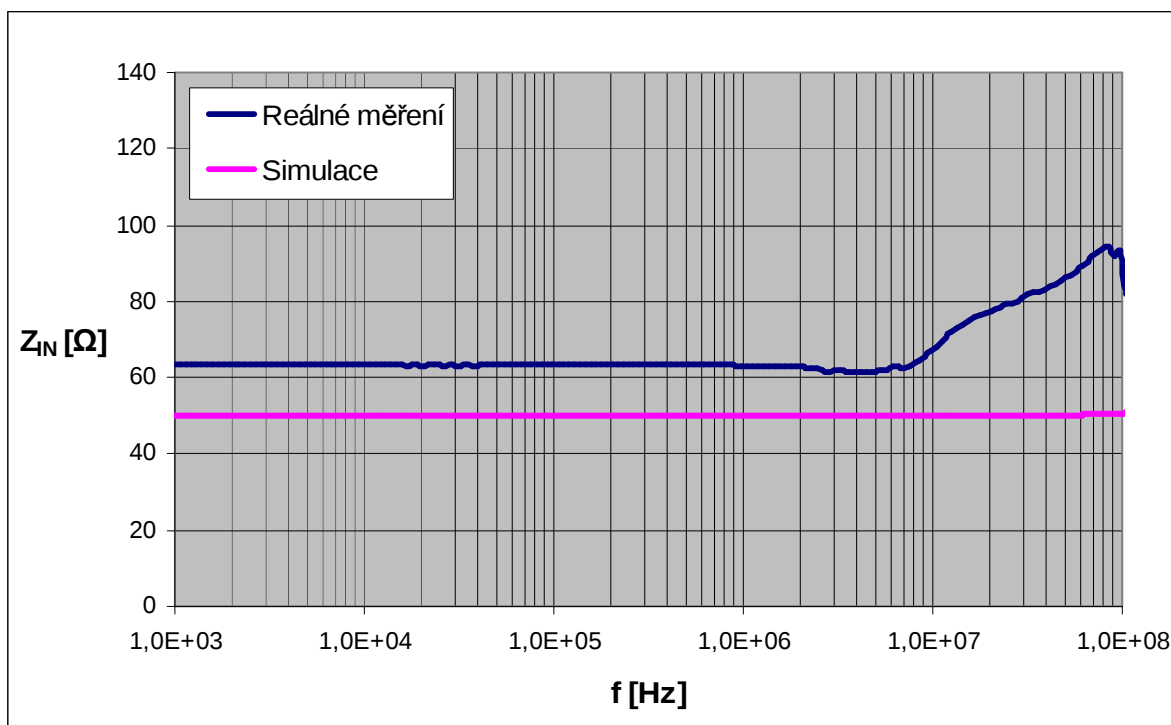
**Obr.64:** Fázová charakteristika proudového přenosu AD844 – porovnání

Na **Obr.63** je zobrazeno porovnání frekvenční charakteristiky proudového přenosu prvku AD844 při reálném měření se simulací měřící metody. Obě charakteristiky jsou do hodnoty frekvence 2,47MHz téměř shodné. Pro vyšší frekvence se charakteristika reálného měření začíná měnit. Pokles o  $-3\text{dB}$  je při frekvenci 24,55MHz. K poklesu průběhu dochází do hodnoty  $-7\text{dB}$  při frekvenci 100MHz. Je velmi pravděpodobné, že při vyšších frekvencích by hodnota útlumu stále klesala.

Pro PSpice model AD844 byla charakteristika proudového přenosu konstantní až do frekvence 63,7MHz.

Obdobně i porovnání fázových charakteristik proudového přenosu (**Obr.64**) ukazuje, že reálný obvod má horší vlastnosti nežli model v PSpice.

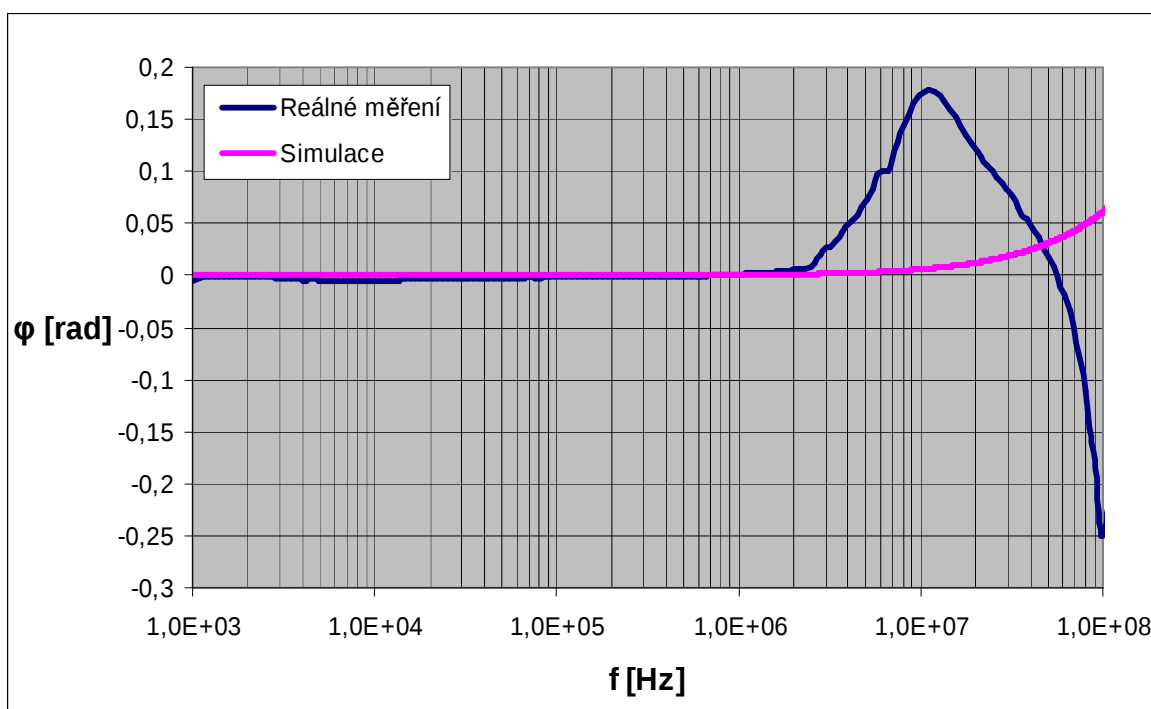
### 7.3.2 Reálné měření AD844 – Měření vstupní impedance ( $Z_{\text{IN}}$ )



**Obr.65:** Frekvenční charakteristika vstupní impedance AD844 – porovnání

Výrobce udává v katalogovém listě typickou hodnotu vstupní impedance  $50\Omega$ , a dále uvádí i její maximální hodnotu  $65\Omega$ . Z **Obr.65** je zřejmé, že simulovaný prvek AD844 v PSpice má typickou hodnotu  $50\Omega$ , při měření reálného prvku byla změřena hodnota vstupní impedance  $63,4\Omega$ , tedy se blížila maximální hodnotě.

Reálné měření ukázalo, že u vyšších kmitočtů (při 7MHz) dochází k růstu vstupní impedance, stejný růst byl zaznamenán i při simulaci, ale až od frekvence 63,5MHz. Tuto změnu má na svědomí kapacitní a indukční složka. Hodnoty těchto složek již byly určeny podle simulace náhradního obvodu vstupní impedance AD844 v kapitole 6.5. Stejná situace je vidět i na fázové charakteristice podle **Obr.66**.



**Obr.66:** Fázová charakteristika vstupní impedance AD844 – porovnání

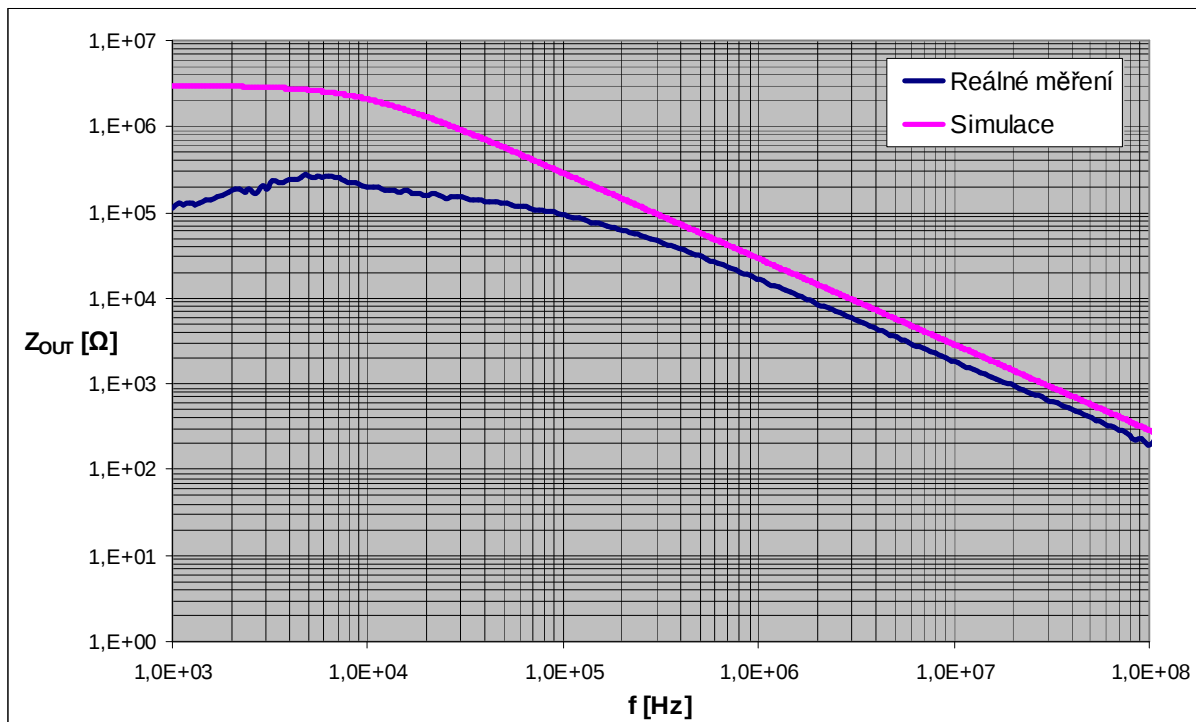
### 7.3.3 Reálné měření AD844 – Měření výstupní impedance ( $Z_{OUT}$ )

Výsledkem měření frekvenční charakteristiky a fázového posunu výstupní impedance jsou vyhodnoceny na **Obr.67** a **Obr.68**.

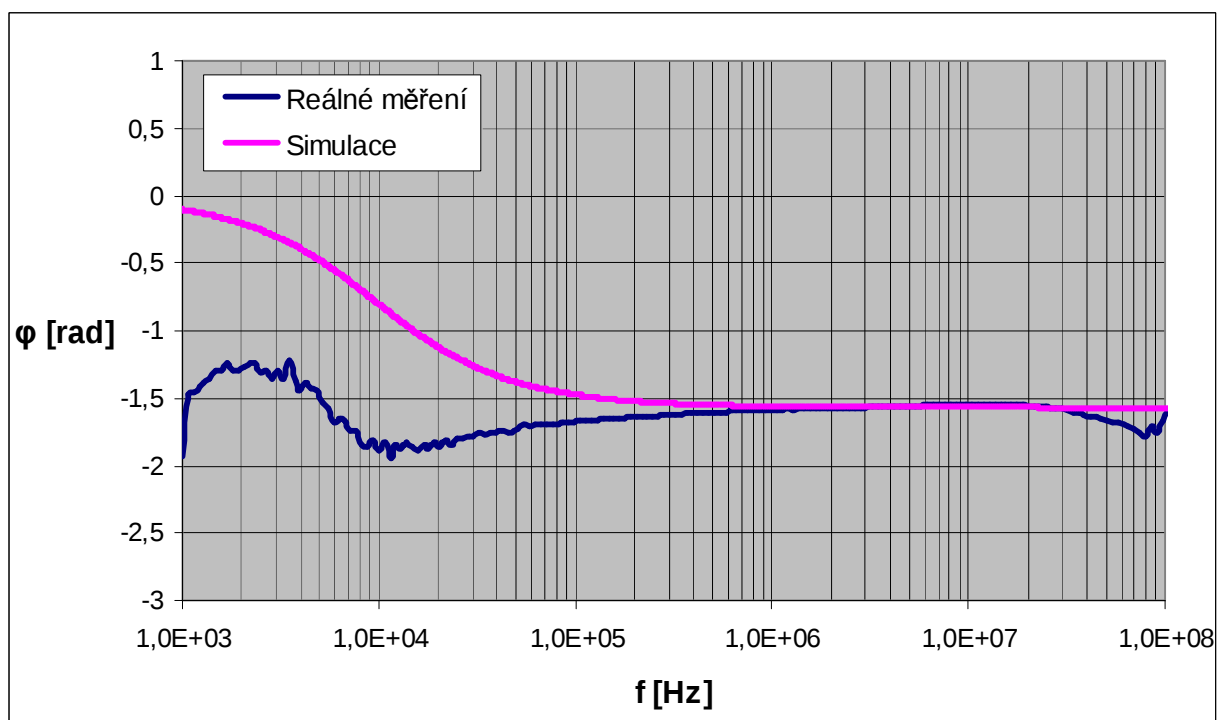
Měření výstupní impedance vnáší chybu, která se projevuje při nízkých kmitočtech. Chyba je zřejmě způsobena velkým rozdílem hodnot výstupní impedance a zatěžovacích odporů. Výstupní impedance se pohybuje v jednotkách MΩ (při nízkých frekvencích) a u naší měřicí metody je tato výstupní impedance měřena pomocí zatížení dvěma odpory o hodnotách mnohem nižších (oproti výstupní impedanci)  $R_A=100\Omega$  a  $R_B=1000\Omega$  viz kapitola 4.

Pokud bychom uvažovali, že výstupní impedance  $Z_{OUT}=1M\Omega$  a zatěžovací odpory jsou  $R_A=100\Omega$  a  $R_B=1000\Omega$ , byl by proud na odporu  $R_A$  10 000x větší, jak proud na výstupní impedanci  $Z_{OUT}$  a proud na odporu  $R_B$  1000x větší, jak proud

výstupní impedance  $I_{Z_{out}}$ . Tato chyba by byla minimalizována zvýšením hodnot zatěžovacích odporů  $R_A$  a  $R_B$ . Pro vysoké kmitočty výstupní impedance klesá, a tím i propastný rozdíl hodnot mezi  $Z_{OUT}$  a  $R_{A,B}$  a chyba se zmenšuje. Z **Obr.67** vyplývá, že při frekvenci kolem 100kHz dochází již k minimální chybě.



**Obr.67:** Frekvenční charakteristika výstupní impedance AD844 – porovnání



**Obr.68:** Fázová charakteristika výstupní impedance AD844 – porovnání

## 7.4 Zhodnocení výsledků reálného měření prvku AD844

Zobrazené výsledky v kapitole 7.3 vypovídají o chování prvku AD844 při reálném měření vůči simulaci. Je samozřejmé, že při reálném měření metody pro zjišťování vybraných parametrů prvků s CCCS vnášejí chyby.

Jedná se o celkovou chybu, která je způsobena nedodržením přesných podmínek měření, při kterých výrobce daný prvek zkoumal a i o další chyby vzniklé parazitními vlivy, nedokonalostí vyrobeného plošného spoje, atd. Některé chyby vznikly díky špatnému zvolení hodnot ( $R_{A,B}$ ).

Simulace se ukázaly jako dobrá průprava pro následné reálné měření. Při simulacích se reálné vlastnosti měřených prvků projevovaly méně (k projevu docházelo až při vyšších frekvencích). Zdá se, že PSpice model prvku AD844 má lepší parametry než skutečný prvek.

I přes popsání chyb se dá říci, že navržená metoda je pro kmitočtové pásmo 10kHz - 100MHz vhodná i pro reálné měření na aktivních prvcích s CCCS.

## 8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo prostudovat základní parametry aktivních obvodových prvků, které se uvádějí v jejich katalogových listech a následně stanovit metody pro určení některých základních parametrů těchto aktivních prvků. Stanovené metody zkoumaly tyto základní parametry aktivních prvků: proudový přenos, vstupní a výstupní impedanci obvodu.

Při návrhu metod bylo zpočátku uvažováno s ideálním stavem měřených prvků a postupně byly metody řešeny tak, aby vystihovaly skutečné měření. Výsledná metoda byla prověřena pomocí programu PSpice nejprve u modelu, který představoval CCCS s modelovanými vnitřními impedancemi, abychom se ujistili o správnosti metody a následně byly podrobeny k měření tyto aktivní prvky: transkondukcí širokopásmový zesilovač MAX435, vysokorychlostní monolitický operační zesilovač AD844 a univerzální monolitický prvek OPA660.

Měření byla dosti závislá na tom, jak je daný prvek namodelován v simulačním prostředí programu PSpice.

U prvku MAX435 bylo zjištěno, že v prostředí PSpice se chová spíše jako ideální zdroj proudu - vstupní impedance byla téměř nulová a výstupní impedance se blížila  $1\text{G}\Omega$  při nízkých frekvencích, s rostoucím kmitočtem pak klesala k nule. Proudový přenos byl konstantní v celé šířce pásma o hodnotě 12,04dB.

U AD844 se simulace více podobala skutečnému měření - vstupní impedance byla změřena o hodnotě  $50\Omega$  a postupně se zvyšovala při vyšších kmitočtech až do hodnoty  $120\Omega$ . V katalogu je výrobcem udávána hodnota vstupní impedance  $50\Omega$ . Z naměřené charakteristiky lze usoudit, že tato impedance má spíše induktivní charakter. Výstupní impedance byla změřena o hodnotě  $3\text{M}\Omega$ , která postupně klesala od hodnoty 1kHz. Frekvenční charakteristika proudového přenosu byla konstantní do kmitočtu 63,7MHz, pak postupně nabývá až do hodnoty 3,5dB.

Stejně jako měřený model AD844, tak i model OPA660 se choval reálněji než-li model MAX435. U proudového přenosu prvku OPA660 docházelo k útlumu při kmitočtu 34MHz, při hodnotě 1GHz byla hodnota útlumu -8,5dB. Hodnota vstupní impedance byla stanovena měřením na  $7,535\Omega$ , při vyšších kmitočtech docházelo k zanedbatelnému útlumu. Výstupní impedance je

konstantní do kmitočtu 340kHz, pak klesá z hodnoty  $28\text{k}\Omega$  až do hodnoty  $38\Omega$  při 1GHz.

Dále jsem se měl seznámit s integrovaným obvodem COAK, který obsahuje čtyři zdroje proudu řízené proudem s digitálně nastavitelným zesílením a také u tohoto prvku určit některé základní parametry. Vzorek COAKU, který byl předložen škole k testování, byl zřejmě nefunkční a nepodařilo se ho zprovoznit k měření, proto se praktické měření realizovalo na prvku AD844.

V samotné praktické části této práce bylo uskutečněno ověření navrhnuté metody pro zjištění vybraných parametrů prvků s CCCS na reálném prvku AD844. Nejprve však byla zhotovena deska s plošnými spoji, navrhnutá pomocí programu EAGLE a po zapájení příslušných součástek bylo provedeno reálné měření. Po zpracování výsledků byly výsledné grafické závislosti porovnány a zhodnoceny vůči simulacím.

U vstupní impedance prvku AD844 byl zjištěn vliv kapacitní a indukčností složky, které se zejména projevovaly při vysokých kmitočtech. Hodnoty těchto složek byly stanoveny po následné simulaci náhradního obvodu. Simulací byly změřeny tyto hodnoty složek:  $R=50\Omega$   $C=2\text{pF}$ ,  $L=10\text{nH}$ . Frekvenční charakteristika proudového přenosu nás přesvědčila, že původní předpoklad o orientaci výstupního proudu, byl špatný. Správná orientace výstupního proudu je směrem dovnitř měřeného obvodu AD844.

Navrhnutá metoda se při simulacích chovala odolněji vůči parazitním vlivům, a proto dosahovala lepších výsledků. Reálné měření navrhnuté metody bylo pro pásmo frekvencí (1kHz - 100MHz) vyhovující, i přes některé chyby způsobené parazitními vlivy.

## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

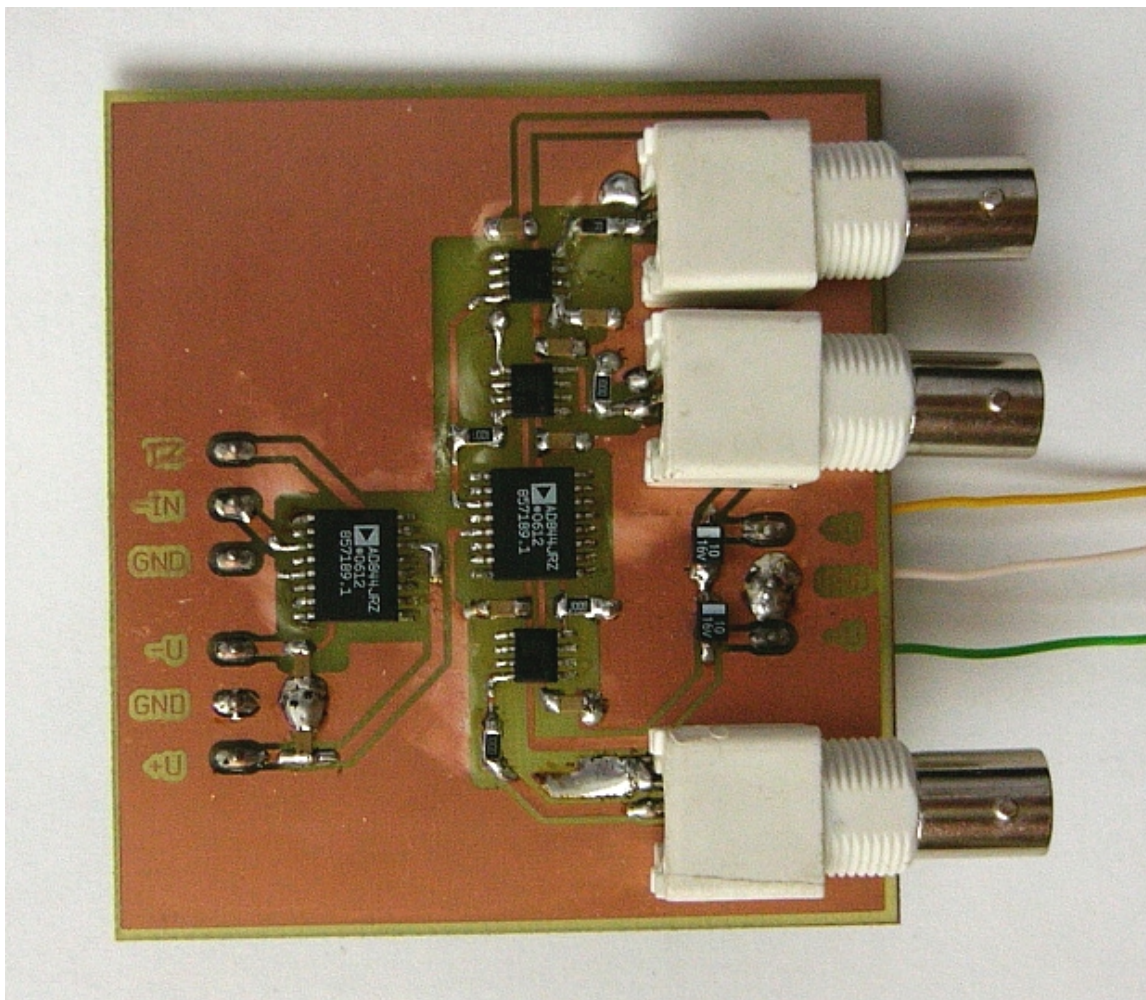
- [1] Kubánek, D. Kmitočtové filtry s proudovými a napěťovými konvejory. Disertační práce. Brno, Česká republika, VUT v Brně, 2006
- [2] Šponar, R., Vrba, K., Kubánek, D. Universal Current Conveyor and Universal Voltage Conveyor Measurements and Modelling. In International Conference on Systems. Los Alamitos, USA, 2006, s. 175-178. ISBN 0-7695-2552-0
- [3] Punčochář Josef, D. Operační zesilovače v elektronice. BEN, Česká republika, 2002, ISBN 80-7300-059-8
- [4] Maňátko, D. Elektronika. Idea Servis, Česká republika, 2002, ISBN: 80-85970-42-2.
- [5] MAX435, MAX436 - rychlé širokopásmové zesilovače. Webový portál hw.cz, 2003. URL: <http://hw.cz/Produkty/Nove-soucastky/ART848-MAX435-MAX436---rychle-sirokopasmove-zesilovace.html>
- [6] MAX435/MAX436 – Wideband Transconductance Amplifiers. Datasheet, Maxim, 1993. URL: <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/dsMAX435-MAX436.pdf>
- [7] AD844 – 60 MHz, 2000V/ $\mu$ s Monolithic Op Amp. Datasheet, Analog Devices, 2003. URL: [http://www.analog.com/UploadedFiles/Data\\_Sheets/164715713AD844\\_e.pdf](http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/164715713AD844_e.pdf)
- [8] OPA660 – Wide Bandwidth Operational Transconductance Amplifier and Buffer. Datasheet, Burr Brown 2003. URL: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa660.pdf>

## SEZNAM PŘÍLOH

**Příloha 1:** Obrázek vytvořené plošné desky pro měření navrhnuté metody prvku AD844

**Příloha 2:** CD nosič

**Příloha 1:** Obrázek vytvořené plošné desky pro měření navrhnuté metody prvku AD844



**Příloha 2: Nosič CD**

| <b>ADRESÁŘ</b>         | <b>POPIS</b>                           |
|------------------------|----------------------------------------|
| Diplomová práce - text | Diplomová práce v elektronické podobě. |
| Program EAGLE          | Návrh desky plošných spojů.            |
| Program PSpice         | Schémata zapojení pro simulace.        |
| Program EXCEL          | Naměřené hodnoty a výsledky.           |
| Použité obrázky        | Obrázky, které práce obsahuje.         |