

# Měření přechodových dějů na RC soustavách

Measurement of transient processes on the RC systems

Jakub Krčmář

---

Bakalářská práce  
2010

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub KRČMÁŘ**

Osobní číslo: **A07306**

Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**

Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**

Téma práce: **Měření přechodových dějů na RC soustavách**

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte doporučenou literaturu a zpracujte literární rešerši na dané téma.
2. Seznamte se s obsahem softwarového balíku Vee Pro a se základními principy programování v tomto jazyce.
3. Navrhněte a realizujte několik typů RC soustav vhodných pro výukové účely.
4. V programovém prostředí VEE Pro vytvořte uživatelskou aplikaci schopnou, jak simulačně, tak i reálně, ověřit změny tvarů signálů průchodem danými soustavami.
5. Navrhněte laboratorní úlohu do předmětu Zpracování signálů, proveďte měření a vypracujte vzorový protokol.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Sedláček, M.: Zpracování signálů v měřicí technice. Dotisk 2. vyd. – Praha : ČVUT, 1999.**
2. **Angus R., Hulbert T.: VEE Pro: Practical Graphical Programming, Springer 2004.**
3. **Láníček R.: Obvody, součástky, děje, BEN 2004.**
4. **Žalud V.: Moderní radioelektronika, BEN 2000.**
5. **Dietmeier U.: Vzorce pro elektroniku, BEN 2007.**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Milan Navrátil, Ph.D.**

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

**5. března 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**1. června 2010**

Ve Zlíně dne 5. března 2010

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Ivan Zelinka, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je vytvořit laboratorní úlohu do předmětu „Zpracování signálů“ pro měření přechodových dějů na RC soustavách. Měřená soustava obsahuje integrační

a derivační články prvního řádu. Doplnkem k této práci je měření amplitudovo – fázových charakteristiky (AFCH) na stejné soustavě. Veškeré měření se provádí pomocí softwaru a přístrojů od firmy Agilent Technologies. Programy pro obsluhu přístrojů jsou vytvářeny v graficky orientovaném prostředí Agilent Vee Pro 9.0. Práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou část. V teoretické části je matematický popis přechodového děje a AFCH pro měřenou soustavu. V praktické části je popis výroby měřené soustavy a realizace programů ovládající jednotlivá měření.

Klíčová slova: Vee Pro 9.0, Agilent Technologies, RC soustavy, přechodový děj, amplitudovo – fázová charakteristika

## ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to create laboratory assignment for subject "Signal processing" containing measurement of transient processes on RC systems.

The measured system consists of integrative and derivate cells of the first order. It also includes the measurement of amplitude - phase characteristics (APCH) on the same system. All measurements are accomplished by using of software and instruments from Agilent Technologies. Program for instrument control are created in graphically orientated software Agilent Vee Pro 9.0. The bachelor thesis is divided into two parts - theoretical and practical. The mathematic description of the transient process and APCH for measured system

is given in the theoretical part. The description of the implementation of the system and programs is mentioned in the practical part.

Keywords: Vee Pro 9.0, Agilent Technologies, RC systems, transient process, amplitude – phase characterization

*Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří se podíleli na zdárném dokončení mé bakalářské práce. Za podněty, návrh a nápady, které mi byly inspirací. Především mému vedoucímu, panu Ing. Milanu Navrátilovi, Ph.D. za jeho ochotu, vedení a spolupráci při řešení problémů spojené s prací.*

**Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....

podpis diplomanta

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 RC ČLENY</b> .....	<b>11</b>
1.1 INTEGRAČNÍ ČLÁNEK.....	12
1.1.1 Matematický popis .....	12
1.1.2 Zatížený integrační článek.....	15
1.1.3 Přechodový děj.....	16
1.2 DERIVAČNÍ ČLÁNEK .....	18
1.2.1 Matematický popis .....	18
1.2.2 Zatížený derivační článek.....	20
1.2.3 Přechodový děj.....	21
<b>2 AMPLITUDOVO – FÁZOVÉ CHARAKTERISTIKY (AFCH)</b> .....	<b>22</b>
2.1 MATEMATICKÝ POPIS .....	23
2.2 MĚŘENÍ AMPLITUDOVÉ CHARAKTERISTIKY .....	23
2.3 MĚŘENÍ FÁZOVÉ CHARAKTERISTIKY .....	24
2.4 AFCH INTEGRAČNÍHO ČLÁNKU (MATEMATICKÝ POPIS).....	26
2.5 AFCH DERIVAČNÍHO ČLÁNKU (MATEMATICKÝ POPIS) .....	27
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>29</b>
<b>3 MĚŘENÁ SOUSTAVA</b> .....	<b>30</b>
3.1 NÁVRH.....	30
3.2 VÝROBA .....	30
<b>4 MĚŘICÍ PROSTŘEDKY</b> .....	<b>37</b>
4.1 SOFTWARE VEE PRO 9.0.....	37
4.2 OSCIOSKOP AGILENT DSO3260A .....	39
4.3 GENERÁTOR AGILENT 33220A.....	42
<b>5 SIMULACE</b> .....	<b>45</b>
5.1 SIMULACE PŘECHODOVÉHO DĚJE INTEGRAČNÍHO ČLÁNKU .....	45
5.2 SIMULACE PŘECHODOVÉHO DĚJE DERIVAČNÍHO ČLÁNKU .....	48
5.3 SIMULACE AFCH.....	51
<b>6 MĚŘENÍ</b> .....	<b>54</b>
6.1 MĚŘENÍ PŘECHODOVÉHO DĚJE INTEGRAČNÍHO ČLÁNKU .....	54
6.2 MĚŘENÍ AFCH.....	58
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>62</b>
<b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ</b> .....	<b>63</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>65</b>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	67
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	69
SEZNAM PŘÍLOH.....	72



## ÚVOD

Předmětem této bakalářské práce je vytvoření laboratorní úlohy do předmětu „Zpracování signálů“. Navržené laboratorní úlohy se zabývají měřením přechodových dějů na RC soustavách. Doplnkem k této laboratorní úloze je měření amplitudovo – fázových charakteristik (AFCH). Měřená soustava by neměla být složitá z důvodu pochopení problematiky týkající se měření a následného analyzování naměřených dat. Měření je prováděno pomocí softwaru Agilent Vee Pro 9.0, který komunikuje s přístroji od firmy Agilent Technologies.

Měření přechodových dějů není komplikovaná laboratorní úloha, je vytvořena za účelem naučení se procvičení práce s uživatelským softwarem vytvořeným v prostředí Vee Pro 9.0, pomocí kterého lze jednoduše ovládat použité přístroje.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je rozebrán a popsán matematický popis přechodového děje na soustavách prvního řádu, stejně tak jako vykreslování AFCH.

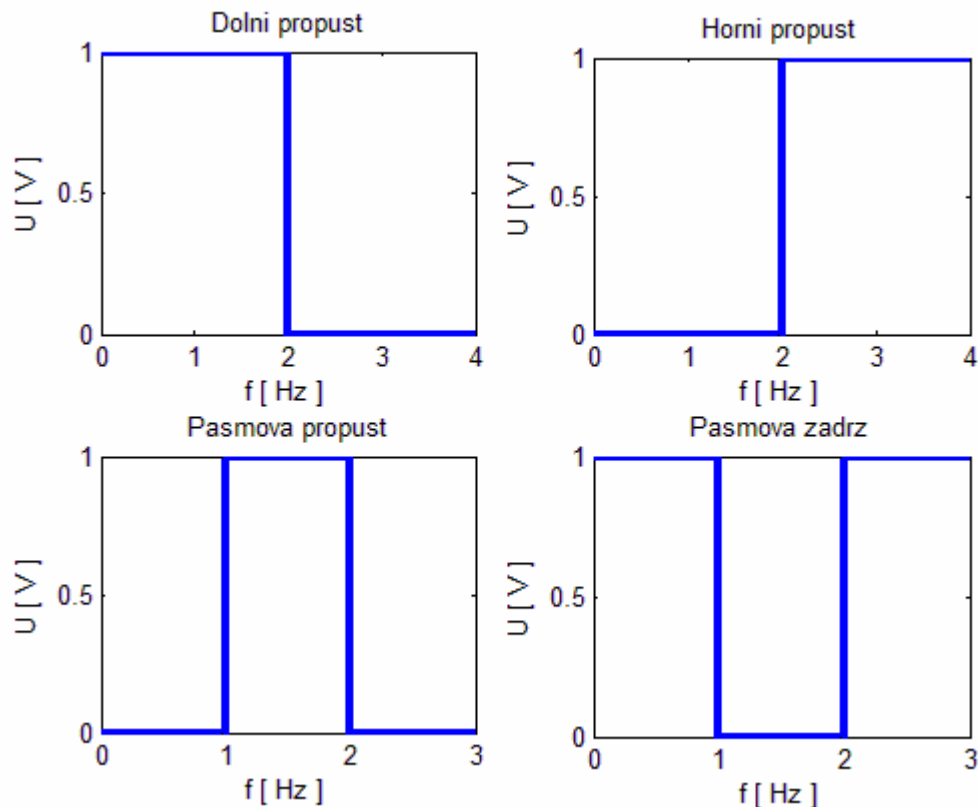
Praktická část je rozdělena na celky, kde je zvlášť popsána výroba a návrh měřené soustavy, popis použitého softwaru a přístrojů, simulace přechodových dějů včetně vykreslení AFCH a nakonec jejich reálné měření.

Simulace přechodových dějů byla začleněna do laboratorní úlohy z důvodu, aby student měl představu o tom, čeho má dosáhnout při měření. Simulace také slouží pro výpočet časové konstanty a mezní frekvence, tím si může student své výpočty ověřit.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 RC ČLENY

RC členy můžeme chápat jako frekvenční filtry, jejichž účelem je buďto zamezit, nebo naopak, propustit danou frekvenci. RC filtr může být typu dolní propust', horní propust', pásmová propust', nebo pásmová zadrž.



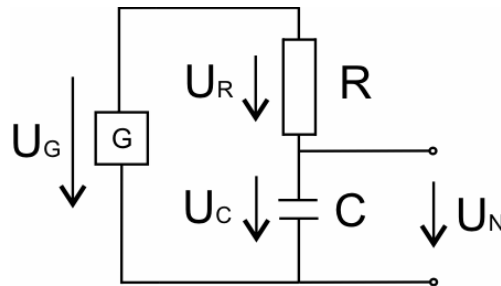
Obr. 1 - Ukázka typů propustí RC filtrů

RC filtry mohou být popsány jako dvojbrany impedanční, admitanční, hybridní sériově paralelní, hybridní paralelně sériovou, kaskádní a zpětně kaskádní rovnicí. Při řešení popisu integračního a derivačního článku bylo použito impedančního (napět'ového) přenosu.

U RC filtrů se určuje, kolikátého řádu je daný filtr. Určí se to podle počtu setrvačných prvků, které filtr obsahuje. V našem případě se jednalo vždy o filtry 1. řádu a proto rovnice popisující RC členy budou vždy diferenciální rovnice prvního řádu.

## 1.1 Integrační článek

Integrační článek je frekvenční filtr typu dolní propusti. Propouští tedy frekvence nižší než je frekvence mezní. Frekvence vyšší než je mezní frekvence utlumuje. Schéma zapojení je na obrázku (Obr. 2).



Obr. 2 – Schéma zapojení integračního článku

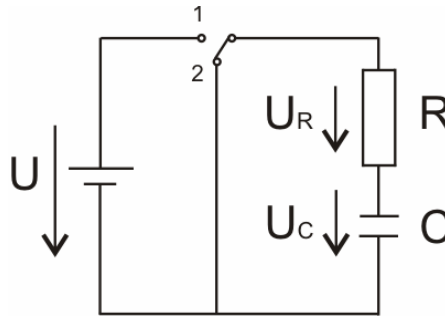
Kondenzátor má vlastnost uchovávat energii v podobě elektrostatického pole, tudíž má podobnou vlastnost jako akumulátor, až na velikost a dobu uchování energie. Pokud kondenzátor přinutíme ke změně, čí velikosti náboje, tak můžeme pozorovat přechodový děj. Tedy nabíjení a vybíjení kondenzátoru. [11],[16]

Změny mohou být způsobeny:

- Změnou parametru aktivního prvku (např. připojením nebo odpojením zdroje napětí nebo proudu, změnou průběhu vstupního signálu – obdélníkový, sinusový, pilovitý průběh).
- Změnou parametru pasivního prvku (např. zvětšením, nebo zmenšením hodnoty R, C).
- Změnou topologické struktury obvodu zapojení (např. zkratováním větve, případně připojením další větve).

### 1.1.1 Matematický popis

Při odvozování přenosu integračního článku byly určeny počáteční podmínky  $U_0 = 0$  V, dále také, že přepínač na obrázku (Obr. 3) v poloze 1, je pro nabíjení kondenzátoru a poloha 2, je pro vybíjení kondenzátoru. Přepínač by se dal nahradit tehdy, pokud bychom jako vstupní signál použili obdélníkový průběh napětí.



Obr. 3 – Zapojení integračního článku pro odvození přenosu

Pokud je na kondenzátoru nulové napětí, tak má nulový elektrický náboj. To také vyplývá z rovnice:

$$Q = C \cdot U. \quad (1.1.1.1)$$

Při nabíjení nebo vybíjení je na svorkách kondenzátoru napětí s časem se mění podle vztahu:

$$u_C(t) = \frac{q(t)}{C}. \quad (1.1.1.2)$$

Při nabíjení (Obr. 3, poloha 1) teče obvodem proud o velikosti:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = \frac{u_R(t)}{R}. \quad (1.1.1.3)$$

Jelikož protékající proud způsobuje na rezistoru R úbytek napětí  $u_R(t)$ , tak podle II. Kirchhoffova zákona platí:

$$U = u_C(t) + u_R(t) = \frac{q(t)}{C} + R \cdot i(t), \quad (1.1.1.4)$$

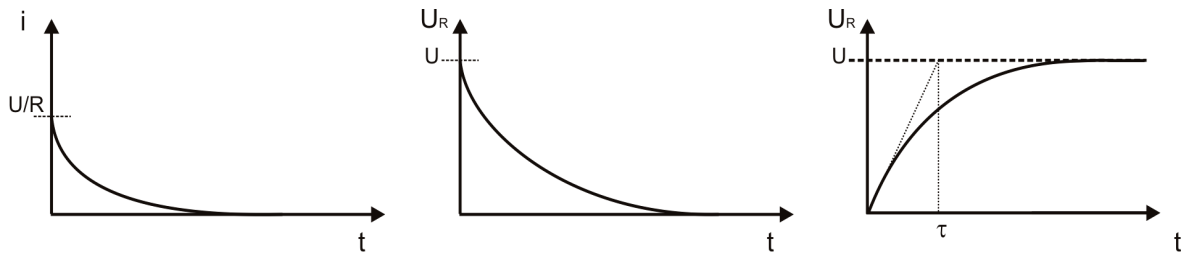
po úpravě:

$$\frac{U}{R} = \frac{q(t)}{C \cdot R} + i(t) = \frac{q(t)}{C \cdot R} + \frac{dq}{dt}. \quad (1.1.1.5)$$

Po vyřešení rovnice (1.1.1.5) získáme pro jednotlivá napětí na kondenzátoru a rezistoru vztahy:

$$u_C(t) = U \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) = U \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (1.1.1.6)$$

$$u_R(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1.1.1.7)$$



Obr. 4 – Průběh proudu  $i$ , napětí na rezistoru  $u_R$ , napětí na kondenzátoru  $u_C$  při nabíjení integračního článku

Při vybíjení (Obr. 3, poloha 2) začne obvodem téci proud opačným směrem, ale jen za podmínky, pokud byl předtím kondenzátor nabit. Při vybíjení kondenzátoru platí, že součet úbytků napětí na kondenzátoru a na rezistoru se musí rovnat 0, tedy:

$$u_C(t) + u_R(t) = 0 \Rightarrow u_R(t) = -u_C(t), \quad (1.1.1.8)$$

po dosazení do vztahu (1.1.1.8) za  $u_R(t)$  a  $u_C(t)$  dostaneme vztah:

$$u_C(t) + u_R(t) = \frac{q(t)}{C} + R \cdot i(t) = \frac{q(t)}{C} + R \cdot \frac{dq}{dt}. \quad (1.1.1.9)$$

Řešením rovnice (1.1.1.9) získáme pro jednotlivá napětí na kondenzátoru a rezistoru vztahy:

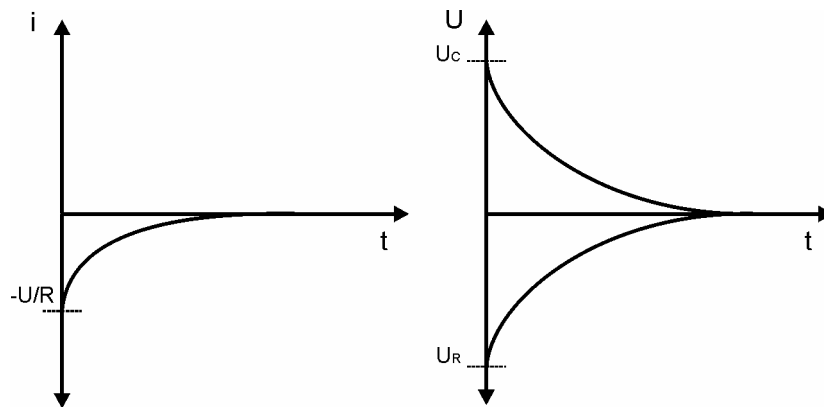
$$u_C(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1.1.1.10)$$

$$u_R(t) = -U \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = -U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1.1.1.11)$$

Pro protékající proud obvodem, který teče opačným směrem než při nabíjení, dostaneme vztahy:

$$i(t) = \frac{u_R(t)}{R}, \tag{1.1.1.12}$$

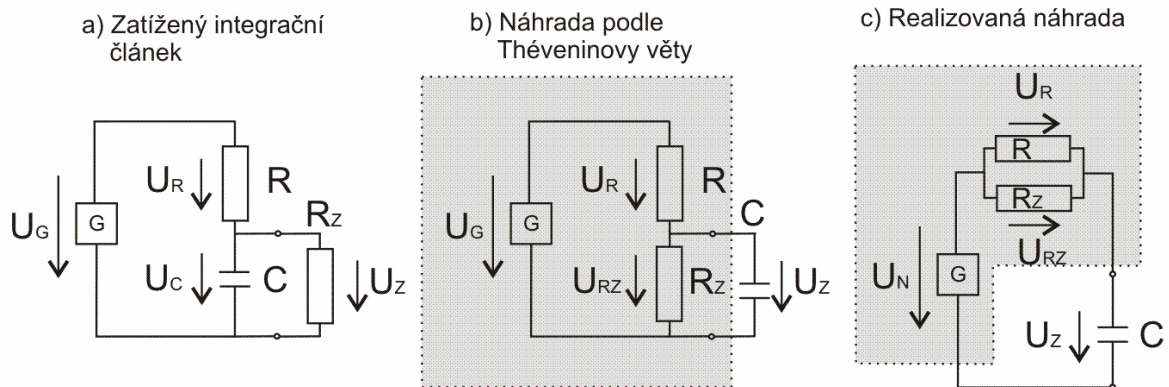
$$i(t) = -\frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = -\frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \tag{1.1.1.13}$$



Obr. 5 - Průběh proudu  $i$ , napětí na rezistoru  $u_R$  a napětí na kondenzátoru  $u_C$  při vybíjení kondenzátoru

### 1.1.2 Zatížený integrační článek

Integrační článek po překreslení je vlastně impedanční dělič, neboli dělič napětí. Zatížený integrační článek pak přechází na zatížený impedanční dělič, který je zobrazen na obrázku (Obr. 6a).



Obr. 6 – Schéma zapojení zatíženého integračního článku, náhradního zapojení pomocí Théveninovy věty a realizovaná náhrada zatíženého integračního článku.

Podle Théveninovy věty je nejdříve nutné vypočítat výstupní napětí nezatíženého impedančního děliče. Tedy bez zapojeného kondenzátoru podle obrázku (Obr. 6b), který je definován vztahem:

$$U_N = \frac{R_Z}{R + R_Z} \cdot U_G \quad (1.1.2.1)$$

Pomocí vzorce (1.1.2.1) získáme nové vstupní napětí pro zatížený integrační členek. Poté můžeme odvodit vztah pro  $U_Z$  z obrázku (Obr. 6c):

$$\begin{aligned} u_Z &= \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{R \cdot R_Z}{R + R_Z} + \frac{1}{j\omega C}} \cdot u_N(j\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{R \cdot R_Z}{R + R_Z} + \frac{1}{j\omega C}} \cdot \frac{R_Z}{R + R_Z} \cdot u_G(j\omega) = \\ &= \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{(R \parallel R_Z)}{1} + \frac{1}{j\omega C}} \cdot \frac{R_Z}{R + R_Z} \cdot u_G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega C(R \parallel R_Z)} \cdot \frac{R_Z}{R + R_Z} \cdot u_G(j\omega) \end{aligned} \quad (1.1.2.2)$$

kde časová konstanta zatíženého integračního članku je:

$$\tau_Z = C(R \parallel R_Z) = \frac{R \cdot R_Z}{R + R_Z} \cdot C \quad (1.1.2.3)$$

Výsledná hodnota odporu rezistorů  $R$  a  $R_Z$  bude mít hodnotou odporu vždy menší, než největší odpor z rezistorů  $R$  a  $R_Z$ . To znamená, že časová konstanta  $\tau$  bude menší a mezní kmitočet derivačního članku se zvýší.

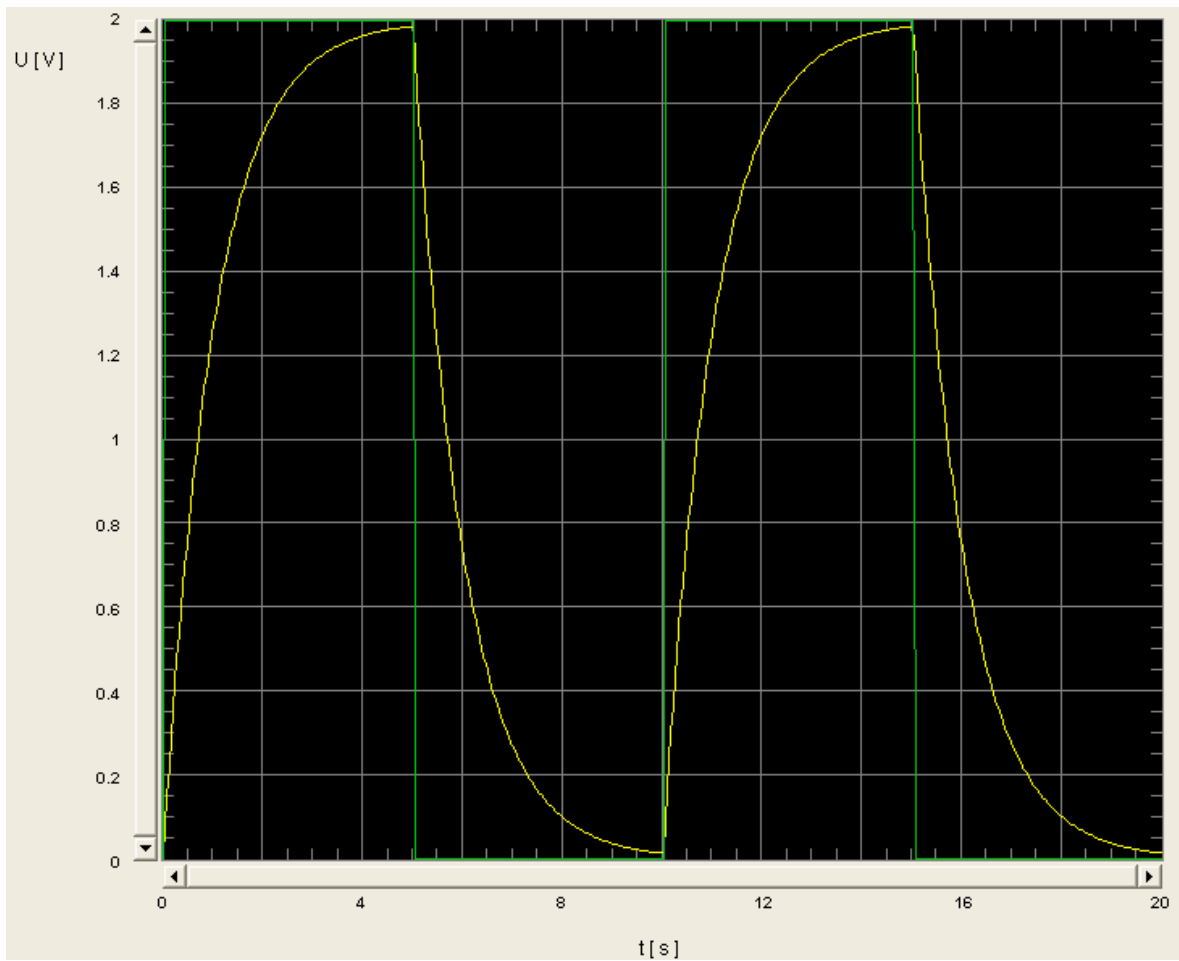
### 1.1.3 Přechodový děj

Při měření přechodové charakteristiky integračního članku je dobré znát, za jak dlouhou dobu se přechodový děj ustálí:

- za dobu  $t = \tau$  se kondenzátor nabije na 63,2 % hodnoty vstupního napětí ( $U_G$ ).
- za dobu  $t = 3\tau$  se kondenzátor nabije na 95 % hodnoty vstupního napětí ( $U_G$ ).
- za dobu  $t = 5\tau$  se kondenzátor nabije na 99,3 % hodnoty vstupního napětí ( $U_G$ ).



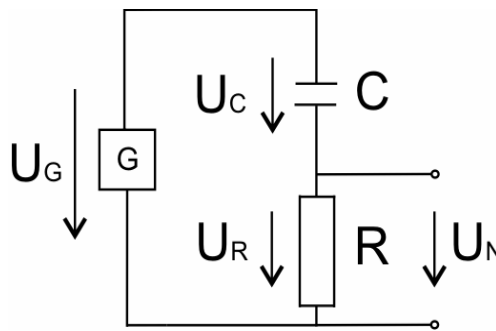
- při delším zvětšování doby  $t$  než je  $5\tau$  se přechodová charakteristika integračního článku výrazně nemění. [11]



Obr. 7– Ukázka přechodového děje integračního článku pro parametry  $\tau = 1$  s a  $T = 10$  s

## 1.2 Derivační článek

Derivační článek je frekvenční filtr typu horní propusti. Propouští tedy frekvence vyšší než je frekvence mezní. Frekvence nižší než je mezní frekvence utlumuje. Schéma zapojení je na obrázku (Obr. 8).



Obr. 8 – Schéma zapojení derivačního článku

Kondenzátor má vlastnost uchovávat energii v podobě elektrostatického pole, tudíž má podobnou vlastnost jako akumulátor, až na velikost a dobu uchování energie. Pokud soustavu přinutíme ke změně, tak můžeme pozorovat přechodový děj. Tedy nabíjení a vybíjení kondenzátoru. [11], [16]

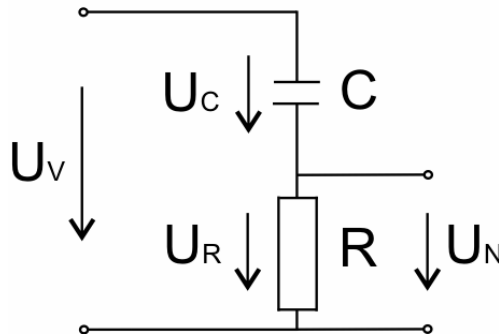
Změny mohou být způsobeny:

- Změnou parametru aktivního prvku (např. připojením nebo odpojením zdroje napětí nebo proudu, změnou průběhu vstupního signálu – obdélkový, sinusový, pilovitý průběh).
- Změnou parametru pasivního prvku (např. zvětšením, nebo zmenšením hodnoty  $R$ ,  $C$ ).
- Změnou topologické struktury obvodu zapojení (např. zkratováním větve, případně připojením další větve).

### 1.2.1 Matematický popis

Derivační článek je charakteristický tím, že reaguje jen na změnu vstupního signálu. Pokud jako vstupní signál do měřené soustavy, která je zobrazena na obrázku (Obr. 9) použijeme stejnosměrné napětí, tak se kondenzátor nabije na jmenovité vstupní napětí a toto napětí

si ponechá až do doby, než vstupní napětí klesne na 0 V. Při vybíjení se derivační článek vybíjí rychlostí podle časové konstanty  $\tau$ . Pokud bychom chtěli vyvolat další přechodový děj, tak bychom museli vykonat určitou změnu popsanou v předešlé kapitole. Je to z důvodu toho, že derivace konstanty je rovna nule.



Obr. 9 – Schéma zapojení derivačního článu pro matematický popis

Dále máme možnost jako vstupní signál do měřené soustavy použít obdélníkový průběh napětí. Tento tvar vstupního napětí, pokud dodržujeme střídu 1:1, generuje změnu, která vyvolá přechodový děj derivačního článu. Rychlost změny polarity přechodového děje je závislá na frekvenci vstupního signálu.

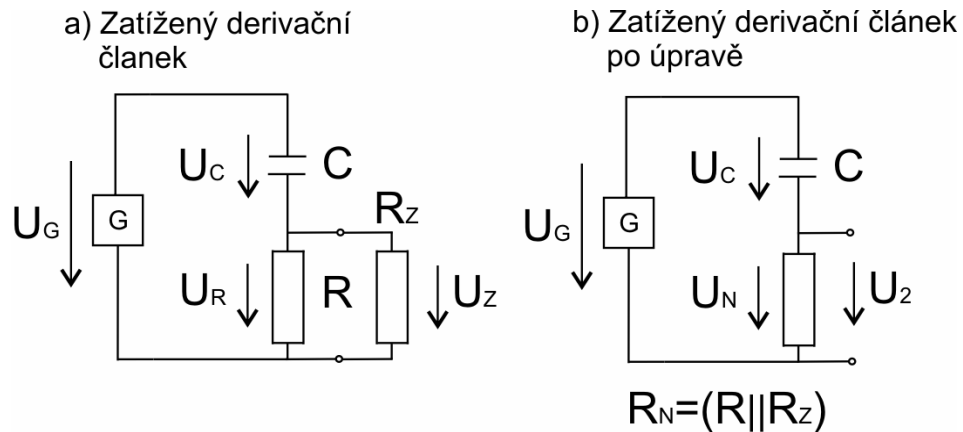
Výstupní veličinou z měřené soustavy je úbytek napětí na rezistoru. Tento úbytek napětí jsme již popsali v kapitole 1.1.1, kde rovnici (1.1.1.11) upravíme na vztah:

$$u_R(t) = \pm U_G \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = \pm U_G \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1.2.1.1)$$

kde znaménko + je pro kladné vstupní napětí a znaménko – pro záporné vstupní napětí.

### 1.2.2 Zatížený derivační článek

Derivační článek po překreslení je vlastně impedanční dělič, neboli dělič napětí. Zatížený derivační článek pak přechází na zatížený impedanční dělič, který je zobrazen na obrázku (Obr. 10a).



Obr. 10 – Schéma zapojení zatíženého derivačního článku a upraveného zatíženého derivačního článku

Obvod na obrázku (Obr. 10a) je zatížen rezistorem  $R_Z$ . Rezistor  $R$  a  $R_Z$  jsou zapojeny paralelně, proto je můžeme nahradit pomocí vztahu:

$$R_N = \frac{R \cdot R_Z}{R + R_Z} . \quad (1.2.2.2)$$

Nyní když známe hodnotu rezistoru  $R_N$ , tak můžeme definovat vztah, který popisuje výstupní napětí zatíženého derivačního článku. Tento vztah je popsán:

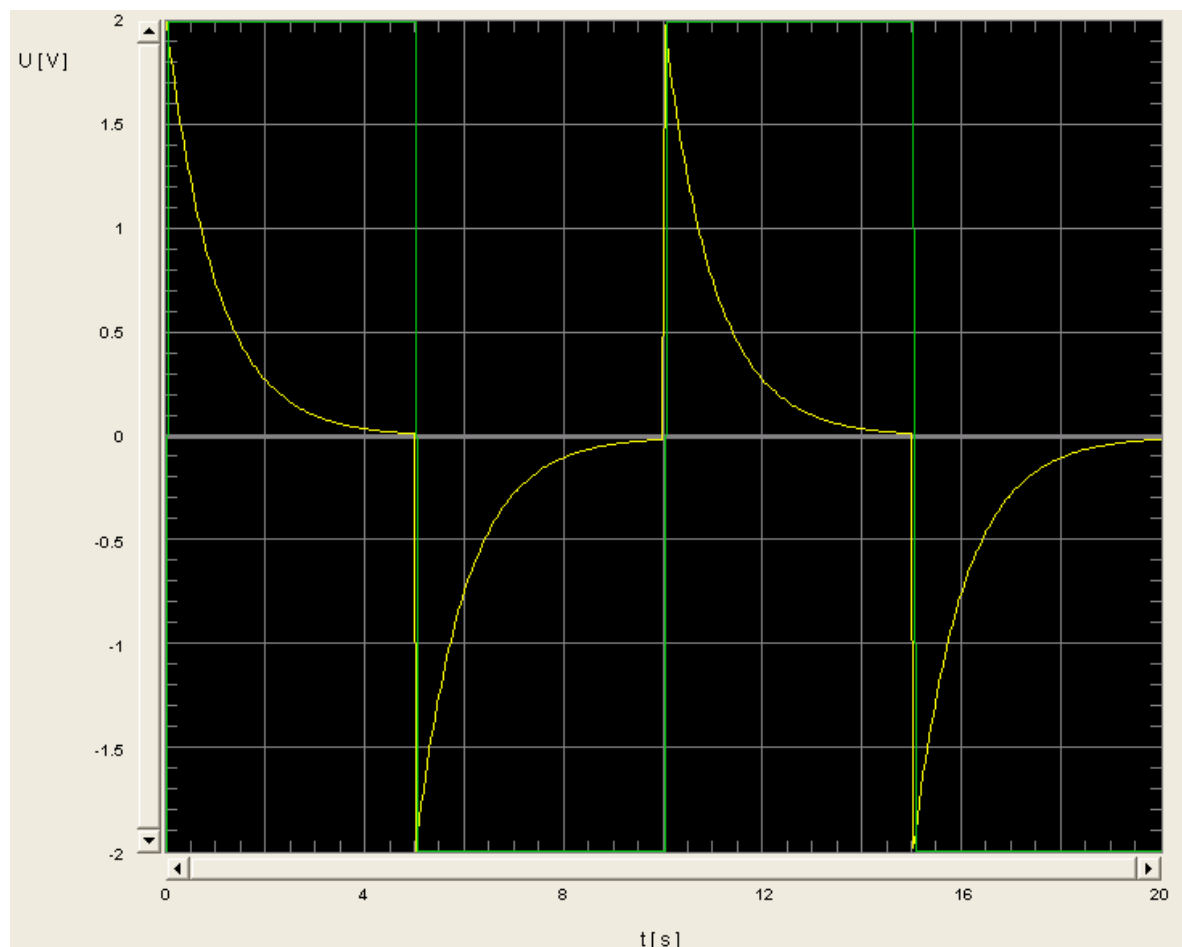
$$u_2(j\omega) = \frac{R_N}{R_N - j\frac{1}{\omega C}} \cdot u_G(j\omega) = \frac{j\omega C R_N}{1 + j\omega C R_N} \cdot u_G(j\omega) . \quad (1.2.2.3)$$

Rezistor  $R_N$  bude mít hodnotou odporu vždy menší, než největší odpor z rezistorů  $R$  a  $R_Z$ . To znamená, že časová konstanta  $\tau$  bude menší a mezní kmitočet derivačního článku se zvýší.

### 1.2.3 Přejchodový děj

Při měření přechodové charakteristiky integračního článku je dobré znát, za jak dlouhou dobu se přechodový děj ustálí:

- za dobu  $t = \tau$  se kondenzátor nabije na 63,2 % hodnoty vstupního napětí ( $U_G$ ).
- za dobu  $t = 3\tau$  se kondenzátor nabije na 95 % hodnoty vstupního napětí ( $U_G$ ).
- za dobu  $t = 5\tau$  se kondenzátor nabije na 99,3 % hodnoty vstupního napětí ( $U_G$ ).
- při delším zvětšování doby  $t$  než je  $5\tau$  se přechodová charakteristika integračního článku výrazně nemění. [11]



Obr. 11 – Ukázka přechodového děje derivačního článku pro parametry  $\tau = 1$  s a  $T = 10$  s

## 2 AMPLITUDOVO – FÁZOVÉ CHARAKTERISTIKY (AFCH)

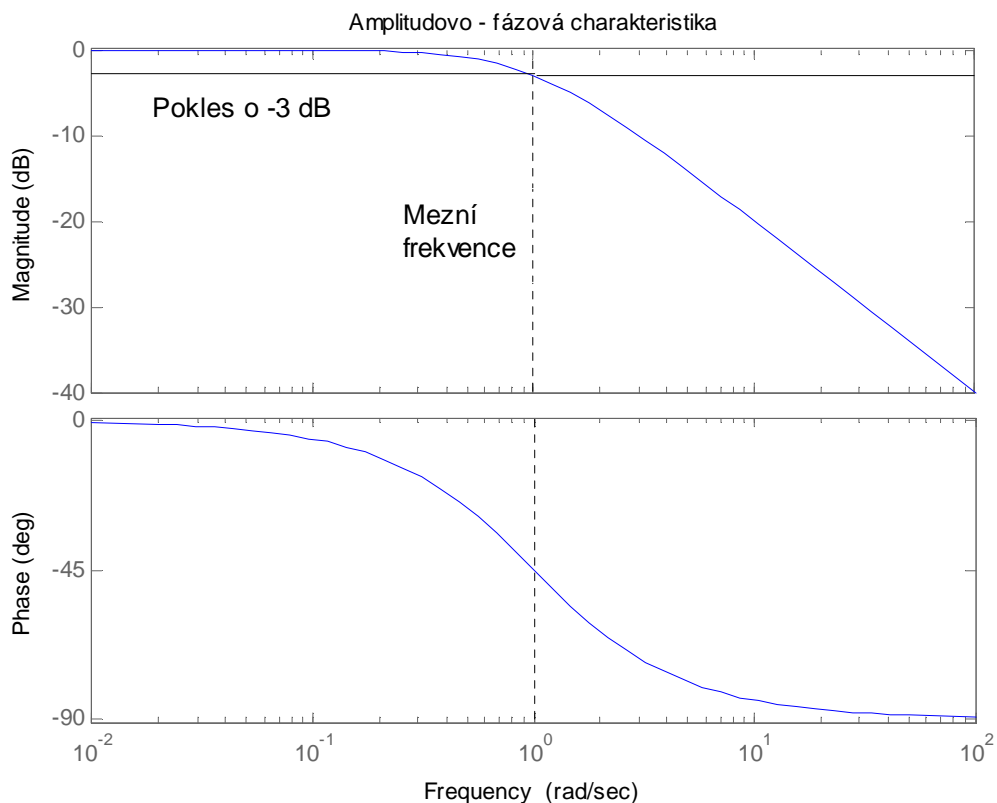
AFCH slouží pro zobrazení přenosu spektra signálu.

Amplitudová charakteristika je vyjádření poměru napětí výstupního ku vstupnímu napětí. Jako vstupní signál se předpokládá signál, který je periodickou funkcí času (např. sinusový, obdélníkový průběh apod.). Vstupní i výstupní napětí závisí na kmitočtu a jsou komplexními proměnnými. [11]

Fázová charakteristika je rozdíl mezi fází výstupního a vstupního signálu.

Pro zobrazování charakteristik v grafech může být použito lineárního měřítka, ale zpravidla se používá na ose  $x$  pro frekvenci  $f$  logaritmické měřítka. Je to z důvodu toho, že graf v lineárních souřadnicích je nepřehledný pro celé spektrum vstupního signálu. Osa  $y$  je pro amplitudovou charakteristiku vyjádřena v dB a pro fázovou charakteristiku je v stupních.

Mezní frekvence u ACH je chápána jako pokles přenosu o -3 dB. U FCH je to nárůst o  $-45^\circ$ .



Obr. 12 – Ukázka AFCH s časovou konstantou  $\tau = 1$  s

## 2.1 Matematický popis

Pokud budeme dodržovat podmínky, které byly zadány v předešlé kapitole, tak můžeme definovat vztah pro napět'ový přenos soustavy, který je:

$$A(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = A(\omega) \cdot e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)}, \quad (2.1.1)$$

kde modul přenosu je:

$$A(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \sqrt{(\operatorname{Re}[A(j\omega)])^2 + (\operatorname{Im}[A(j\omega)])^2}. \quad (2.1.2)$$

Fázový posuv je definován vztahem:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A(j\omega)]}{\operatorname{Re}[A(j\omega)]}, \quad \varphi(\omega) = \varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega). \quad (2.1.3)$$

Pokud bychom chtěli napět'ový přenos vyjádřit v dB a v logaritmických souřadnicích, tak rovnici (2.1.1) upravíme do podoby:

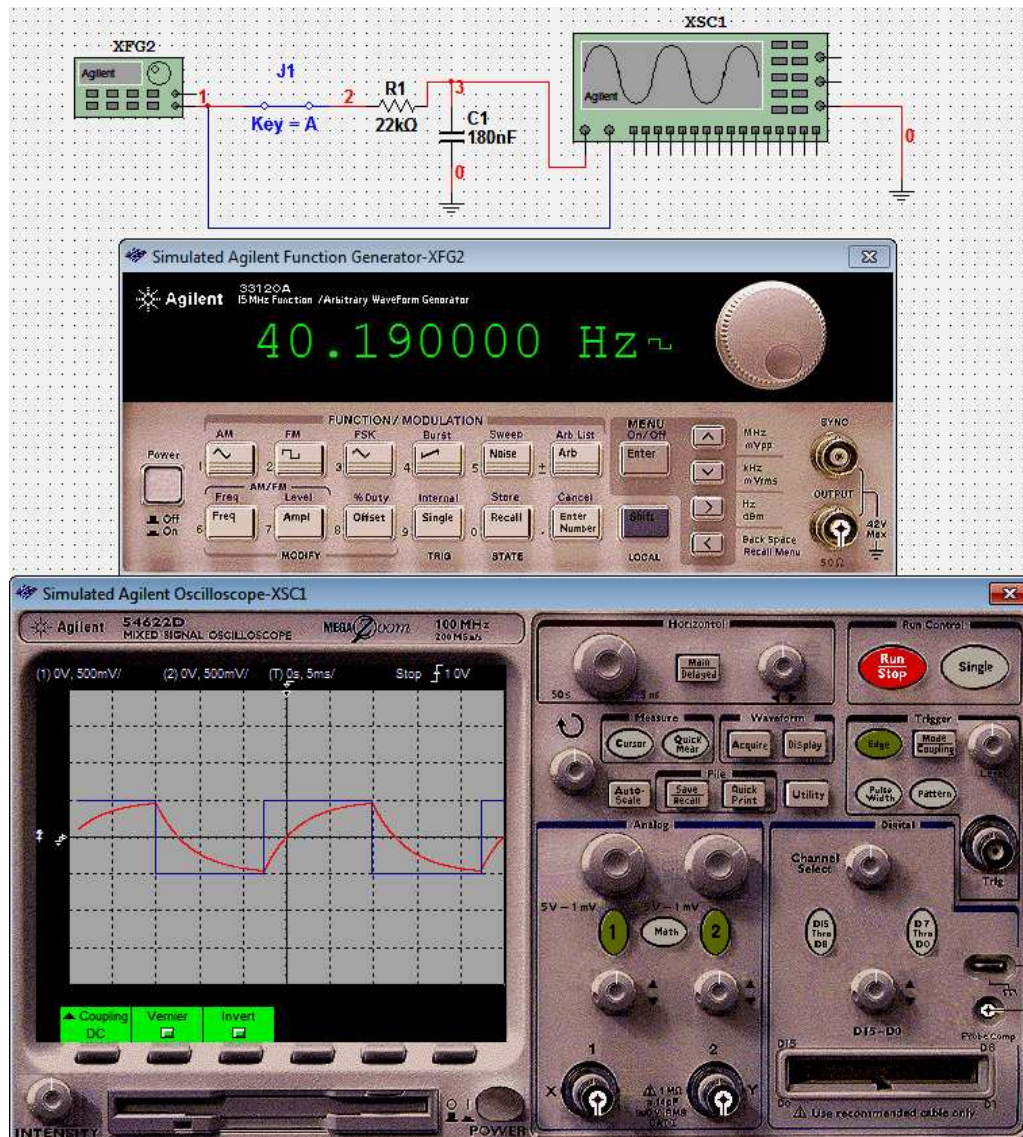
$$A_{dB}(\omega) = 20 \cdot \log A(j\omega). \quad (2.1.4)$$

## 2.2 Měření amplitudové charakteristiky

Při měření amplitudové charakteristiky je vstupem do měřené soustavy periodický signál, který je funkcí času. Je to například vstupní signál sinusového, obdélníkového, nebo pilovitého průběhu napětí. U měřené soustavy, která je zobrazena na obrázku (Obr. 13) je vstupním signálem obdélníkový průběh napětí. Výstupem z měřené soustavy je hodnota napětí, na kterou se kondenzátor dokázal nabít při určené frekvenci vstupního signálu.

Měření provádíme tak, že zaznamenáváme hodnoty výstupního napětí poděleného vstupním napětím pro spektrum frekvencí vstupního signálu. Frekvence volíme buď podle vlastní potřeby, nebo podle vlastností použitých přístrojů.

Při vykreslování charakteristik můžeme použít lineární souřadnice pro osu x, na které vynášíme frekvenci a na osu y vyneseme naměřená data. Nebo pro frekvenci f použijeme logaritmické měřítko a naměřená data přepočítáme pomocí rovnice (2.1.4).



Obr. 13 – Ukázka zapojení a měření amplitudové charakteristiky

### 2.3 Měření fázové charakteristiky

Při měření fázové charakteristiky je vstupem do měřené soustavy periodický signál, který je funkcí času. Je to například vstupní signál sinusového, obdélníkového, nebo pilovitého průběhu napětí. U měřené soustavy, která je zobrazena na obrázku (Obr. 14) je vstupním signálem obdélníkový průběh napětí. Výstupem z měřené soustavy je hodnota napětí, na kterou se kondenzátor dokázal nabít při určené frekvenci vstupního signálu. Výstupní napětí má proti vstupnímu napětí fázový posun, který je závislý na kmitočtu vstupního napětí.

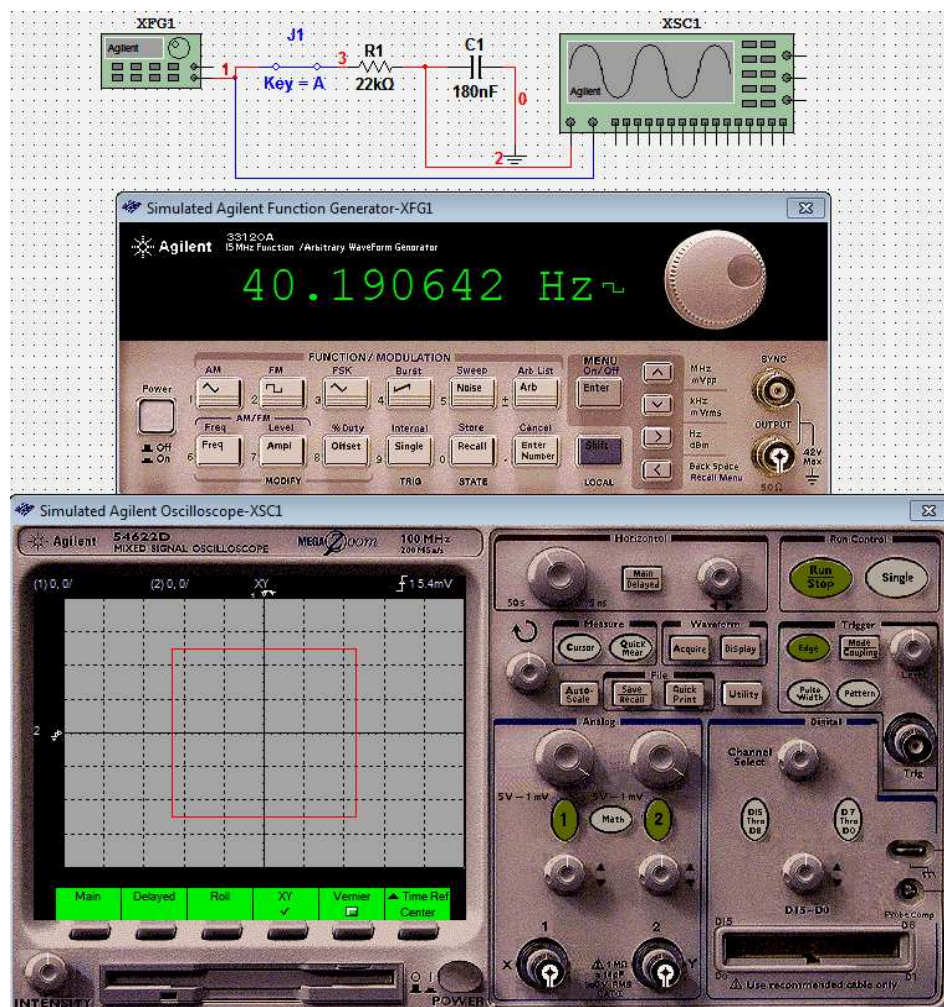


Při měření jsou využity oba dva vstupy osciloskopu. Na jeden vstup přivádíme výstupní signál z generátoru a na druhý vstup přivádíme výstupní signál z měřené soustavy. Nejdříve než začneme měřit, tak musíme na osciloskopu nastavit funkci X-Y. Měření provádíme tak, že zaznamenáváme hodnoty počtu dílku na ose x a na ose y pro spektrum frekvencí vstupního signálu. Frekvence volíme buď podle vlastní potřeby, nebo podle vlastností použitých přístrojů. Nakonec pomocí vztahu:

$$\varphi(\omega) = \sin \cdot \frac{\text{poč. dílků na ose } y}{\text{poč. dílků na ose } x} \quad (2.3.1)$$

vypočítáme fázový posun pro příslušné frekvence.

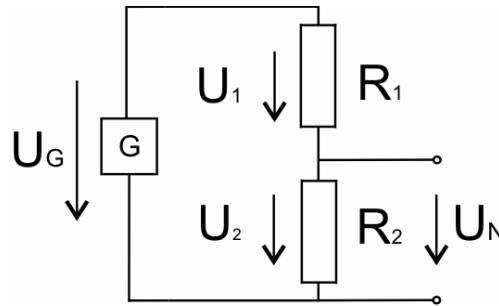
Při vykreslování charakteristik můžeme použít lineární souřadnice pro osu x, na které vynášíme frekvenci a na osu y vyneseme naměřená data. Nebo pro frekvenci  $f$  použijeme logaritmické měřítko. Fázový posun vynášíme ve stupních.



Obr. 14 – Ukázka zapojení a měření fázové charakteristiky

## 2.4 AFCH integračního článku (matematický popis)

Při matematickém popisu integračního článku vyjdeme z předpokladu, že integrační článek na obrázku (Obr. 2) je vlastně impedanční (napět'ový) dělič. Klasický impedanční dělič skládající se jen z rezistorů je zobrazen na obrázku (Obr. 15).



Obr. 15 – Schéma zapojení impedančního děliče

Impedanční dělič je definován vztahem:

$$U_N = U_G \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.4.1)$$

Pokud nahradíme rezistor  $R_2$  kondenzátorem, tak získáme integrační článek prvního řádu, který je definován vztahem:

$$u_N(j\omega) = \frac{X_C}{R_1 + X_C} \cdot u_G(j\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}} \cdot u_G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} \cdot u_G(j\omega). \quad (2.4.2)$$

Podělením vztahu (2.4.2) napětím  $u_G(j\omega)$ , vynásobením komplexně sdruženého členu a úpravou získáme vztah modulu přenosu soustavy pro integrační článek:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad (2.4.3)$$

$$\text{kde } \text{Re} = \frac{1}{1 + (\omega RC)^2} \text{ a } \text{Im} = \frac{\omega RC}{1 + (\omega RC)^2}.$$

Jelikož známe reálnou i imaginární složku, tak můžeme odvodit vztah pro fázový posun výstupního signálu z měřené soustavy. Vztah je definován:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{-\frac{\omega RC}{1 + (\omega RC)^2}}{\frac{1}{1 + (\omega RC)^2}} = \arctg(-\omega RC) = \arctg(-\omega\tau). \quad (2.4.4)$$

## 2.5 AFCH derivačního článku (matematický popis)

Při matematickém popisu derivačního článku vyjdeme z předpokladu, že derivační článek na obrázku (Obr. 9) je vlastně impedanční (napěťový) dělič. Klasický impedanční dělič skládající se jen z rezistorů je zobrazen na obrázku (Obr. 15).

Impedanční dělič je definován vztahem:

$$U_N = U_G \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.5.1)$$

Pokud nahradíme rezistor  $R_1$  kondenzátorem, tak získáme derivační článek prvního řádu, který je definován vztahem:

$$u_N(j\omega) = \frac{R}{R + X_C} \cdot u_G(j\omega) = \frac{R}{R_1 - \frac{1}{j\omega C}} \cdot u_G(j\omega) = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \cdot u_G(j\omega). \quad (2.5.2)$$

Podělením vztahu (2.5.2) napětím  $u_G(j\omega)$ , vynásobením komplexně sdruženého členu a úpravou získáme vztah modulu přenosu soustavy pro derivační článek:

$$A(\omega) = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad (2.5.3)$$

$$\text{kde } \text{Re} = \frac{(\omega RC)^2}{1 + (\omega RC)^2} \text{ a } \text{Im} = \frac{\omega RC}{1 + (\omega RC)^2}.$$

Jelikož známe reálnou i imaginární složku, tak můžeme odvodit vztah pro fázový posun výstupního signálu z měřené soustavy. Vztah je definován:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\frac{\omega RC}{1 + (\omega RC)^2}}{\frac{(\omega RC)^2}{1 + (\omega RC)^2}} = \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega RC} = \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega \tau}. \quad (2.5.4)$$

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 MĚŘENÁ SOUSTAVA

Při návrhu měřené soustavy byl kladen důraz na jednoduchost a univerzálnost. Jednoduchost, za účelem pochopení učiva a teorie měřené soustavy. Univerzálnost, za účelem využití měřené soustavy.

#### 3.1 Návrh

Při návrhu soustavy pro měření přechodových dějů byly upřednostněny integrační a derivační články prvního řádu, před články vyšších řádů, články s impedančními oddělovači, nebo pásmovými propustmi.

Pro návrh integračního článku a derivačního článku muselo být splněno několik kritérií, jako jsou např.:

- Možnost napájení soustavy DC i AC napětí
- Různé délky časových konstant od jednotek nanosekund až po jednotky sekund
- Hodnoty odporu rezistorů, které by měly být závislé či nezávislé na vstupním děliči osciloskopu

Pro splnění těchto požadavků byly zvoleny přepínače se dvanácti polohami. Jeden přepínač pro rezistory, druhý přepínač pro kondenzátory. Kondenzátory byly použity bipolární a keramické. Bipolární a keramické kondenzátory mohou být napájeny stejnosměrným i střídavým napětím. Jako vstupní a výstupní konektory byly použity konektory typu BNC. Pro měření přechodového děje pomocí vstupního stejnosměrného napětí, byl použit na vstupu do soustavy vypínač. Všechny tyto komponenty byly umístěny na desku plošného spoje (DPS).

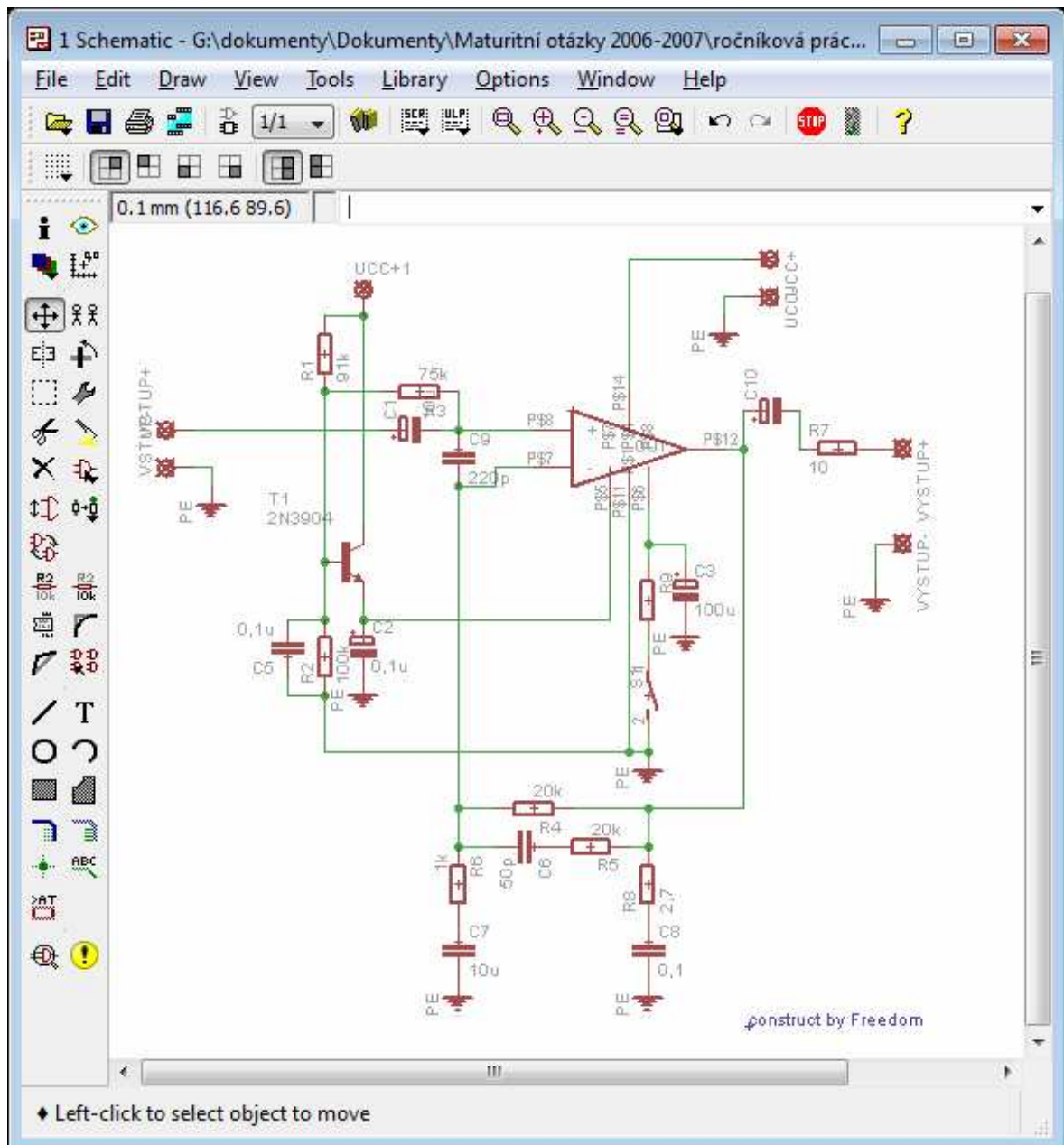
#### 3.2 Výroba

Deska plošného spoje byla navržena v programu Eagl. Program Eagl je určen pro kreslení schémat a návrh desek plošných spojů. Vyznačuje se uživatelskou jednoduchostí a výkonností při malých nárocích na hardwarový výkon PC. Program se skládá ze tří základních modulů:

- Editor schémat

- Editor spojů
- Autorouter

Editor schémat je modul určený pro kreslení schématických zapojení. Je možné nakreslit až 99 stran schématu. Provádí kontrolu zapojení. Pokud je zároveň zapnut i editor spojů, tak automaticky provádí zpětné anotace. Při přechodu do editoru spojů automaticky generuje popis zapojení a informace o použitých součástkách tzv. netlist. [18], [19]



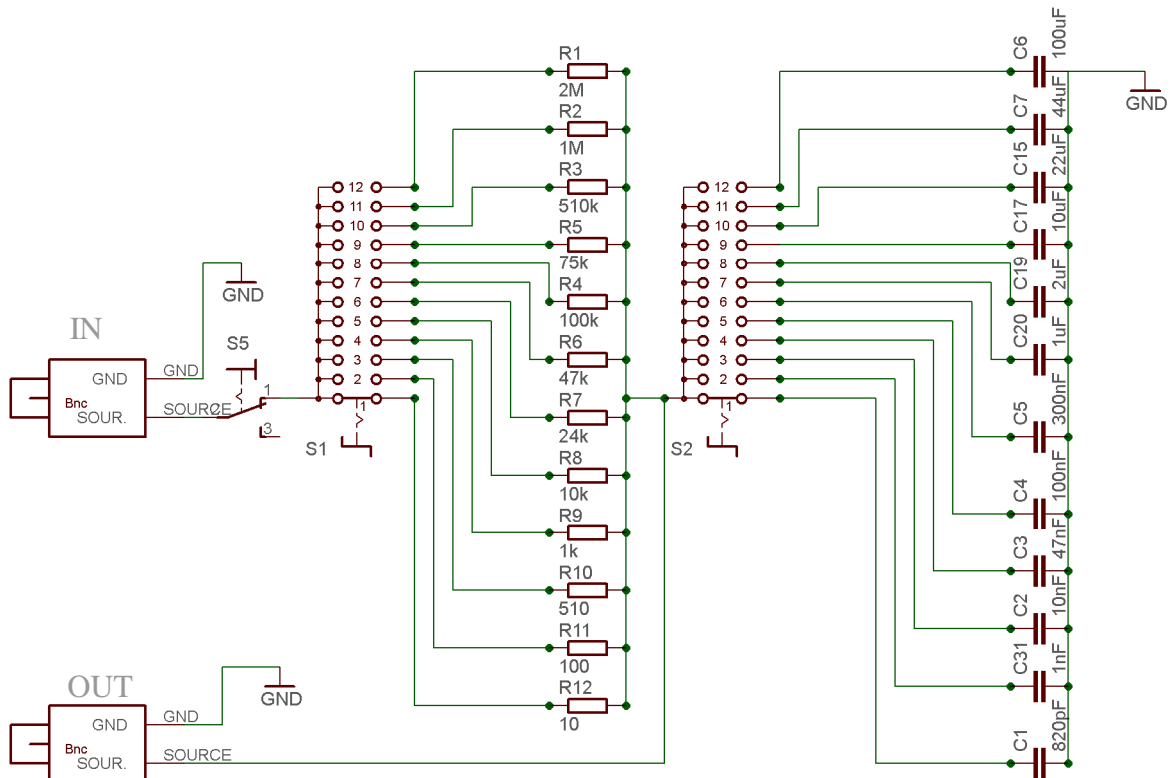
Obr. 16 – Ukázka prostředí editoru schémat





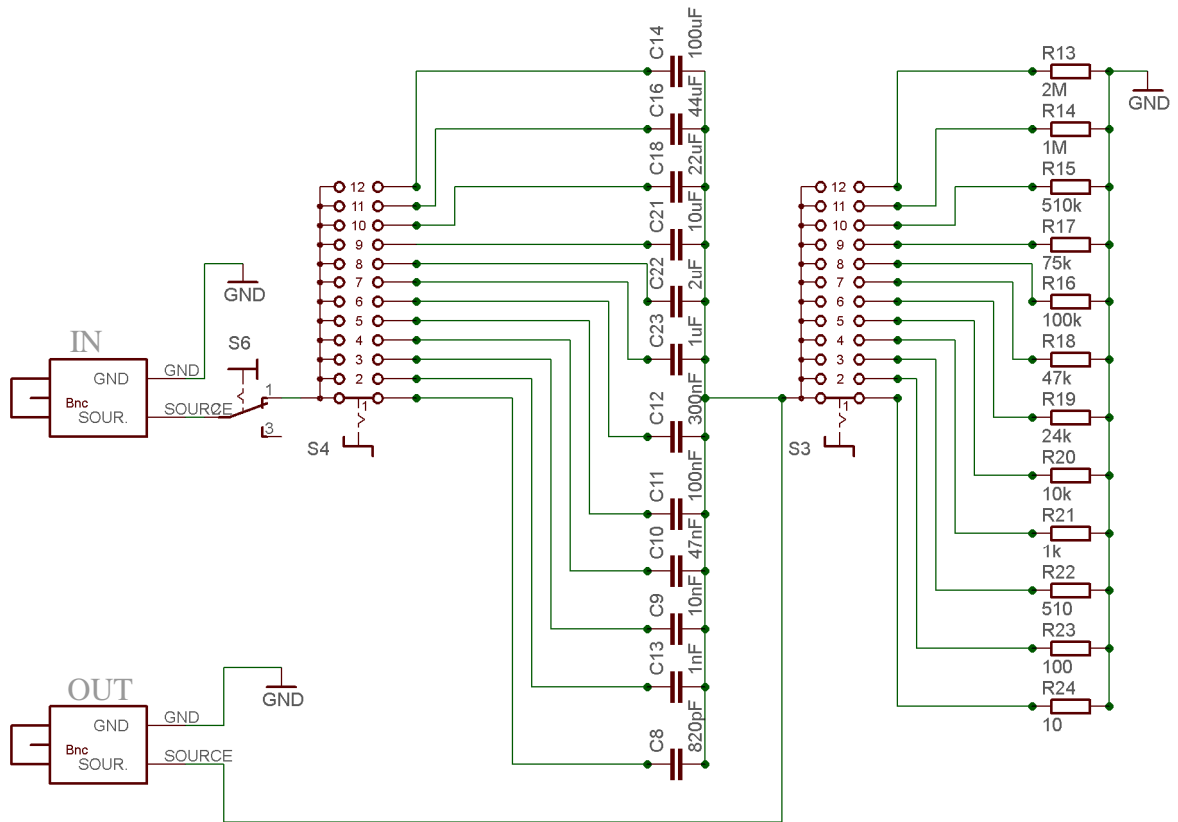
Autorouter je modul určený pro automatické prokládání plošných spojů metodou ripup-retry podle parametrů zadaných uživatelem. Rotuje buď celou plochu DPS, nebo jen vybraný spoj. Spojе pokládá na nastavený rastr, přičemž dodrží nastavené izolační mezery. [18], [19]

Návrh integračního článku v editoru schémat je zobrazen na obrázku (Obr. 18). Z obrázku je zřejmé že, přepínače S1 a S2 jsou přepínače se dvanácti polohami a lze s nimi nakombinovat libovolnou časovou konstantu. Na vstupu a výstupu jsou umístěny konektory typu BNC. Vypínač S5 slouží pro případ, kdy bude požadováno jako vstupní napětí, napětí stejnosměrné, při měření přechodového děje.

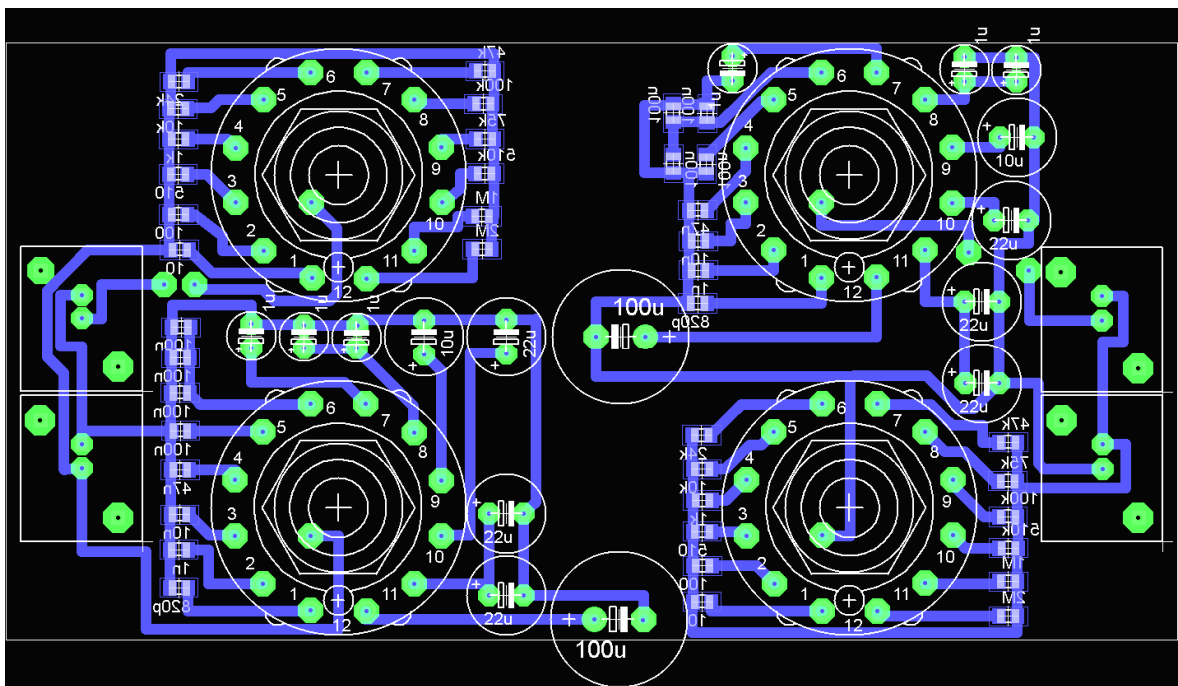


Obr. 18 – Schéma zapojení integračního článku

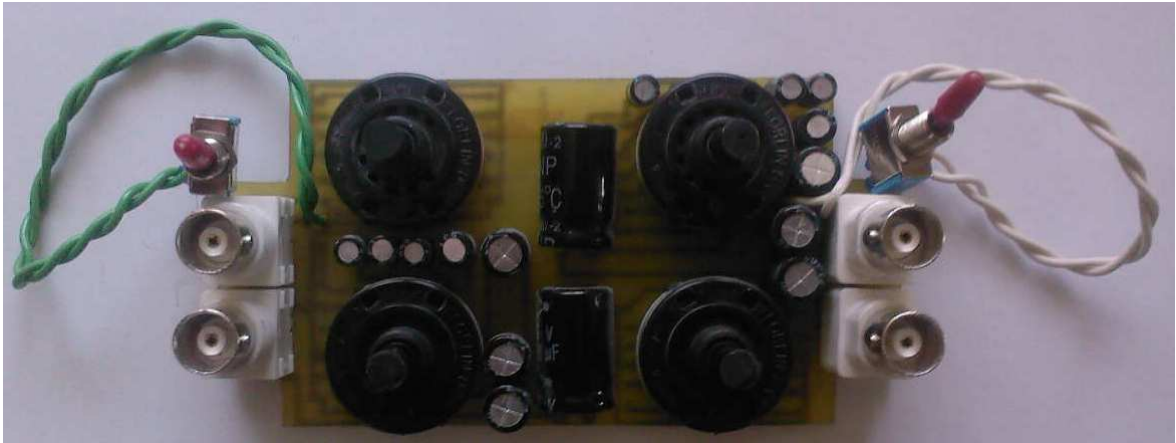
Návrh derivačního článku v editoru schémat je zobrazen na obrázku (Obr. 19). Popis schéma je analogicky stejný jako u případu schéma integračního článku.



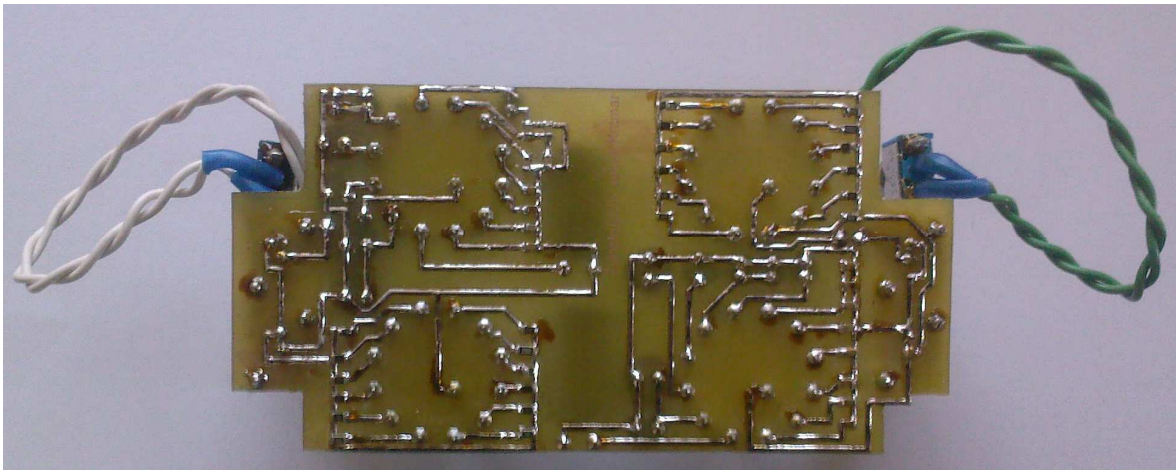
Obr. 19 – Schéma zapojení derivačního článku



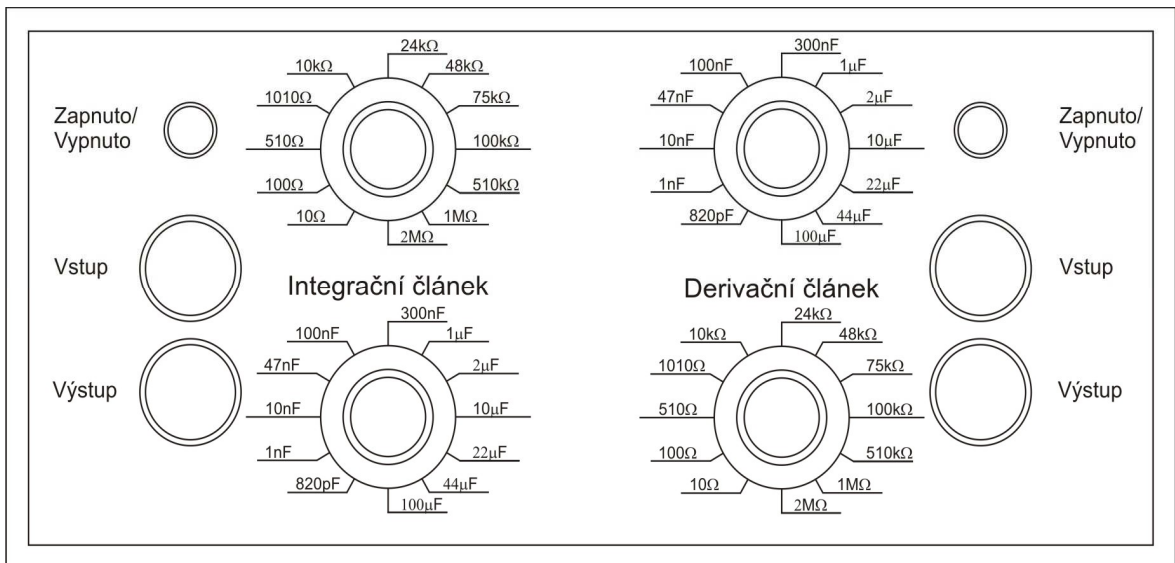
Obr. 20 – Schéma spojů integračního článku (vlevo) a derivačního článku (vpravo)



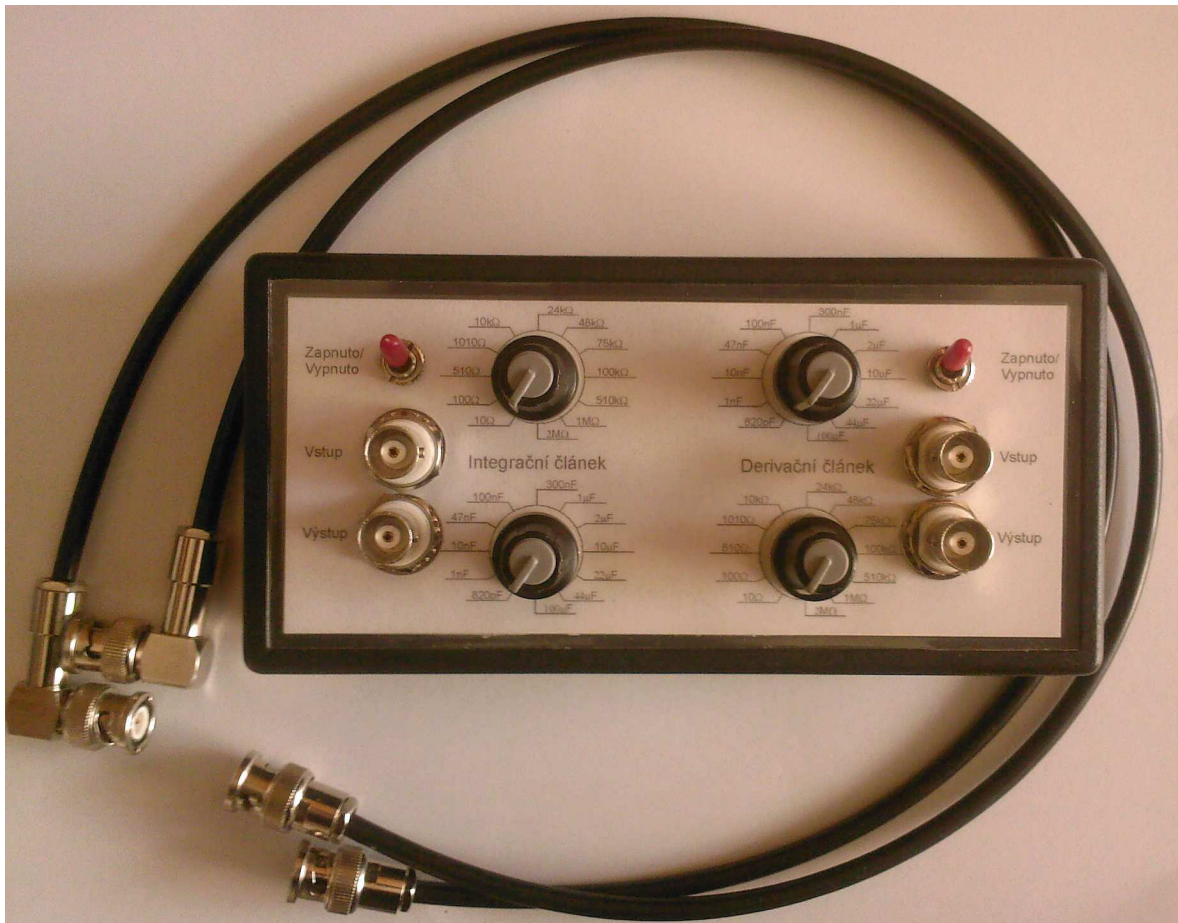
Obr. 21 – Osazená DPS ze strany součástek



Obr. 22 – Osazená DPS ze strany spojů



Obr. 23 – Čelní panel



Obr. 24 – Hotový výrobek s potřebným příslušenstvím

Program Eagle použitý při návrhu je volně šiřitelný software. V této verzi je omezena velikost DPS, avšak pro účely návrhu měřené soustavy je to postačující verze. Verzi je možné stáhnout na stránkách [www.eagle.cz](http://www.eagle.cz), nebo na [www.cadware.cz](http://www.cadware.cz).

Pro návrh čelního panelu byl zvolen program Corel Draw X4. Tento program lze stáhnout jako trial verzi.

Při návrhu měřené soustavy bylo využito inspirace z literatury [4], [5], [6], [9], [10], [12], [13].

## 4 MĚŘICÍ PROSTŘEDKY

Softwarové produkty firmy Agilent Technologies umožňují vyšší produktivitu práce a tak se uživatel může zaměřit na řešení technologických problémů a ne na programování. Program Agilent Vee Pro 9.0 je silný intuitivní grafický jazyk, který umožňuje jednoduchou a rychlou cestu k měření a k analýze.

### 4.1 Software Vee Pro 9.0



Obr. 25 – Vee Pro 9.0

Software Agilent Vee Pro 9.0 je jednoduchý na ovládání a jeho velkou předností je usnadnění práce za účelem zvýšení produktivity.

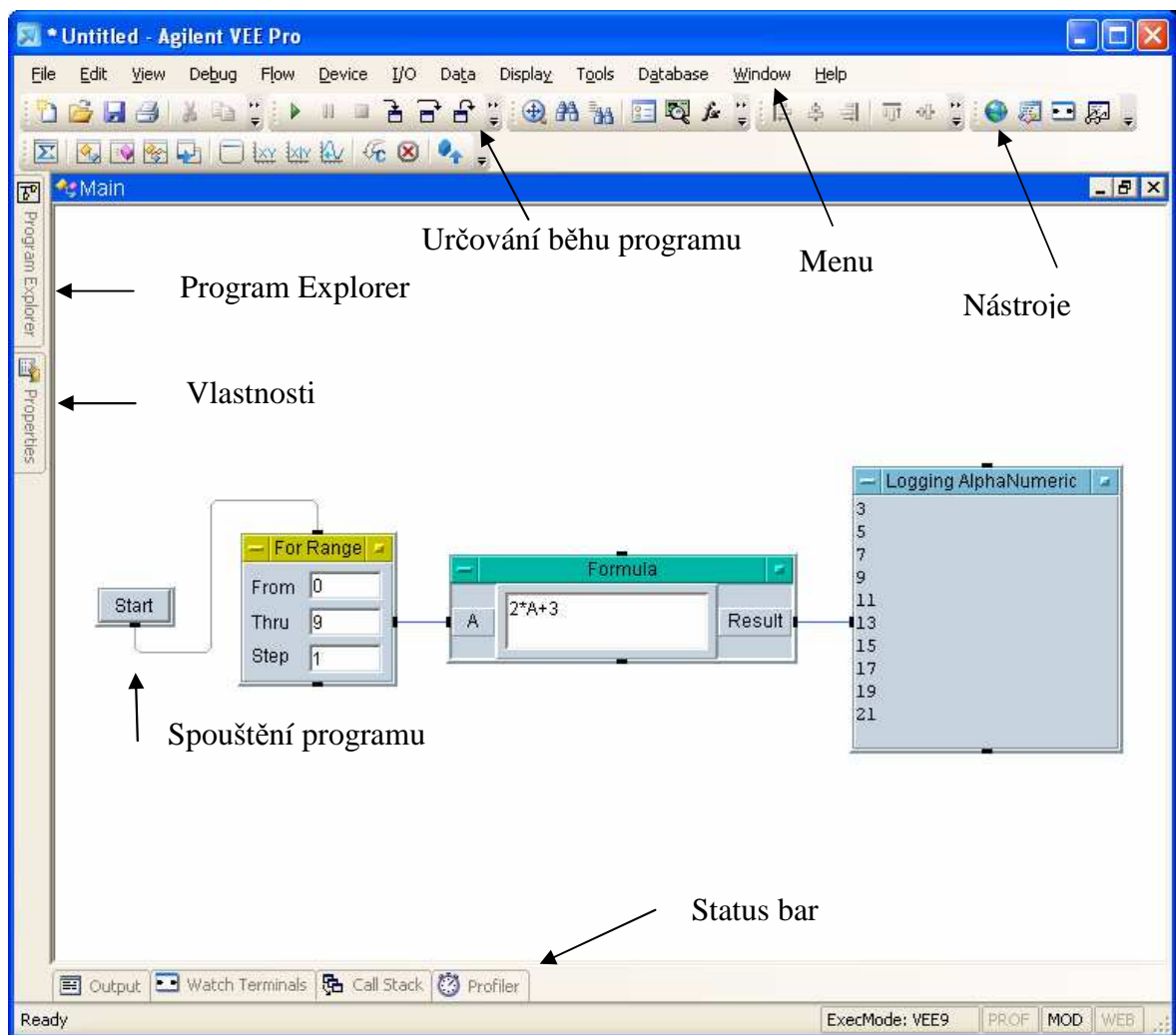
Agilent Vee je vizuální technické prostředí, které umožňuje programovat za pomoci využití blokových částí se specifickými vlastnostmi. Bloky jsou vybírány z menu nebo nástrojů. Bloky jsou spojovány podle potřeby spojnicemi, za účelem určení chodu programu a simulace úkolů definované uživatelem. Agilent Vee zobrazuje objekty a spojení mezi nimi s barevným odlišením, takže jsou snáze pochopitelné pro ostatní uživatele.

Agilent Vee je určený pro vědce a techniky, kteří potřebují rychle vytvořit automatické měření a testování daných problémů. Agilent Vee je schopen komunikovat za použití GPIB, LAN, USB, RS – 232, VXI a LXI rozhraní. Agilent Vee umí ovládat měřicí nástroje i měřicí počítačové karty za pomoci ovladače k nástroji podporovaný DLL, nebo Agilent Vee Pro's. S Agilent Vee Pro, s adresami nástrojů a další parametry mohou být ověřeny za běhu a změněny za chodu programu bez přeprogramování programu. Agilent Vee Pro automaticky uchovává rozdílné datové typy, umožňuje změnu datového typu a tím

komplexní programování. Profiler umožňuje rychle analyzovat problematické části kódu a tím ušetří čas při závěrečném doladování programu.

Agilent Vee umožňuje export dat. Export dat může být prováděn do tabulkového procesoru, např. do programu Excel. Agilent Vee Pro programy mohou být monitorovány, diagnostikovány a ovládány přes web, nebo vnitřní síť.

Agilent Vee Pro obsahuje Matlab skripty a nástroje MathWorks Signal Processing Toolbox, které jsou automaticky obsaženy.

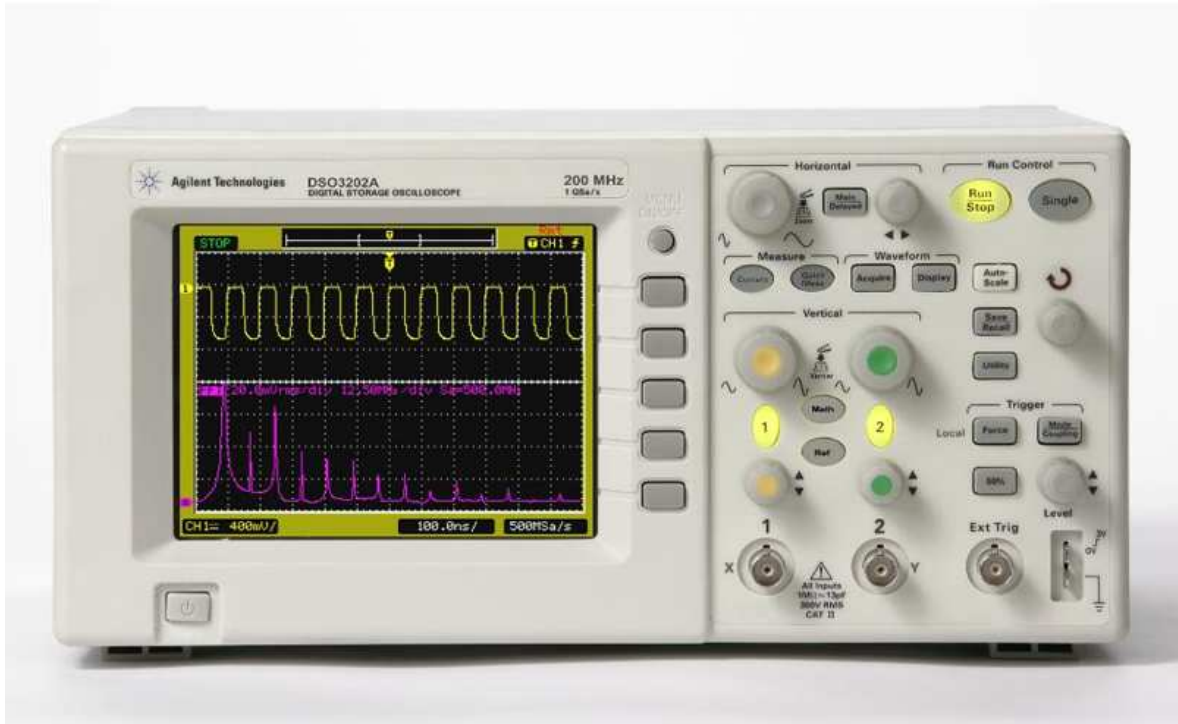


Obr. 26 – Základní popis programu Vee Pro 9.0

Při popisování softwaru Agilent Vee Pro 9.0 bylo využito těchto zdrojů [3], [22].

## 4.2 Osciloskop Agilent DSO3260A

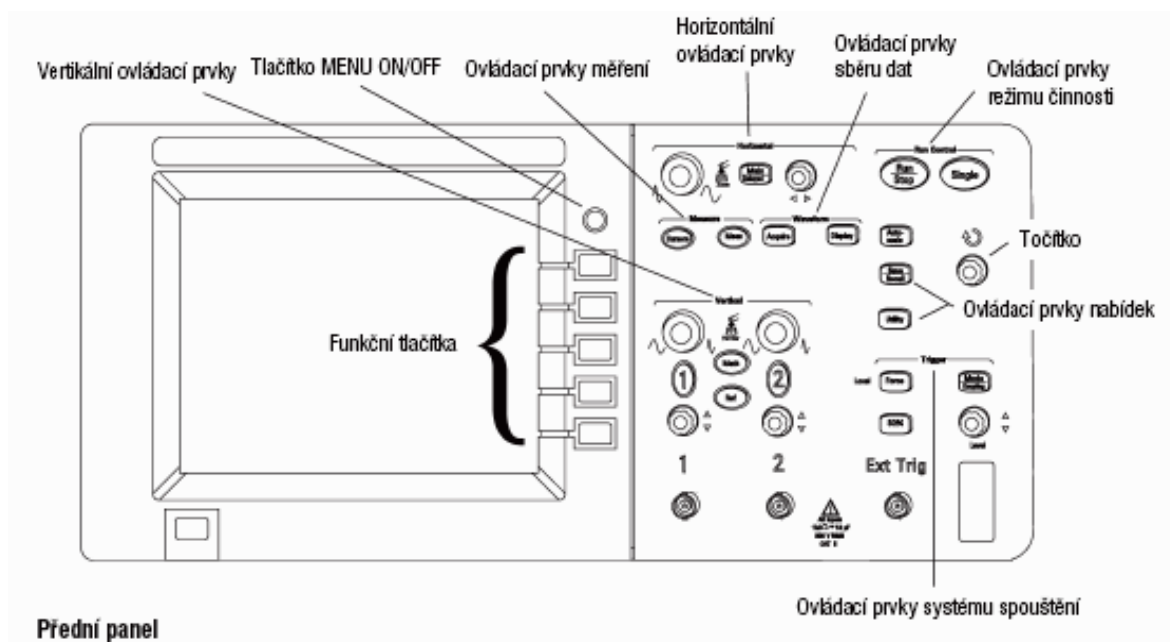
Osciloskop DSO3260A patří do řady osciloskopů DSO3000. Číselné označení 60 označuje maximální frekvenční rozsah vstupního signálu, tedy od 0 Hz do 60 MHz. Jedná se o dvoukanálový osciloskop.



Obr. 27 – Osciloskop řady DSO 3000

Základní vlastnosti osciloskopu:

Vzorkovací frekvence	-	500 MSa/s pro každý kanál
Displej	-	barevný, rozlišení 320 x 240, výška 88mm, šířka 116mm
Citlivost vert. kanálu	-	od 2 mV/div do 5 V/div
Citlivost čas. základny	-	od 5 ns/div do 50 s/div
BW limit	-	20 Mhz
Vstupní napětí	-	DC, AC, GND
Vstupní impedance	-	1 MΩ: ≈ 13 pF
Rozhraní	-	GPIO, RS – 232, USB



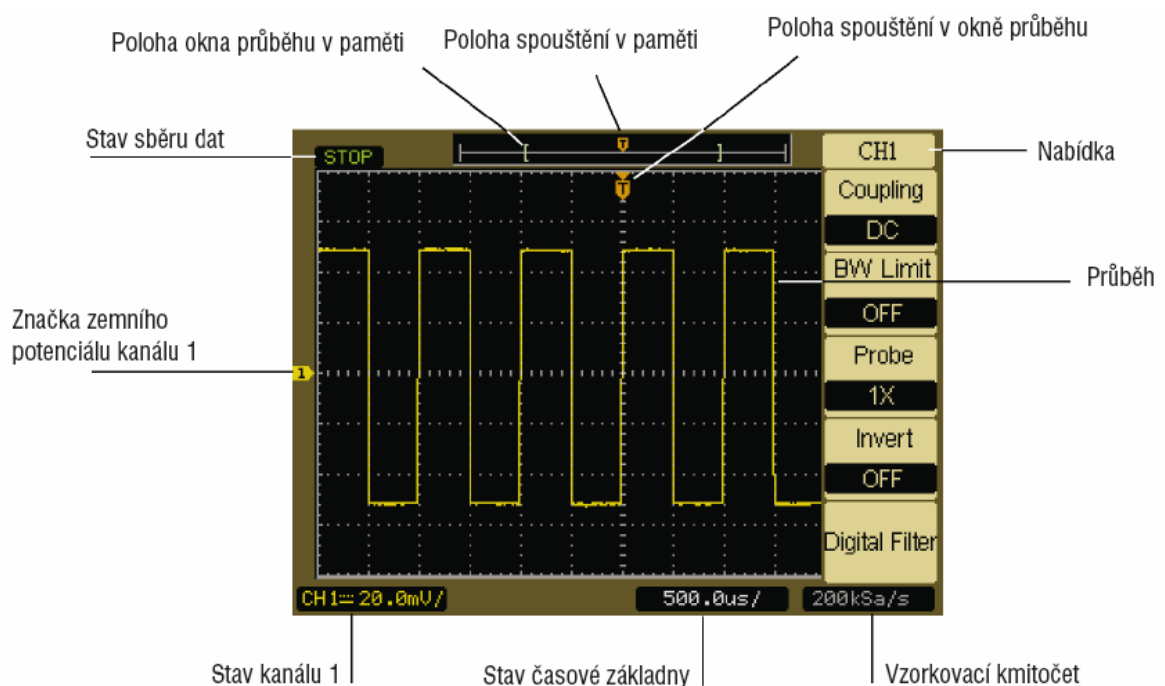
Obr. 28 – Popis čelního panelu osciloskopu

K jednotlivým skupinám, které jsou zobrazeny na obrázku (Obr. 28), jsou přiřazeny následující prvky:

Ovládací prvky měření	-	Meas a Cursors
Ovládací prvky sběru dat	-	Acquire a Display
Ovládací prvky nabídek	-	Save/Recall a Utility
Vertikální ovládací prvky	-	Prvek pro nastavení polohy průběhu ve vertikální směru, prvky pro nastavení vertikálního měřítka, tlačítka 1, 2, Math a Ref
Horizontální ovládací prvky	-	Prvek pro nastavení polohy průběhu v horizontálním směru, prvek pro nastavení horizontálního měřítka, tlačítka Main/Delay
Ovládací prvky spouštění	-	Prvek pro nastavení úrovně spouštění, tlačítka 50%, Mode/Coupling a Force
Ovládací prvky režimu činnosti	-	Tlačítka Run/Stop, Autoscale a Single
Tlačítko MENU ON/OFF	-	Tlačítkem se zobrazují, nebo se skrývají pole aktuální nabídky



- Funkční tlačítka - Pět šedivých tlačítek umístěných u pravého okraje displeje, kterými se volí přilehlá pole nebo položky aktuálně zobrazené nabídky. Pokud není žádná nabídka zobrazena, zobrazí se po stisknutí funkčního tlačítka naposledy používaná nabídka
- Točítka - Slouží pro zadávání hodnoty pro některé ovládací prvky



Obr. 29 – Popis aktivního displeje osciloskopu

Při měření přechodových dějů a AFCH mohou být využiti některé z funkcí osciloskopu. Nejpoužívanější jsou:

- Autoscale - Při stisknutí tlačítka Autoscale se zapnou všechny kanály, na které je přiváděn signál, a nastaví se jejich měřítka, dále se zvolí časová základna odpovídající zdroji spouštění. Zvolený zdroj spouštění je kanál s nejnižším číslem
- Coupling AC - Funkce Coupling AC umožňuje odstranit z měřeného kanálu stejnosměrnou složku

Coupling DC - Funkce Coupling DC umožňuje zobrazení stejnosměrné i střídavé složky z měřeného kanálu

Coupling GND - Funkce Coupling GND odpojí vstupní signál od vstupu osciloskopu

BW Limit ON - Funkce BW Limit ON odstraní vysokofrekvenční složky z průběhu, které nejsou důležité pro analýzu. V tomto nastavení budou potlačeny kmitočty nad 20 Mhz

Při popisování osciloskopu DSO3260A bylo využito těchto zdrojů [23].

### 4.3 Generátor Agilent 33220A



Obr. 30 – Generátor DSO 33220A

Základní vlastnosti generátoru:

Frekvenční rozsah - od 1  $\mu$ Hz do 20 Mhz

Amplituda - od 10 mV<sub>PP</sub> do 10 V<sub>PP</sub>

- Waveforms - sinusový, obdélníkový, pilový, pulzní, „rampa“, šum, DC
- Modulace - AM, FM, PM, FSK, PWM
- Rozhraní - USB, LAN, GPIB
- Výstupní impedance - 50  $\Omega$

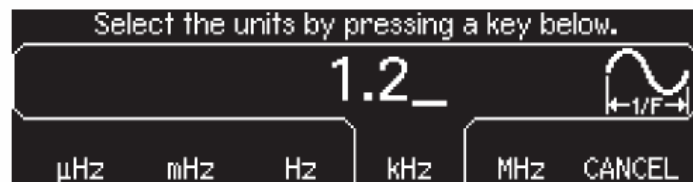


Obr. 31 – Popis čelního panelu generátoru

- |                                 |  |
|---------------------------------|--|
| 1 - Graph Mode/Local Key        | 9 - Manual Trigger Key (použití jen pro Sweep a Burst) |
| 2 - On/Off Switch               | 10 - Output Enable/Disable Key                         |
| 3 - Modulation/Sweep/Burst Keys | 11 - Knob  |
| 4 - State Storage Menu Key      | 12 - Cursor Keys                                       |
| 5 - Utility Menu Key            | 13 - Sync Connector                                    |
| 6 - Help Menu Key               | 14 - Output Connector                                  |
| 7 - Menu Operation Softkeys     |  |
| 8 - Waveform Selection Keys     |  |

Při měření přechodových dějů může být využit obdélníkového průběhu napětí, nebo stejnosměrného napětí. Obdélníkový průběh napětí nastavíme pomocí tlačítka Square. Frekvenci, periodu, amplitudu, offset nastavíme pomocí operačních tlačítek. Na obrázku (Obr. 31) jsou tyto tlačítka označena číslem sedm. Pomocí těchto tlačítek určíme potřebný výběr. Číselnou hodnotu zadáváme pomocí inkrementálního senzoru (Obr. 31 zn. 11),

nebo ji můžeme nastavit pomocí numerické klávesnice. Při zadávání pomocí numerické klávesnice je i možnost výběru násobitele. Velikost násobitele určíme pomocí operačních tlačítek.



Obr. 32 – Ukázka číselného zadávání hodnot

Stejnoseměrné napětí se nachází pod tlačítkem Utility, kde aktivujeme stejnosměrný zdroj napětí a nastavíme požadovanou hodnotu napětí.



Obr. 33 – Ukázka DC zdroje napětí

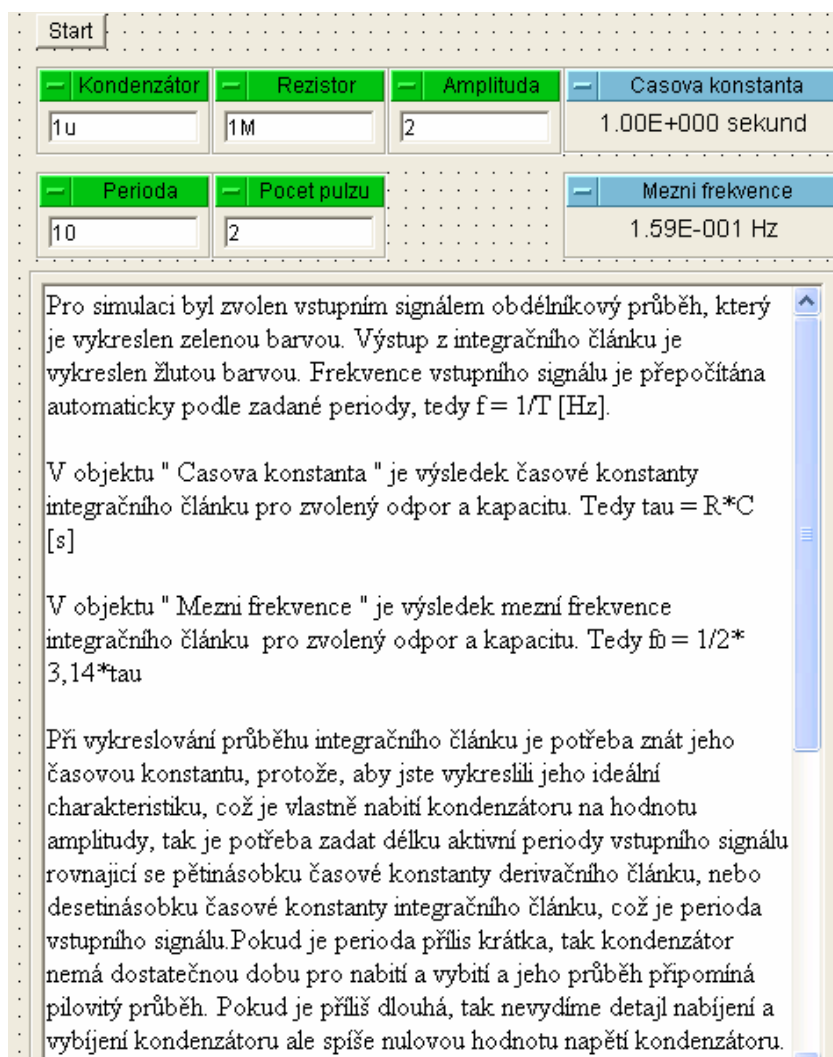
Při popisování generátoru DSO 33220A bylo využito těchto zdrojů [17], [20], [21].

## 5 SIMULACE

Simulace přechodových dějů a AFCH slouží uživatelům jako zdroj informací před samotným měřením. Pro studenta, který není obeznámen problematikou přechodových dějů a AFCH na RC soustavách prvního řádu je to vítanou pomůckou.

### 5.1 Simulace přechodového děje integračního článku

Simulace je vytvořena v programu Vee Pro 9.0. Pro vizualizaci slouží panel, na který jsou umístěny jen potřebné ikony a grafy. Tím se celý simulační program zpřehlední.



Obr. 34 – Část panelu simulace

Po spuštění simulačního programu jsou v levé horní části panelu pro zadávání hodnot, pro výpočet a pro start programu jak je tomu na obrázku ( Obr. 34). Do panelu kondenzátor

a rezistor se zadává kapacita a odpor integračního článku. V panelu amplituda je hodnota velikosti vstupního napětí. Do panelu perioda se zadává délka periody vstupního napětí. Do panelu počet pulzů se zadává kolikrát se má perioda opakovat. V poli časová konstanta a mezní frekvence jsou zobrazeny jednotlivé vypočtené hodnoty integračního článku podle zadaných hodnot.

V levé dolní části obrázku ( Obr. 34) je umístěna nápověda. Nápověda slouží pro uživatele, kteří se s problematikou integračního článku nesečkali. Je zde podrobně vysvětleno, jak se má simulace ovládat a jakým způsobem lze dosáhnout ideálního přechodového děje. Také jsou zde vysvětleny druhy zkratk, které nahrazují exponenty. Výsledné grafy jsou umístěny v pravé části simulace.

Jako vstupní napěťový signál byl použit obdélníkový průběh napětí. Na obrázku (Obr. 35) je znázorněn přechodový děj integračního článku na vstupní signál obdélníkového průběhu napětí.



Obr. 35 – Ukázka přechodového děje integračního článku v simulačním prostředí

Přechodový děj integračního článku v simulaci není založen na rovnici (1.1.1.6). Tento vztah musí být upraven pro případy, kdy doba ustálení přechodového děje není rovna  $5\tau$ .

Po úpravě je napětí na kondenzátoru pro nabíjení definováno vztahem:

$$u_C(t) = U_0 + [U_G - U_0] \cdot \left(1 - e^{-\frac{it-(i-1)\tau}{\tau}}\right), \quad (5.1.1)$$

kde:

$U_G$  – je velikost amplitudy vstupního napětí

$U_0$  – je počáteční napětí na kondenzátoru

$it-(i-1)\tau$  - je rozdíl periody a časové konstanty

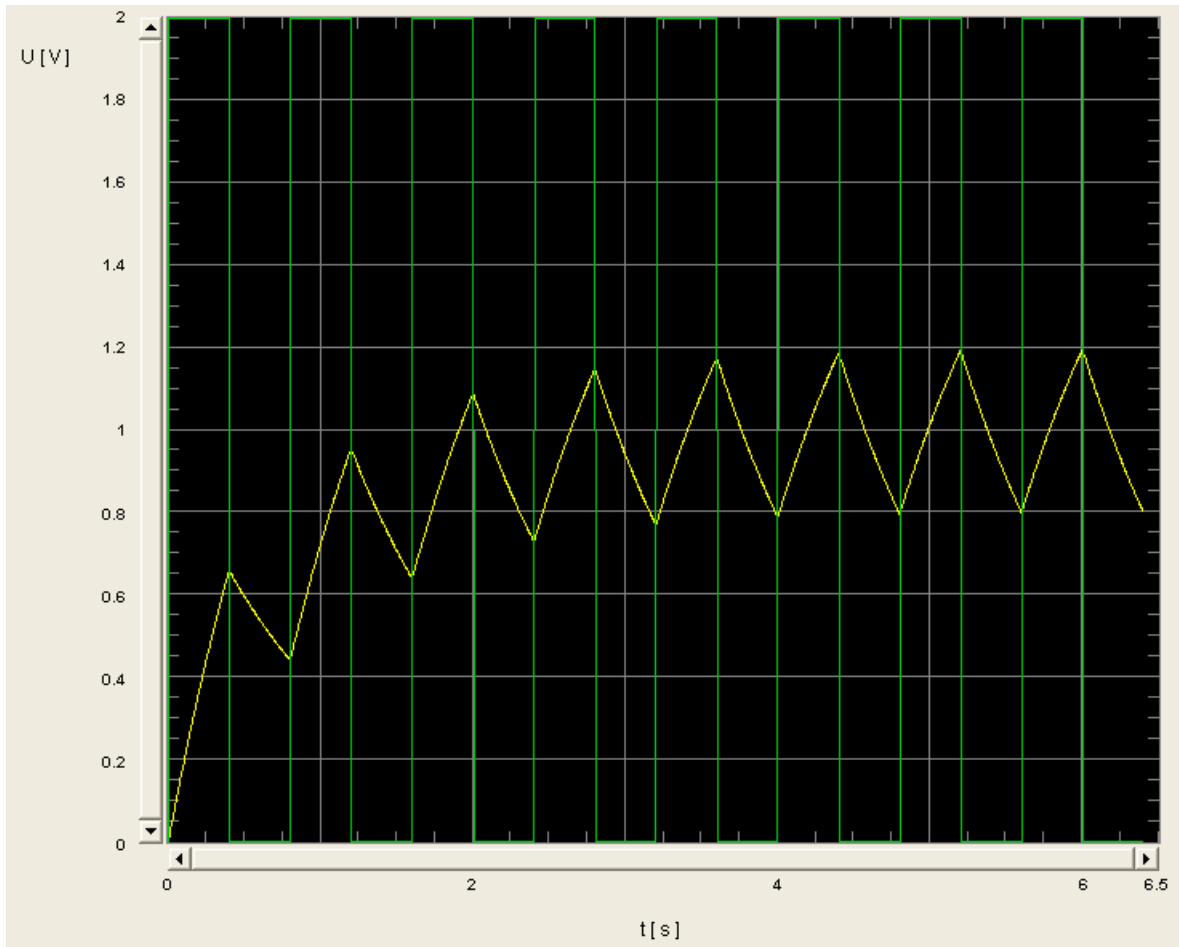
$i$  – je index, který je počítán od jedničky a je vždycky k němu přičítána dvojka

Napětí na kondenzátoru pro vybíjení je definováno vztahem:

$$u_C(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{it-(i-1)\tau}{\tau}}. \quad (5.1.2)$$

Index  $i$  v případě vybíjení začíná od dvojky a je vždycky k němu přičítána dvojka.

Případ, kdy doba ustálení přechodového děje není rovna  $5\tau$  je znázorněn na obrázku ( Obr. 36).



Obr. 36 – Přejchodový děj integračního článku, kdy doba ustálení přechodového děje není rovna  $5\tau$

Při vytváření programu simulace přechodových dějů integračního článku bylo využito inspirace a použití těchto zdrojů [1], [2], [3], [11].

## 5.2 Simulace přechodového děje derivačního článku

Simulace přechodového děje derivačního článku je analogicky stejná jako v kapitole 5.1 až na rovnice definující přechodový děj. Rovnice definující přechodový děj pro nabíjení je definovaná vztahem:

$$u_R(t) = (U_G + U_{MIN}(t-1)) \cdot e^{-\frac{it-(i-1)\tau}{\tau}}, \quad (5.2.1)$$

kde:

$U_G$  – je velikost amplitudy vstupního napětí

$U_{MIN}(t-1)$  – je napětí na kondenzátoru v čase  $t-1$



$it-(i-1)\tau$  - je rozdíl periody a časové konstanty

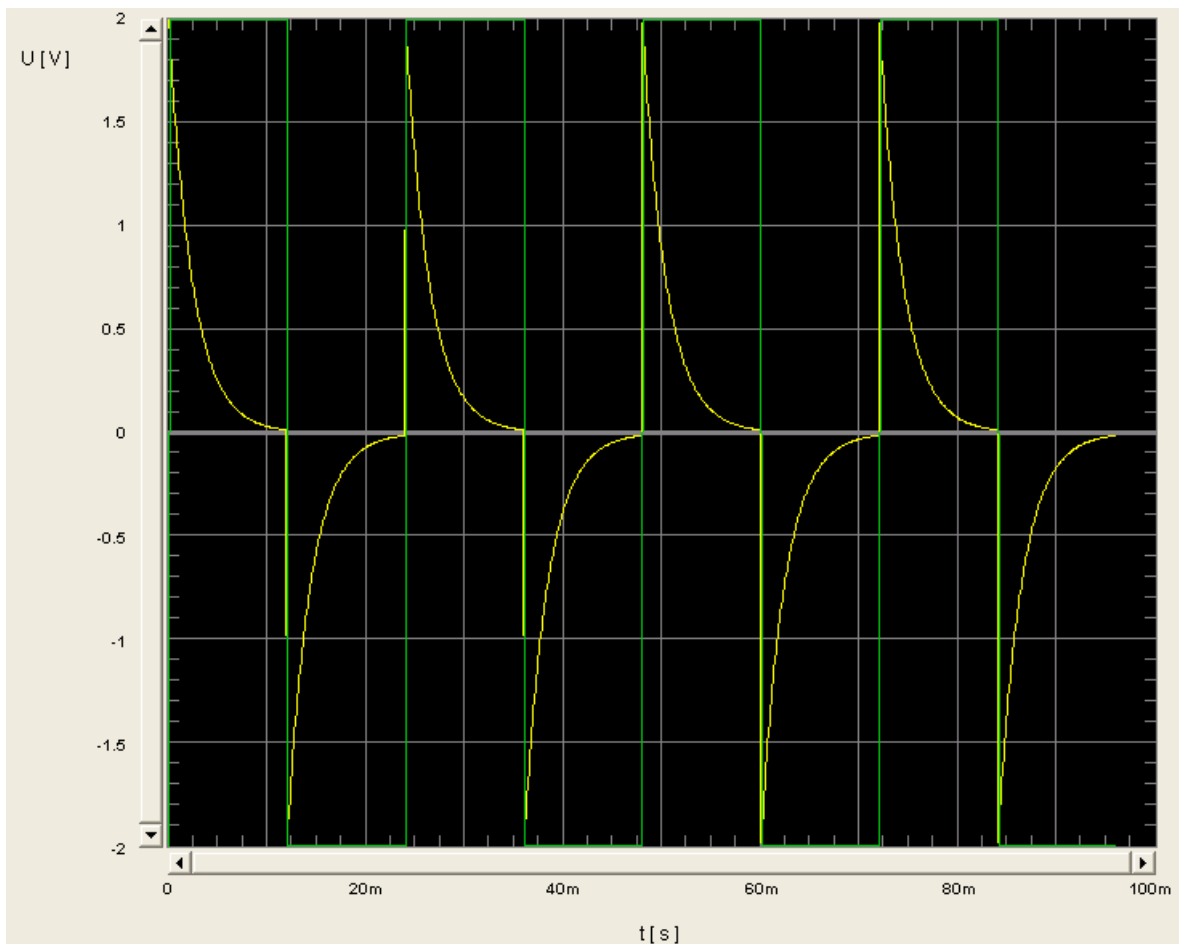
$i$  – je index, který je počítán od jedničky a je vždycky k němu přičítána dvojka

Napětí na rezistoru pro vybíjení je definováno vztahem:

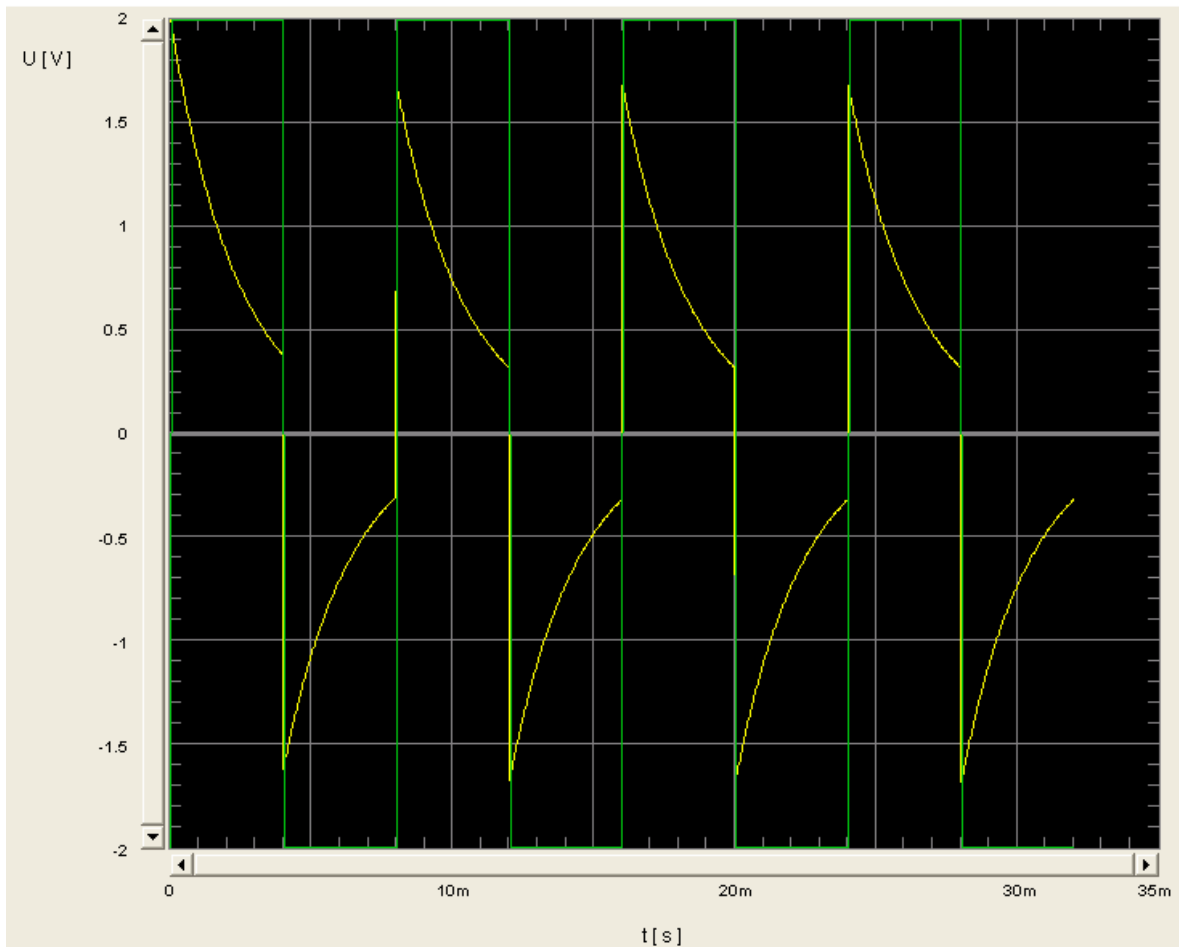
$$u_R(t) = (U_G - U_{MIN}(t-1)) \cdot e^{-\frac{it-(i-1)\tau}{\tau}}. \quad (5.2.2)$$

Index  $i$  v případě vybíjení začíná od dvojky a je vždycky k němu přičítána dvojka.

Jako vstupní napěťový signál byl použit obdélníkový průběh napětí. Příklad, kdy doba ustálení přechodového děje je rovna  $5\tau$  je znázorněn na obrázku (Obr. 37) a případ, kdy doba ustálení přechodového děje není rovna  $5\tau$  je znázorněn na obrázku (Obr. 38).



Obr. 37 – Přechodový děj derivačního článku, kdy doba ustálení přechodového děje je rovna  $5\tau$



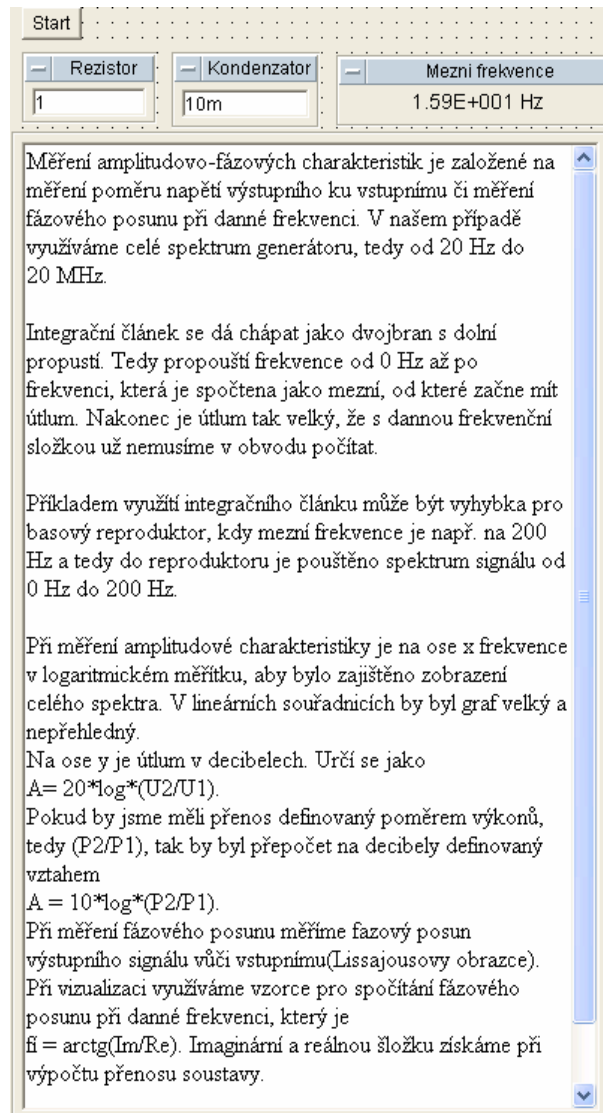
Obr. 38 – Přechodový děj derivačního článku, kdy doba ustálení přechodového děje není rovna  $5\tau$

Při vytváření programu simulace přechodových dějů derivačního článku bylo využito inspirace a použití těchto zdrojů [1], [2], [3], [11].

### 5.3 Simulace AFCH

Simulace je vytvořena také v programu Vee Pro 9.0. Pro simulaci byl zvolen panel pro umístění potřebných ikon a grafů, tak jak tomu bylo i v minulých kapitolách.

Po spuštění simulačního programu jsou v levé horní části panely pro zadávání hodnot, pro výpočet a pro start programu, jak je tomu na obrázku (Obr. 39).

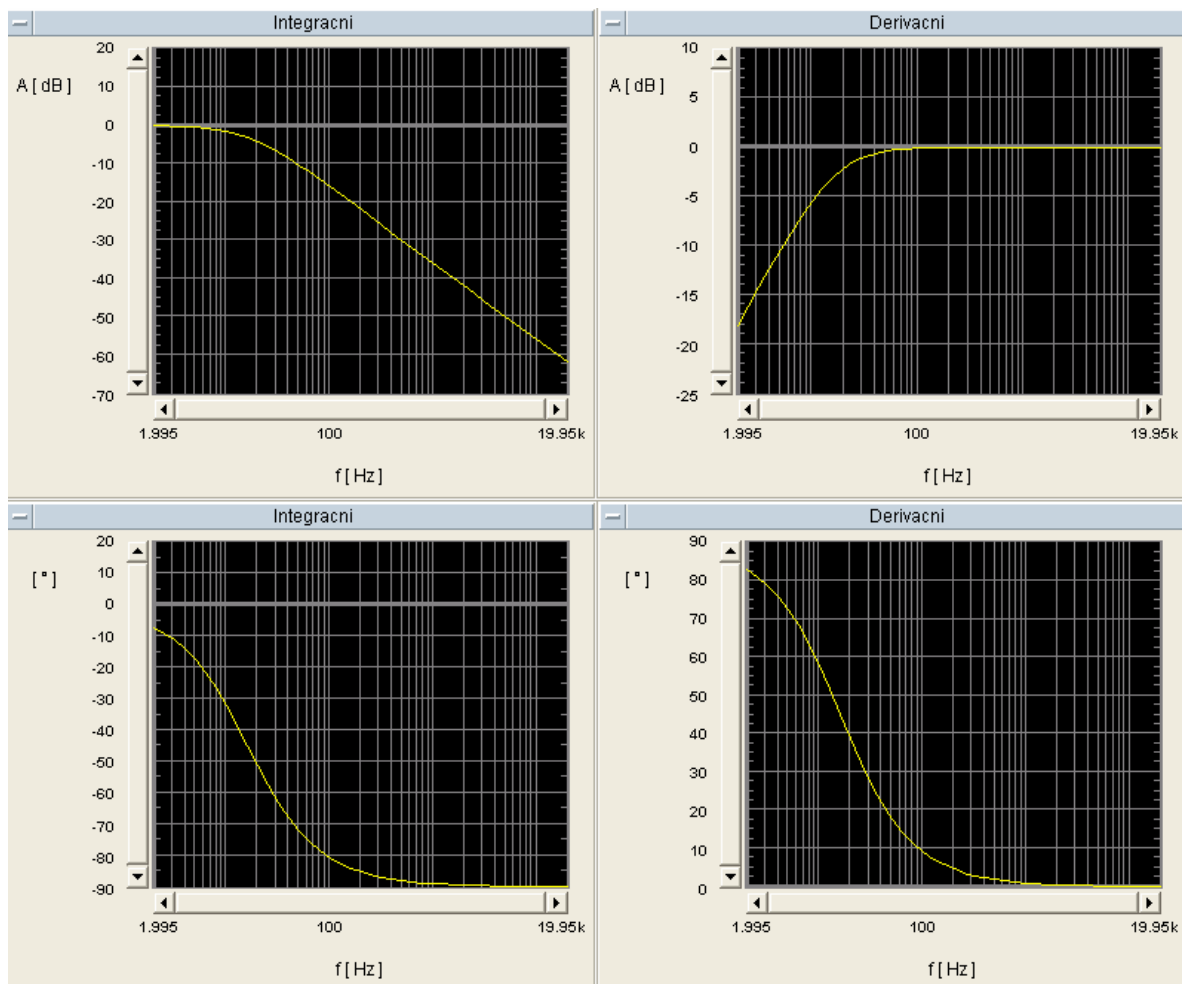


Obr. 39 – Část panelu simulace AFCH

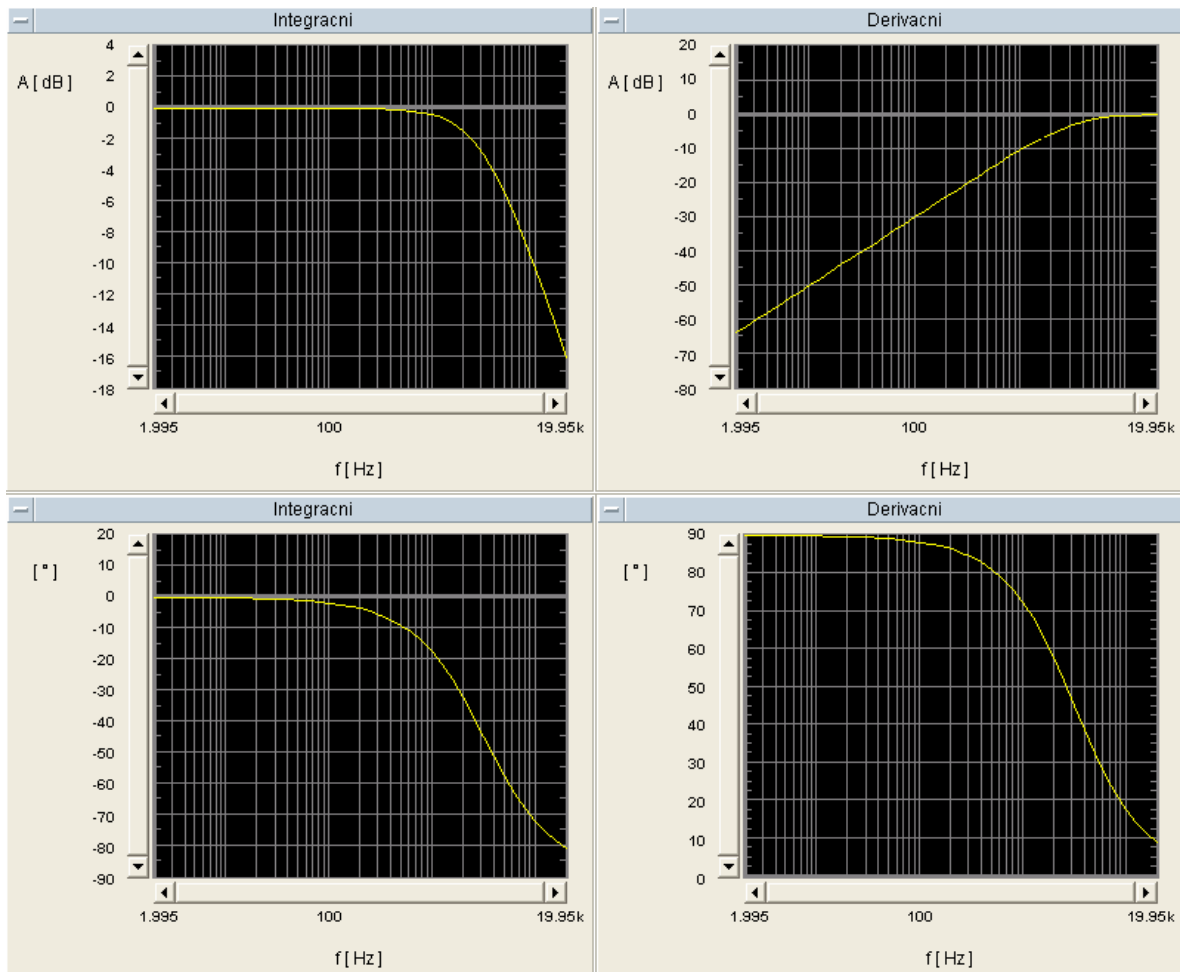
Do panelu kondenzátor a rezistor se zadává kapacita a odpor integračního článku. V poli mezní frekvence je zobrazena hodnota mezní frekvence integračního článku podle zadaných hodnot.

V levé dolní části obrázku (Obr. 39) je umístěna nápověda. Nápověda slouží pro uživatele, kteří se s problematikou AFCH nesetkali. Je zde podrobně vysvětleno, jak se má simulace ovládat a jakým způsobem bylo dosaženo AFCH. Jako vstupní napěťový signál byl použit obdélníkový průběh napětí. Výsledné grafy jsou umístěny v pravé části simulace. Grafy jsou vykresleny pomocí rovnic (2.4.3 a 2.4.4) pro integrační článek a pomocí rovnic (2.5.3 a 2.5.4) pro derivační článek. Frekvence je vynášena v logaritmickém měřítku pro zobrazení celého spektra frekvencí.

Na obrázku (Obr. 40, Obr. 41) jsou znázorněny AFCH integračních a derivačních článků s různou mezní frekvencí.



Obr. 40 – AFCH integračního a derivačního článku s mezní frekvencí 15,9 Hz



Obr. 41 – AFCH integračního a derivačního članku s mezní frekvencí 3,18 kHz

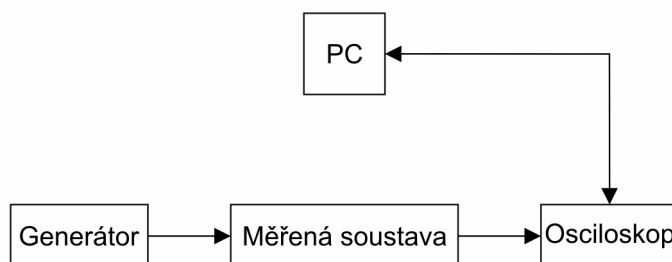
Při vytváření programu pro simulaci AFCH bylo využito inspirace a použití těchto zdrojů [1], [2], [3], [11].

## 6 MĚŘENÍ

Měření z hlediska získávání a zaznamenávání naměřených dat je zcela automatické pomocí softwaru Vee Pro 9.0. Komunikací mezi tímto softwarem a přístroji je pomocí rozhraní USB, nebo GPIB. Při měření přechodového děje, nebo AFCH je použito odlišného zapojení přístrojů a proto budou podrobněji popsány v jednotlivých kapitolách.

### 6.1 Měření přechodového děje integračního článku

Při měření přechodového děje integračního článku zapojíme nejprve měřenou soustavu podle blokového schématu zobrazeného na obrázku (Obr. 42). Jakmile je měřená soustava zapojena, tak si zvolíme hodnoty rezistoru a kondenzátoru a tím určíme časovou konstantu  $\tau$ . Časovou konstantu můžeme spočítat ručně, nebo hodnoty rezistoru a kondenzátoru můžeme zadat do simulačního programu. Simulační program vygeneruje ideální přechodový děj, mezní frekvenci a potřebnou časovou konstantu.



Obr. 42 – Blokové schéma zapojení pro měření přechodového děje integračního článku

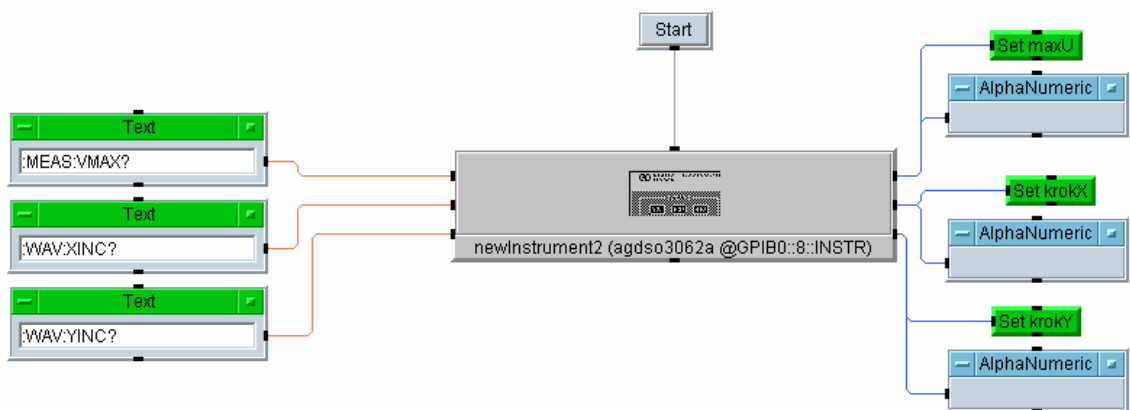
Po zjištění časové konstanty zapneme generátor a osciloskop. V generátoru nastavíme frekvenci, nebo periodu podle vypočtené časové konstanty, dále nastavíme průběh napětového signálu, amplitudu, případně i offset. Po nastavení můžeme pustit výstupní napětový signál do integračního článku aktivací tlačítka Output.

Na osciloskopu můžeme použít buď tlačítko auto-scale, nebo vyhledat přechodový děj ručně. Při ručním hledání nastavujeme časovou základnu podle zvolené periody a hodnotu napětí na dílek nastavujeme podle amplitudy výstupního napětového signálu z generátoru. Přechodový děj by neměl přesahovat velikost displeje osciloskopu. Pro následné zpracování přechodového děje je doporučeno mít zobrazeno na osciloskopu několik přechodových dějů a nikoliv pouze jeden jediný. Toto nastavení provedeme pomocí změny

časové základny. Jakmile je správně nastavena časová základna, tak použijeme tlačítko Single, nebo Run/Stop. Tyto tlačítka slouží pro zobrazení průběhu o délce velikosti časové základny vynásobené délkou osy x. Při zapnutí funkce Single, nebo Run/Stop se přestanou zobrazovat aktuální data vstupující do osciloskopu.

Jakmile je průběh přechodového děje připraven na osciloskopu, tak můžeme spustit program Mereni\_PCh.vee. Tento program stáhne aktuální data z osciloskopu, a uloží je do textového souboru.

Program Mereni\_PCh.vee se skládá ze dvou částí. V první části program pošle dotaz osciloskopu na zjištění hodnot maximálního napětí, velikost rozdílu mezi po sobě jdoucími hodnotami na ose x a velikost rozdílu mezi po sobě jdoucími hodnotami na ose y. Příkazy pro obsluhu osciloskopu se nazývají SCPI commands.

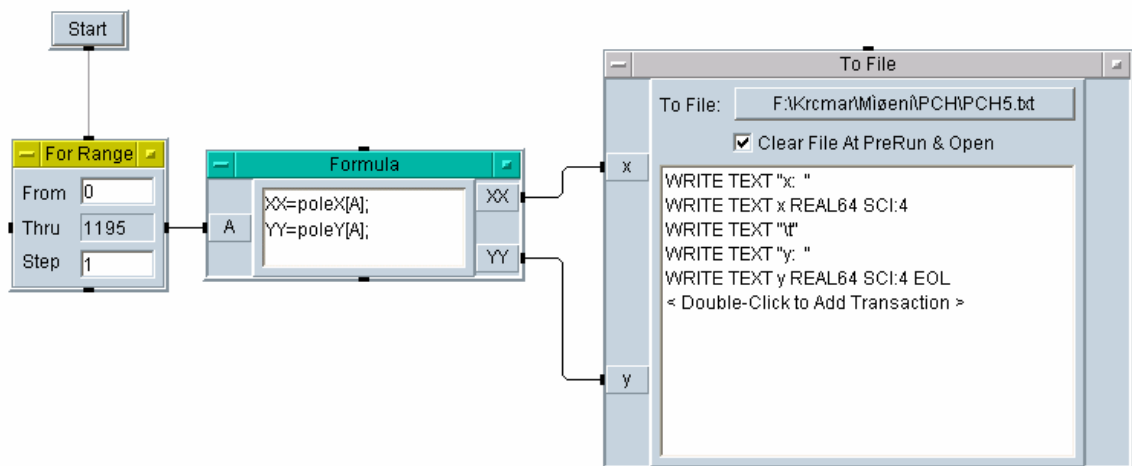


Obr. 43 – Schéma zapojení pro zjištění potřebných hodnot z osciloskopu

Po zjištění potřebných hodnot z osciloskopu pošle program dotaz na data vykreslená na displeji osciloskopu. Podle datového typu, který je zadán v programu, osciloskop pošle data např. od 0.....1024. Tyto data jsou navíc invertovaná. Takže abychom dostali stejný přechodový děj jako je na displeji osciloskopu, tak musíme data:

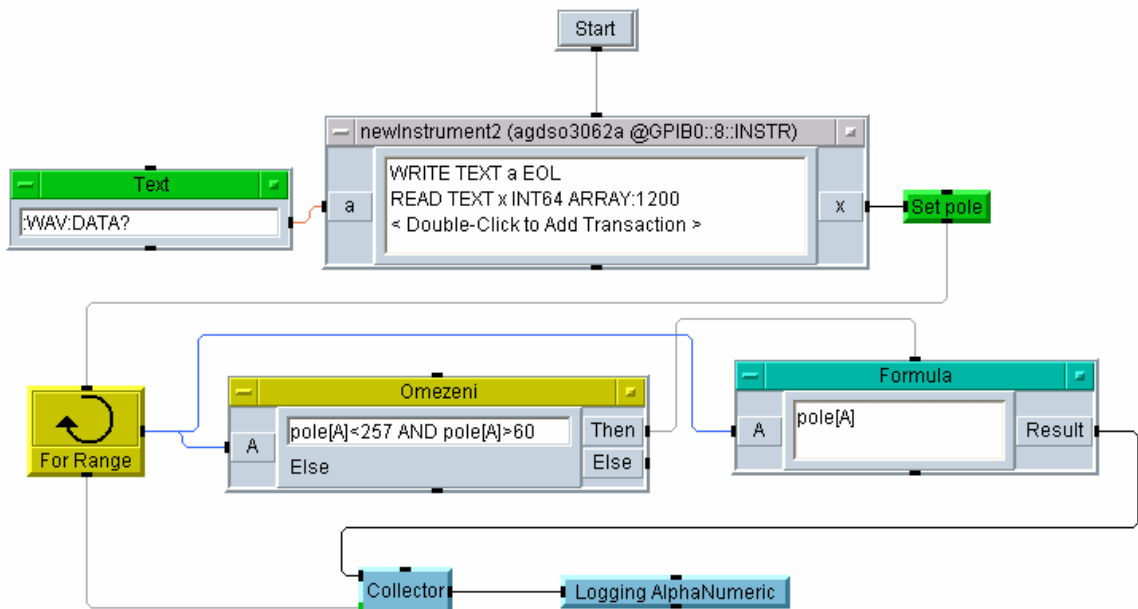
- Invertovat
- Přiřadit jim velikost napětí
- Přiřadit jim časovou hodnotu

Jakmile tyto předešlé body jsou vykonány, tak můžeme naměřená data uložit do souboru.



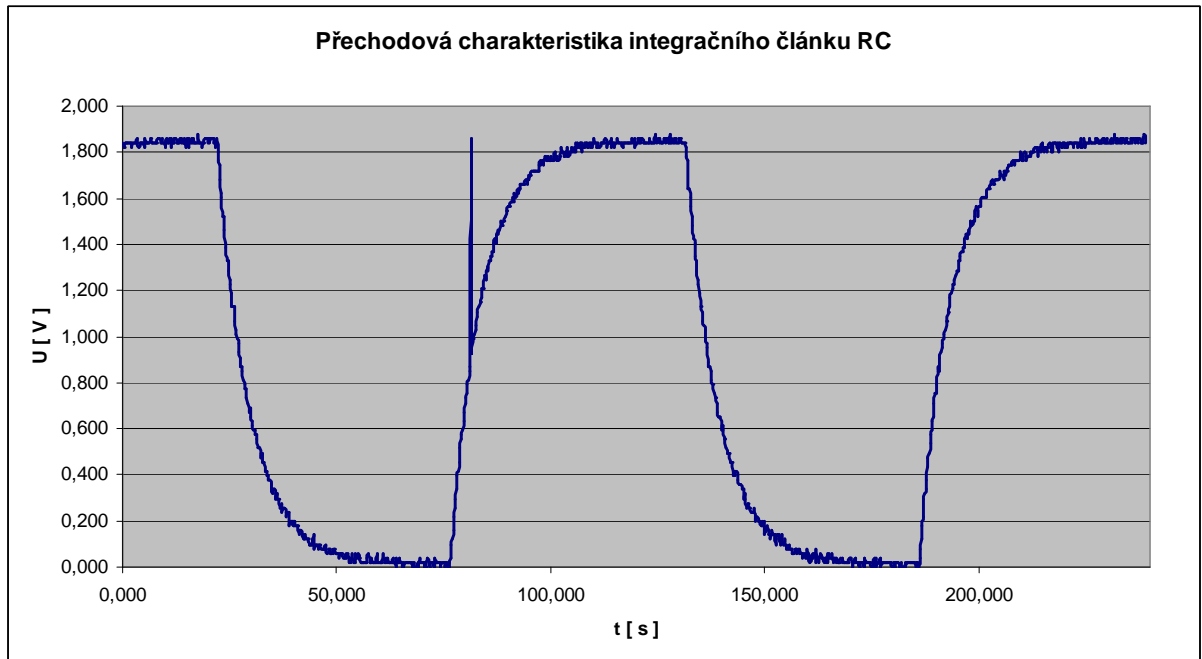
Obr. 44 – Ukázka zapojení ukládání dat do textového souboru

Při exportování dat z osciloskopu do počítače nastávaly chyby zřejmě způsobené přenosem. Někdy byla stažena hodnota dvakrát i třikrát vyšší než byla maximální normální hodnota přechodového děje. Tato chyba byla odstraněna jednoduchým filtrem, který každou staženou hodnotu z osciloskopu porovnal s nastaveným omezením a v případě chyby ji smazal.



Obr. 45 – Ukázka zapojení jednoduché filtru





Obr. 46 – Ukázka chyby měření v čase okolo 75-ti sekund

Po naměření přechodového děje a uložení dat do textového souboru je možné data analyzovat. Tedy zjistit časovou konstantu  $\tau$  z přechodového děje.

Časovou konstantu může vypočítat pomocí modulu Řešitel v programu Excel, nebo pomocí programu Matlab. V Matlabu lze zjistit časovou konstantu pomocí příkazu `lsqcurvefit`.

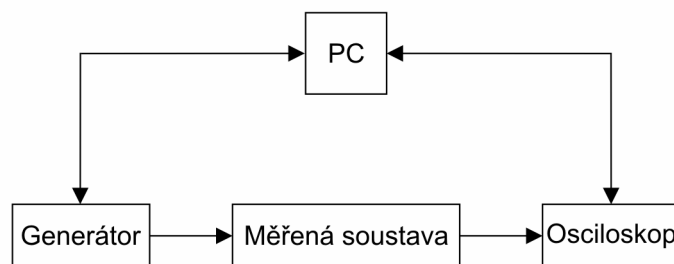
Časová konstanta může být ovlivněna osciloskopem. Z důvodu, že integrační článek obsahuje rezistor a na vstupu osciloskopu je dělič, ve kterém je obsažen také rezistor, tak může dojít ke změně časové konstanty. Pokud se tak stane, tak musíme časovou konstantu integračního článku počítat, jako časovou konstantu zatíženého integračního článku podle vzorce (1.1.1.16).

V příloze PI je ukázka vzorového protokolu, ve kterém je ukázán přechodový děj zatíženého a nezatíženého integračního článku. Časové konstanty jsou spočítány z naměřených dat pomocí modulu Řešitel v programu Excel a pomocí příkazu `lsqcurvefit` v programu Matlab.

Zdroj informací a inspirací pro program Matlab byl čerpán z knížek [7], [8].

## 6.2 Měření AFCH

Při měření ACH integračních a derivačních článků zapojíme nejprve měřenou soustavu podle blokového schématu zobrazeného na obrázku (Obr. 47). Jakmile je měřená soustava zapojena, tak si zvolíme hodnoty rezistoru a kondenzátoru, tím určíme časovou konstantu  $\tau$ . Časovou konstantu můžeme spočítat ručně, nebo hodnoty rezistoru a kondenzátoru můžeme zadat do simulačního programu. Simulační program vygeneruje ideální AFCH a spočítá mezní frekvenci.

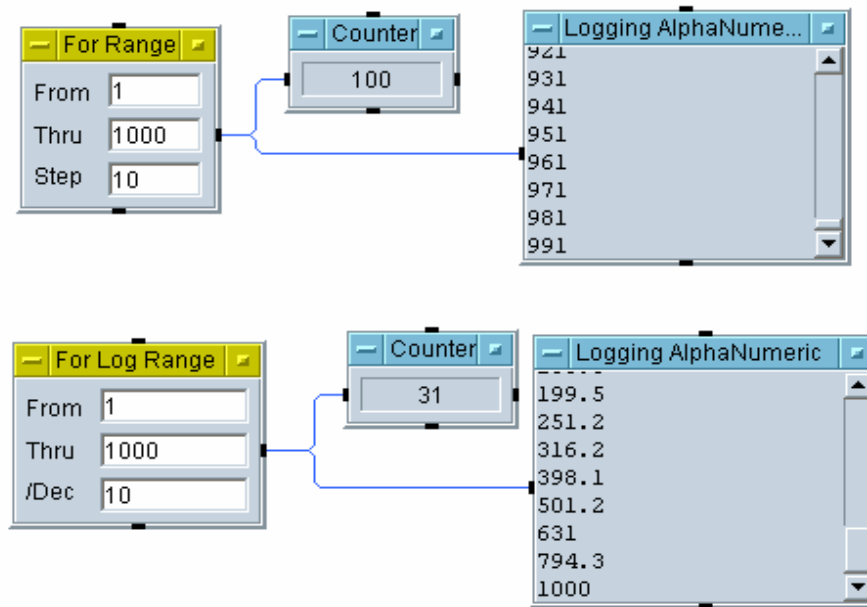


Obr. 47 – Blokové schéma zapojení pro měření ACH

Po zapojení měřeného obvodu musíme sestavit program, který bude ovládat celé měření. Tento program by měl mít tyto vlastnosti:

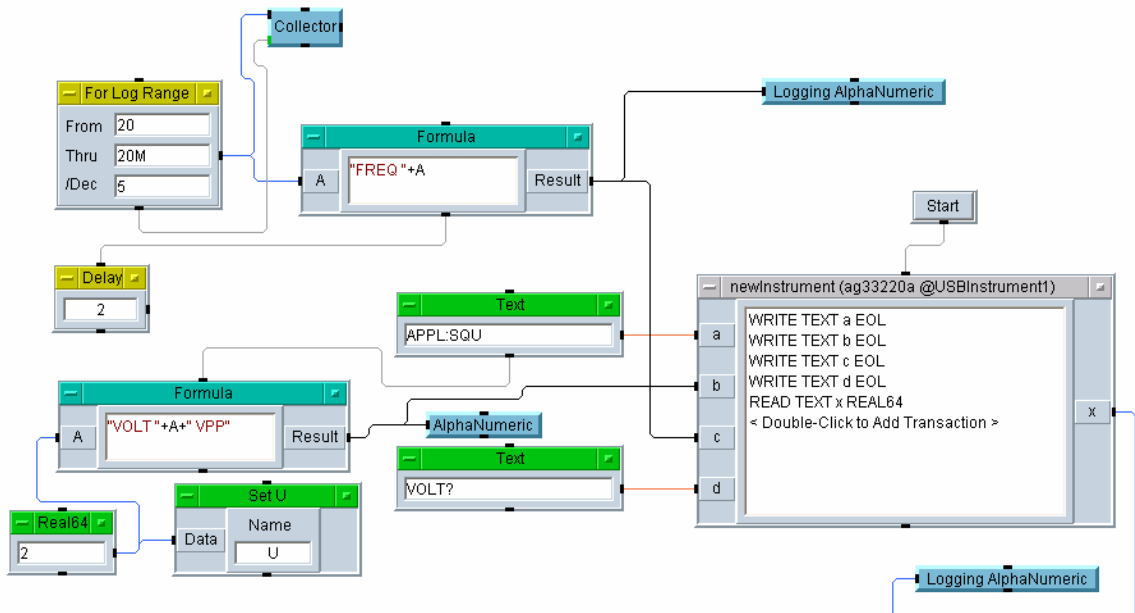
- Nastavení generátoru na požadovaný průběh výstupního napětí a velikost amplitudy
- Generování potřebného spektra frekvencí
- Zaznamenávání hodnot z osciloskopu
- Zaznamenaná data případně upravit k vykreslení charakteristik či uložení do textového souboru k dalšímu zpracování

Požadovaný průběh napětí a amplitudu nastavíme pomocí SCPI příkazů. Pro generování frekvence můžeme použít funkčních bloků nazývaných opakovače (repeater) jako jsou např. For Range, nebo For Long Range. Pro měření ACH je výhodnější použít objekt For Long Range, který generuje určitý počet čísel mezi dekadami. Počet čísel si volí uživatel.



Obr. 48 – Ukázka zapojení a vygenerování hodnot bloky typu For Range a For Long Range

Obrázek (Obr. 48) znázorňuje zapojení funkčních bloků. V bloku s názvem Counter je zobrazen počet hodnot vygenerovaných příslušným blokem. Obrázek (Obr. 49) znázorňuje schéma zapojení ovládní generátoru. Do generátoru jsou pomocí SCPI příkazů posílána data jako jsou frekvence, amplituda a typ průběhu výstupního napětí. Všechny tyto data jsou posílána ve dvousekundových intervalech.



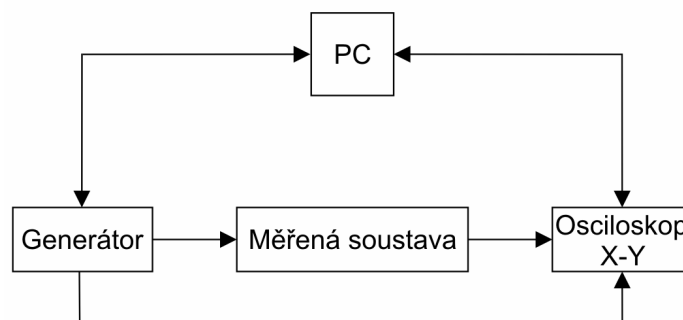
Obr. 49 – Schéma zapojení ovládní generátoru

Zaznamenávání hodnot z osciloskopu se vykonává také pomocí SCPI příkazů. Podle potřeby je možno zaznamenávat tři druhy napětí, které osciloskop dokáže spočítat. Tyto napětí jsou:

- $V_{MAX}$  – maximální napětí zobrazené na displeji osciloskopu
- $V_{RMS}$  – efektivní hodnota napětí zobrazeného na displeji osciloskopu
- $V_{PP}$  – velikost napětí špička – špička zobrazeného na displeji osciloskopu

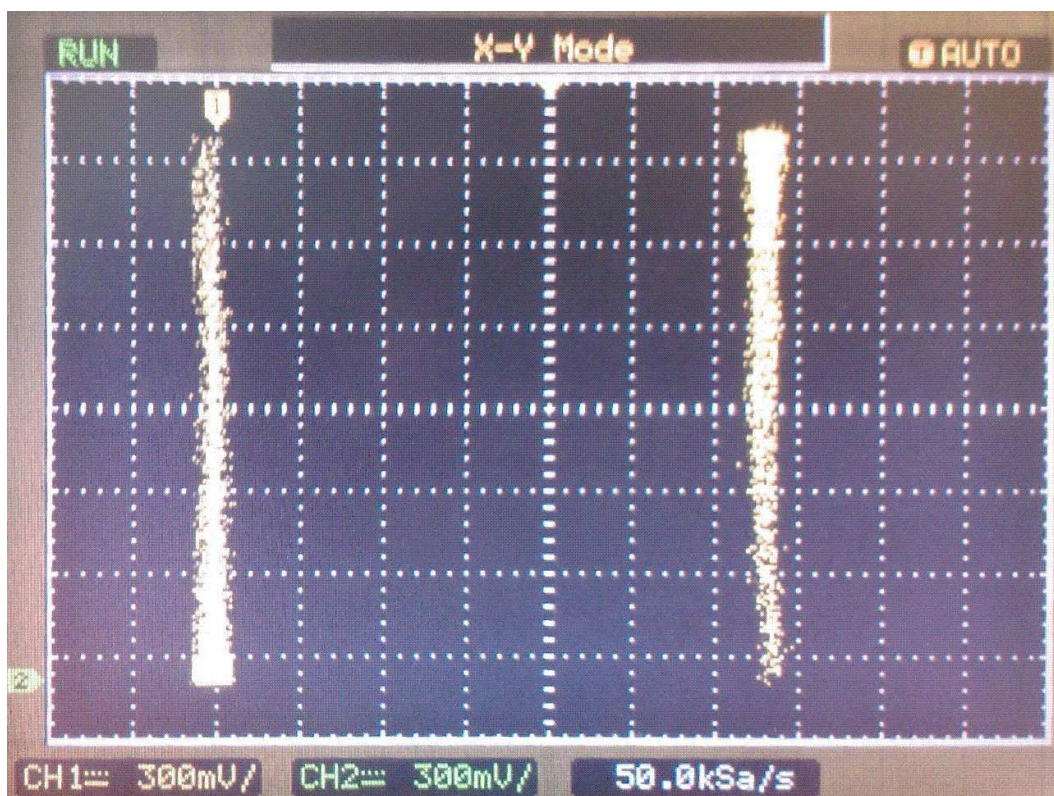
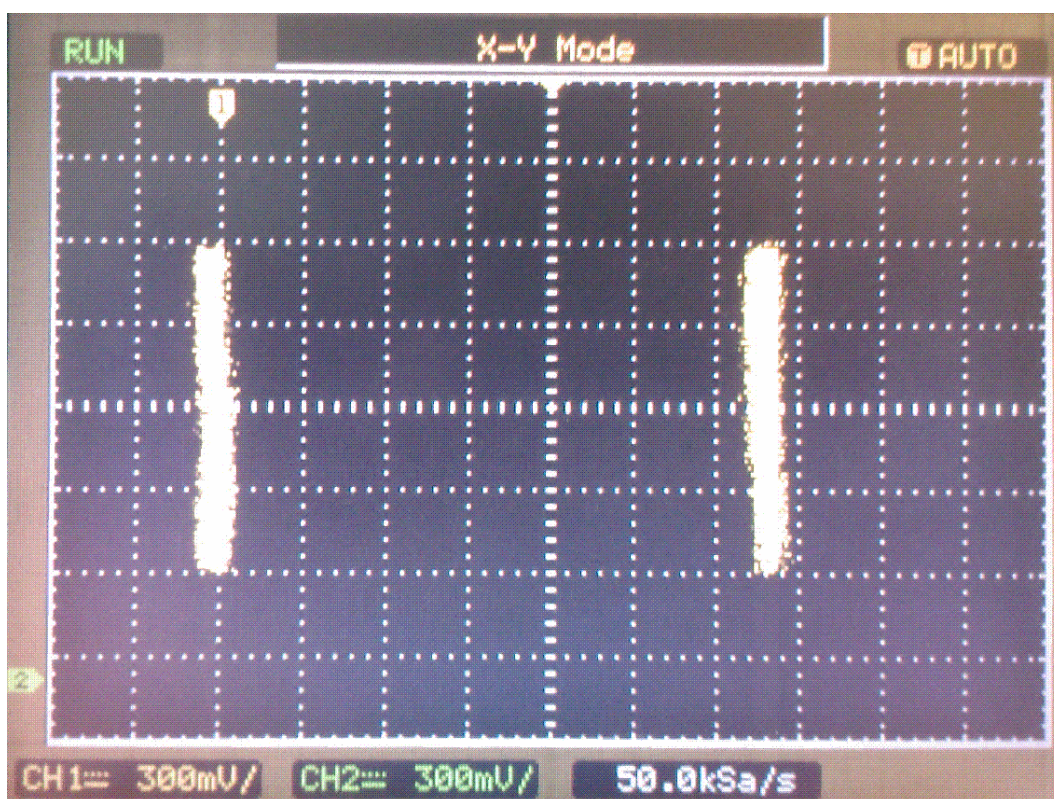
Zaznamenaná data z osciloskopu můžeme po jednoduchém přepočtu podle rovnice (2.1.1) zobrazit v grafu, ale pouze v lineárních souřadnicích. Pro zobrazení v logaritmickém měřítku je potřeba data přepočítat podle rovnice (2.1.4). Ukázka naměřené amplitudové charakteristiky je v příloze PII.

Měření fázové charakteristiky se provádí pomocí osciloskopu v režimu X-Y. Na vstup X se přivádí výstupní napěťový signál generátoru a na vstup Y je přiveden výstupní napěťový signál z měřené soustavy. Schéma zapojení přístrojů je na obrázku (Obr. 50). Fázová charakteristika je rozdíl fázového posunu mezi výstupním a vstupním napětím měřené soustavy pro příslušnou měřenou frekvenci.



Obr. 50 – Blokové schéma pro měření FCH

Na analogových osciloskopech v režimu X-Y se zjišťuje fázový posun pomocí Lissajusových obrazců. U digitálních osciloskopů se Lissajusovy obrazce nevykreslují. Na digitálních osciloskopech jsou zobrazeny při fázovém posunu  $90^\circ$  dvě přímky, které mají stejnou velikost i vzdálenost. Při fázovém posunu menším než je  $90^\circ$  se velikost přímek zmenšuje, ale vzdálenost zůstává stejná. Názorná ukázka je na obrázcích (Obr. 51, Obr. 52). Fázový posun u digitálních osciloskopů lze spočítat pomocí vztahu (2.3.1).

Obr. 51 – Zobrazení fázového posunu na digitálním osciloskopu ( $\varphi = 90^\circ$ )Obr. 52 – Zobrazení fázového posunu na digitálním osciloskopu ( $\varphi < 90^\circ$ )

## ZÁVĚR

Předmětem této práce bylo sestavení laboratorní úlohy pro měření přechodových dějů na RC soustavách do předmětu „Zpracování signálů“.

Při sestavování měřené soustavy byl kladen důraz na jednoduchost a univerzálnost. Proto byly zvoleny dva RC systémy. První z nich je integrační článek a druhý je derivační článek. Oba dva články jsou prvního řádu. Pro výběr hodnoty odporu a kapacity bylo zvoleno použití dvanácti polohových přepínačů. Tudíž pro integrační článek je možnost volby 144 různých druhů časových konstant. Stejně je i vyroben derivační článek.

Za účelem pochopení problematiky přechodových dějů, bylo měření doplněno o simulaci přechodových dějů. V této simulaci si uživatel může zadat jakékoliv hodnoty odporu a kapacity a simulace vygeneruje přechodový děj odpovídající zadaným hodnotám. Simulace spočítá i časovou konstantu a mezní frekvenci podle zadaných hodnot. Simulace je také dobrým vodítkem pro uživatele, aby věděli, jakého přechodového děje se má dosáhnout při měření.

Měření přechodových dějů bylo navíc doplněno o měření amplitudovo – fázových charakteristik (AFCH). AFCH se měří na stejné soustavě jako přechodové děje. Pro AFCH byla také vytvořena simulace pro uživatele, aby získal představu, jak má AFCH vypadat.

Bakalářská práce je rozdělena na část teoretickou a část praktickou. V části teoretické je popsána problematika přechodových dějů integračního a derivačního článku, jak slovně, tak matematicky i graficky. Je zde rovněž popsána tvorba AFCH charakteristik pro integrační a derivační články. Matematický a grafický popis je také obsažen v kapitole zabývající se AFCH.

V praktické části je popsán návrh a výroba měřené soustavy. Dále je zde uveden popis grafického prostředí Vee Pro 9.0. Vlastnosti a základní popis obsluhy osciloskopu Agilent DSO3260A a generátoru Agilent 33220A. Je zde také vysvětlen princip vizualizace přechodového děje a AFCH v programu Vee Pro 9.0. Nakonec je zde popsáno měření přechodového děje a AFCH.

Na konci práce je obsažena příloha, ve které jsou vypracované dva protokoly o měření. První protokol je o měření přechodového děje integračního článku, druhý představuje měření AFCH integračního a derivačního článku.

## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

Main purpose of this bachelor thesis was composition of the laboratory exercise for measurement of transient processes in the RC systems for subject “Signal processing”.

During composition of the measured system was set emphasis on the simplicity and generality. Therefore were chosen two RC systems. First of them is integrative cell and second is derivate cell. Both of them are first order. To choice value of resistance and capacity was chosen twelve positional switches. For integrative cell were accordingly optioned 144 different types of time constants. Derivate cell was made equally.

In order to understanding problems of transient processes, was measurement complemented with a simulation of transient processes. In this simulation user could enter any value of resistance and capacity and simulation generate transient process adequate to entered values. Simulation also counts constant and boundary frequency according to entered values. Simulation is good guideline for users to know what transient process they may reach in measurement.

The measurement of amplitude – phase characteristics (APCH) was added to measurement of transient processes. The APCH is measured on the same system as transient processes. For APCH was created simulation. In this simulation can user acquire idea how can AFCH looks.

The bachelor thesis is divided into theoretical and practical part. Problems of transient processes of integrative and derivate cells, verbally, mathematically and also graphically are described in the theoretical part. It also describes creating of APCH for integrative and derivate cells. Mathematical and graphical description is also entrained in capture which describes APCH.

Projecting and making of the measurement system is described in practical part. There is also mentioned description of graphical software Vee Pro 9.0. There are discussed properties and basic descriptions about oscilloscope Agilent DSO3260A and generator Agilent 33220A too. Explained is principle of visualization transient processes and APCH in program Vee Pro 9.0. Finally there is described measurement of transient processes and APCH.

At the end of the bachelor thesis is included supplement with two created protocols about measurement. The first protocol is about measurement of transient process of integrative cell. The second protocol is about measurement of APCH of integrative and derivate cells.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

### Knihy:

- [1] Agilent Technologies. *Advanced Programming Techniques*. Edition 1. U.S : [s.n.], 2002. 612 s. E2120-90002.
- [2] Agilent Technologies. *Agilent VEE Practical Graphical Programming*. First Edition. Malaysia : [s.n.], May 2008. 474 s. W1141-10038.
- [3] Agilent Technologies. *Agilent VEE Pro User*. U.S. : [s.n.], 2005. 628 s. W1140-90036.
- [4] LÁNIČEK, Robert. *Elektronika : obvody - součástky - děje*. 1. vydání. Praha : BEN, 1998. 500 s. ISBN 80-86056-25-2.
- [5] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika I*. 1. vydání. České Budějovice : Kopp, 2002. 271 s. ISBN 80-7232-171-4.
- [6] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika II*. 1. vydání. České Budějovice : Kopp, 2003. 267 s. ISBN 80-7232-212-5.
- [7] ZAPLATÍLEK, Karel ; DOŇAR, Bohuslav. *MATLAB - tvorba uživatelských aplikací*. 1. vydání. Praha : BEN, 2004. 216 s. ISBN 80-7300-133-0.
- [8] ZAPLATÍLEK, Karel ; DOŇAR, Bohuslav. *MATLAB pro začátečníky*. 2. vydání. Praha : BEN, 2005. 152 s. ISBN 80-7300-175-6.
- [9] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. 1. vydání. Praha : BEN, 2000. 653 s. ISBN 80-86056-47-3.
- [10] DOBEŠ, Josef ; ŽALUD, Václav . *Moderní radiotechnika*. 1. vydání. Praha : BEN, 2006. 768 s. ISBN 80-7300-132-2.
- [11] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky 4. díl : Přenosy v lineárních obvodech a úvod do zesilovačů*. Praha : BEN, 2006. 296 s. ISBN 80-7300-185-3.
- [12] STRÁNSKÝ, Josef, et al. *Polovodičová technika I*. Praha : SNTL, 1981. 400 s. 04-522-81.
- [13] BARTÁK, Ing. Stanislav, et al. *Radioelektronická příručka - I. díl*. 1. vydání . Praha : Práce, 1972. 696 s. 24-091-72.

- [14] DIETMEIER, Ulrich . *Vzorce pro elektroniku*. 6. dotisk 1. českého vydání. Praha : BEN, 2004. 256 s. ISBN 80-86056-53-8.
- [15] SEDLÁČEK, Miloš. *Zpracování signálů v měřicí technice*. Dotisk 2. vydání. Praha : ČVUT : [s.n.], 1999. 234 s. ISBN 8001017850.

### Webové stránky:

- [16] *Http://elektro.utb.cz/* [online]. 2004 [cit. 2010-04-17]. Integrovaný článek. Dostupné z WWW: <[http://elektro.utb.cz/laboratore/uloha\\_09.zip](http://elektro.utb.cz/laboratore/uloha_09.zip)>.
- [17] *Http://htest.cz/index.php* [online]. 2007 [cit. 2010-05-13]. Seznámení s přístrojem. Dostupné z WWW: <[http://htest.cz/download/33220A\\_manual\\_CZ.pdf](http://htest.cz/download/33220A_manual_CZ.pdf)>.
- [18] *Http://www.cadware.cz/* [online]. 2006 [cit. 2010-05-09]. Eagle. Dostupné z WWW: <[http://www.cadware.cz/download/letaky/letak\\_eagle\\_cam350.pdf](http://www.cadware.cz/download/letaky/letak_eagle_cam350.pdf)>.
- [19] *Http://www.eagle.cz* [online]. 2001, 22.9.2002 [cit. 2010-05-09]. Informace. Dostupné z WWW: <[http://www.eagle.cz/info.htm#Layout Editor](http://www.eagle.cz/info.htm#Layout%20Editor)>.
- [20] *Http://www.home.agilent.com/agilent/home.jsp?cc=US&lc=eng* [online]. 2006 [cit. 2010-05-13]. Agilent 33220A. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5988-8544EN.pdf>>.
- [21] *Http://www.home.agilent.com/agilent/home.jsp?cc=US&lc=eng* [online]. 2007 [cit. 2010-05-13]. User's Guide. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/33220-90002.pdf>>.
- [22] *Http://www.home.agilent.com/agilent/home.jsp?cc=US&lc=eng* [online]. 2010 [cit. 2010-05-13]. Data Sheet. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-9641EN.pdf>>.
- [23] *Http://htest.cz/index.php* [online]. březen 2005 [cit. 2010-05-13]. Osciloskopy řady 3000. Dostupné z WWW: <[http://www.htest.cz/download/DSO3000\\_CZ.pdf](http://www.htest.cz/download/DSO3000_CZ.pdf)>.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$\tau$	časová konstanta
$\omega$	úhlová rychlost; úhlová frekvence
$\varphi$	fázový posun
$\Omega$	Ohm je jednotka odporu
A	Napět'ový přenos
AC	střídavé napětí
AFCH	Amplitudovo – fázová charakteristika.
AM	Napět'ová modulace
BNC	Bajonet Neill-Concelman konektor
C	Kondenzátor
dB	logaritmická jednotka k vyjádření velikosti útlumu
DC	stejnoseměrné napětí
DLL	Dynamic Link Library
DPS	Deska plošného spoje
dq	diferenciál náboje
F	Farad je jednotka kapacity
FM	Frekvenční modulace
FSK	Modula pomocí posunu kmitočtu
GND	GrouND
GPIB	General Purpose Interface Bus
Hz	jednotka kmitočtu
Im	Imaginární složka frekvenčního přenosu
j	komplexní jednotka
LAN	Local Area Network

---

LXI	Byl založen jako nástupce GPIB, předností je vysoká přenosová rychlost
MSa/s	Mega Sampling per to second – 1 000 000 vzorků za sekundu
PC	Personal computer
PM	Pulzní modulace
PWM	Pulzně šířková modulace
Q	Náboj
q(t)	Aktuální velikost náboje v časovém okamžiku
R	Rezistor.
$R  R_z$	Paralelní kombinace odporů
RC	Soustava skládající se kombinací rezistorů a kondenzátorů.
Re	Reálná složka frekvenčního přenosu
RS-232	Definice rozhraní sériového portu
ss	stejnoseměrné napětí
st	střídavé napětí
U	Napětí
$u_C(t)$	Aktuální velikost napětí v časovém okamžiku
USB	Universal Serial Bus
V/DIV	1 Volt na jeden dílek
VXI	Výkonná stavebnice pro tvorbu měřících a testovacích systémů

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 - Ukázka typů propustí RC filtrů .....	11
Obr. 2 – Schéma zapojení integračního článku .....	12
Obr. 3 – Zapojení integračního článku pro odvození přenosu.....	13
Obr. 4 – Průběh proudu $i$ , napětí na rezistoru $u_R$ , napětí na kondenzátoru $u_C$ při nabíjení integračního článku.....	14
Obr. 5 - Průběh proudu $i$ , napětí na rezistoru $u_R$ a napětí na kondenzátou $u_C$ při vybíjení kondenzátoru .....	15
Obr. 6 – Schéma zapojení zatíženého integračního článku, náhradního zapojení pomocí Théveninovy věty a realizovaná náhrada zatíženého integračního článku. ....	15
Obr. 7– Ukázka přechodového děje integračního článku pro parametry $\tau = 1$ s a $T = 10$ s .....	17
Obr. 8 – Schéma zapojení derivačního článku.....	18
Obr. 9 – Schéma zapojení derivačního článku pro matematický popis .....	19
Obr. 10 – Schéma zapojení zatíženého derivačního článku a upraveného zatíženého derivačního článku.....	20
Obr. 11 – Ukázka přechodového děje derivačního článku pro parametry $\tau = 1$ s a $T = 10$ s .....	21
Obr. 12 – Ukázka AFCH s časovou konstantou $\tau = 1$ s.....	22
Obr. 13 – Ukázka zapojení a měření amplitudové charakteristiky.....	24
Obr. 14 – Ukázka zapojení a měření fázové charakteristiky .....	25
Obr. 15 – Schéma zapojení impedančního děliče.....	26
Obr. 16 – Ukázka prostředí editoru schémat .....	31
Obr. 17 – Ukázka prostředí editoru spojů.....	32
Obr. 18 – Schéma zapojení integračního článku .....	33
Obr. 19 – Schéma zapojení derivačního článku.....	34
Obr. 20 – Schéma spojů integračního článku (vlevo) a derivačního článku (vpravo).....	34
Obr. 21 – Osazená DPS ze strany součástek.....	35
Obr. 22 – Osazená DPS ze strany spojů .....	35
Obr. 23 – Čelní panel.....	35
Obr. 24 – Hotový výrobek s potřebným příslušenstvím .....	36

Obr. 25 – Vee Pro 9.0 .....	37
Obr. 26 – Základní popis programu Vee Pro 9.0 .....	38
Obr. 27 – Osciloskop řady DSO 3000 .....	39
Obr. 28 – Popis čelního panelu osciloskopu .....	40
Obr. 29 – Popis aktivního displeje osciloskopu .....	41
Obr. 30 – Generátor DSO 33220A .....	42
Obr. 31 – Popis čelního panelu generátoru .....	43
Obr. 32 – Ukázka číselného zadávání hodnot .....	44
Obr. 33 – Ukázka DC zdroje napětí .....	44
Obr. 34 – Část panelu simulace .....	45
Obr. 35 – Ukázka přechodového děje integračního článku v simulačním prostředí .....	46
Obr. 36 – Přechodový děj integračního článku, kdy doba ustálení přechodového děje není rovna $5\tau$ .....	48
Obr. 37 – Přechodový děj derivačního článku, kdy doba ustálení přechodového děje je rovna $5\tau$ .....	49
Obr. 38 – Přechodový děj derivačního článku, kdy doba ustálení přechodového děje není rovna $5\tau$ .....	50
Obr. 39 – Část panelu simulace AFCH .....	51
Obr. 40 – AFCH integračního a derivačního článku s mezní frekvencí 15,9 Hz .....	52
Obr. 41 – AFCH integračního a derivačního článku s mezní frekvencí 3,18 kHz .....	53
Obr. 42 – Blokové schéma zapojení pro měření přechodového děje integračního článku .....	54
Obr. 43 – Schéma zapojení pro zjištění potřebných hodnot z osciloskopu .....	55
Obr. 44 – Ukázka zapojení ukládání dat do textového souboru .....	56
Obr. 45 – Ukázka zapojení jednoduché filtru .....	56
Obr. 46 – Ukázka chyby měření v čase okolo 75-ti sekund .....	57
Obr. 47 – Blokové schéma zapojení pro měření ACH .....	58
Obr. 48 – Ukázka zapojení a vygenerování hodnot bloky typu For Range a For Long Range .....	59
Obr. 49 – Schéma zapojení ovládaní generátoru .....	59
Obr. 50 – Blokové schéma pro měření FCH .....	60
Obr. 51 – Zobrazení fázového posunu na digitálním osciloskopu ( $\varphi = 90^\circ$ ) .....	61

---

Obr. 52 – Zobrazení fázového posunu na digitálním osciloskopu ( $\varphi < 90^\circ$ )..... 61

## SEZNAM PŘÍLOH

- PI Vzorový protokol – „Měření přechodových dějů na RC soustavách (Integrační článek)“.
- PII Vzorový protokol – „Měření amplitudovo – fázových charakteristik“.
- PIII Disk CD s bakalářkou prací, s programy a vzorovými protokoly.



# PŘÍLOHA P I: VZOROVÝ PROTOKOL - MĚŘENÍ PŘECHODOVÝCH DĚJŮ INTEGRAČNÍHO ČLÁNKU

## Měření přechodových dějů na RC soustavách (integrační článek)

### 1. Cíl:

Cílem úlohy je seznámení se s funkcí a principem RC článku, jakožto s reálným modelem. Získané charakteristiky přechodového děje mohou být dále porovnány s charakteristikami získanými v simulačním programu *integracni\_clanek.vee*.

### 2. Teorie:

Kondenzátor má vlastnost uchovávat energii v podobě elektrostatického pole, tudíž má podobnou vlastnost jako akumulátor, až na velikost a dobu uchování energie. Pokud kondenzátor přinutíme ke změně, čí velikosti náboje, tak můžeme pozorovat přechodový děj. Tedy nabíjení a vybíjení kondenzátoru.

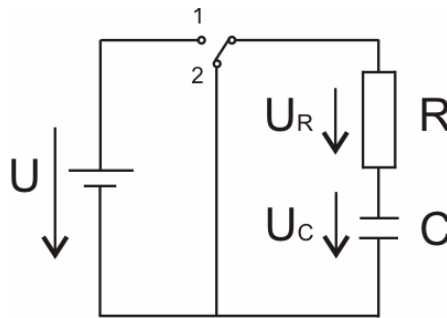
Změny mohou být způsobeny:

- Změnou parametru aktivního prvku (např. připojením nebo odpojením zdroje napětí nebo proudu, změnou průběhu vstupního signálu – obdélníkový, sinusový, pilovitý průběh).
- Změnou parametru pasivního prvku (např. zvětšením, nebo zmenšením hodnoty R, C).
- Změnou topologické struktury obvodu zapojení (např. zkratováním větve, případně připojením další větve).

RC obvod, neboli integrační článek se dá chápat jako dvojbran s dolní propustí. Tedy propouští jen nízké frekvence. Frekvence vyšší než je mezní frekvence utlumuje. Dvojbran se dá popsat impedanční, admitanční, hybridní sériově paralelní, hybridní paralelně sériové, kaskádní a zpětně kaskádní rovnicí. Pro měření přechodových charakteristik si vystačíme s tím, že popíšeme integrační článek impedančním přenosem. Jelikož se jedná o obvod s jedním setrvačným prvkem (kondenzátor), tak budeme popisovat obvod diferenciálními rovnicemi prvního řádu.

Při odvozování přenosu integračního članku budeme počítat s počátečními podmínkami  $U_0 = 0 \text{ V}$ , dále také, že přepínač na obrázku (Obr. č.1) v poloze 1 je pro nabíjení kondenzátoru

a poloha 2 je pro vybíjení kondenzátoru. Přepínač by se dal nahradit tehdy, pokud bychom jako vstupní signál použili obdélníkový průběh.



Obr. č.1 – schéma zapojení integračního članku

Pokud je na kondenzátoru nulové napětí, tak má nulový elektrický náboj. To také vyplývá z rovnice:

$$Q = C \cdot U \quad (2.1)$$

Při nabíjení nebo vybíjení je na svorkách kondenzátoru napětí s časem se mění podle vztahu:

$$u_C(t) = \frac{q(t)}{C} \quad (2.2)$$

Při nabíjení (Obr. č.1 poloha 2) teče obvodem proud o velikosti:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = \frac{u_R(t)}{R} \quad (2.3)$$

Jelikož protékající proud způsobuje na rezistoru R úbytek napětí  $u_R(t)$ , tak podle II. Kirchhoffova zákona platí:

$$U = u_C(t) + u_R(t) = \frac{q(t)}{C} + R \cdot i(t), \quad (2.4)$$

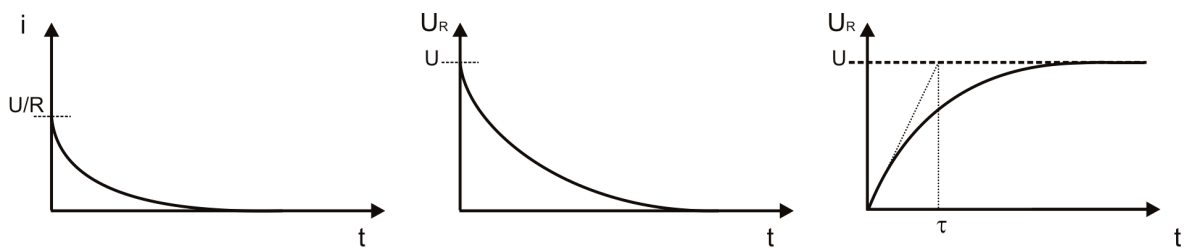
po úpravě:

$$\frac{U}{R} = \frac{q(t)}{C \cdot R} + i(t) = \frac{q(t)}{C \cdot R} + \frac{dq}{dt} \quad (2.5)$$

Po vyřešení rovnice (2.5) získáme pro jednotlivá napětí na kondenzátoru a rezistoru vztahy:

$$u_C(t) = U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) = U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (2.6)$$

$$u_R(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2.7)$$



Obr. č.2 – Průběh proudu  $i$ , napětí na rezistoru  $u_R$  a napětí na kondenzátoru  $u_C$  při nabíjení kondenzátoru

Při vybíjení (Obr. č.1 poloha 2) začne obvodem téci proud opačným směrem, ale jen za podmínky pokud byl předtím kondenzátor nabit. Při vybíjení kondenzátoru platí, že součet úbytků napětí na kondenzátoru a na rezistoru se musí rovnat 0, tedy:

$$u_C(t) + u_R(t) = 0 \Rightarrow u_R(t) = -u_C(t), \quad (2.8)$$

po dosazení do vztahu (2.8) za  $u_R(t)$  a  $u_C(t)$  dostaneme vztah:

$$u_C(t) + u_R(t) = \frac{q(t)}{C} + R \cdot i(t) = \frac{q(t)}{C} + R \cdot \frac{dq}{dt}. \quad (2.9)$$

Řešením rovnice (2.9) získáme pro jednotlivá napětí na kondenzátoru a rezistoru vztahy:

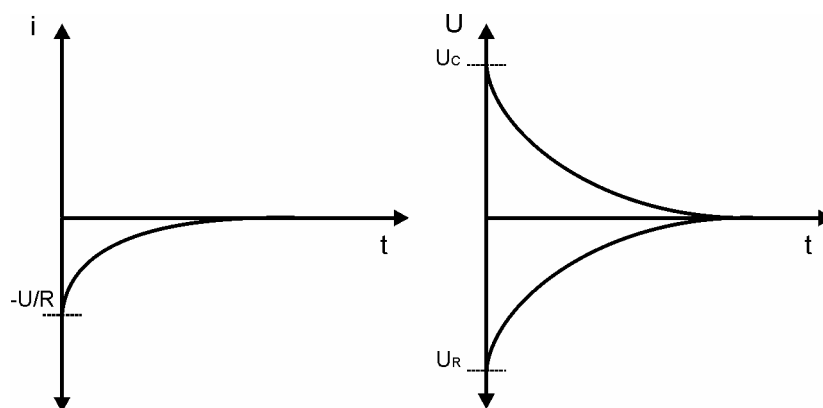
$$u_C(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2.10)$$

$$u_R(t) = -U \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = -U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2.11)$$

Pro protékající proud obvodem, který teče opačným směrem než při nabíjení, dostaneme vztahy:

$$i(t) = \frac{u_R(t)}{R} = -\frac{U}{R}, \quad (2.12)$$

$$u_R(t) = -\frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} = -\frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2.13)$$

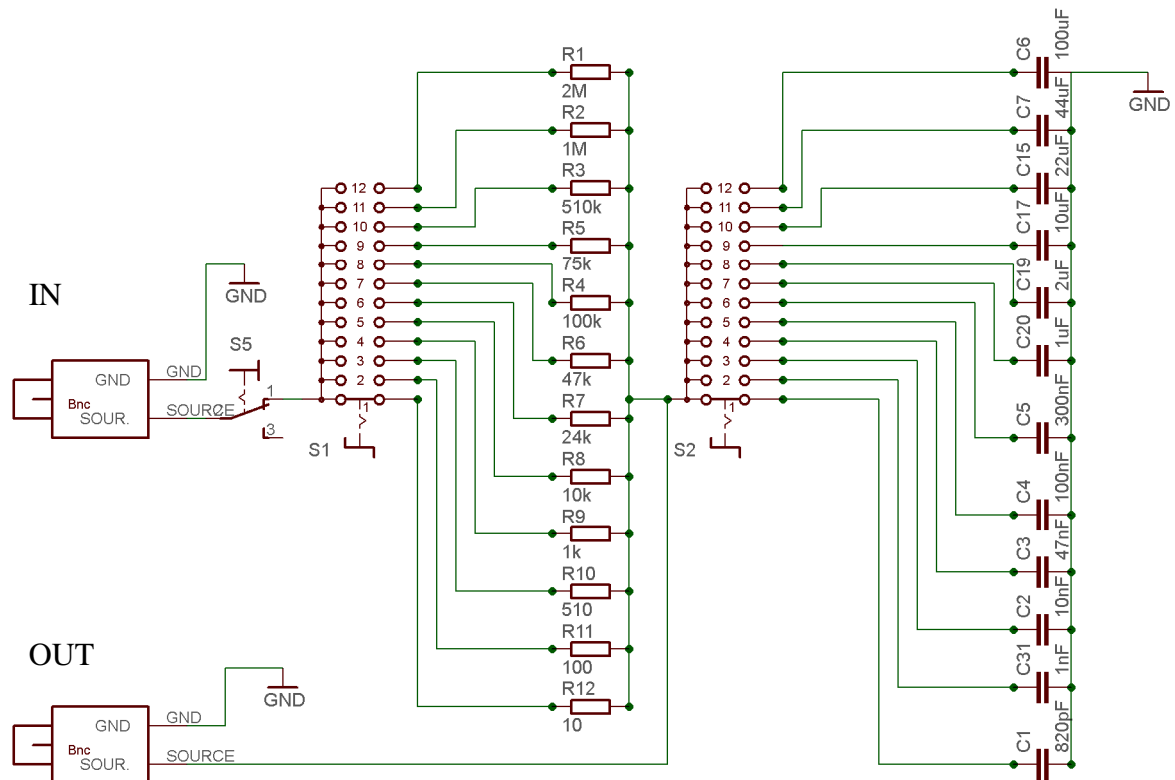


Obr. č.3 – Průběh proudu  $i$ , napětí na rezistoru  $u_R$  a napětí na kondenzátou  $u_C$  při vybíjení kondenzátoru

Při měření přechodové charakteristiky integračního článku je dobré znát, za jak dlouhou dobu se přechodový děj ustálí.

- za dobu  $t = \tau$  se kondenzátor nabije na 63,2 % hodnoty vstupního napětí ( $U_G$ ).
- za dobu  $t = 3\tau$  se kondenzátor nabije na 95 % hodnoty vstupního napětí ( $U_G$ ).
- za dobu  $t = 5\tau$  se kondenzátor nabije na 99,3 % hodnoty vstupního napětí ( $U_G$ ).
- při delším zvětšování doby  $t$  než je  $5\tau$  se přechodová charakteristika integračního článku výrazně nemění.

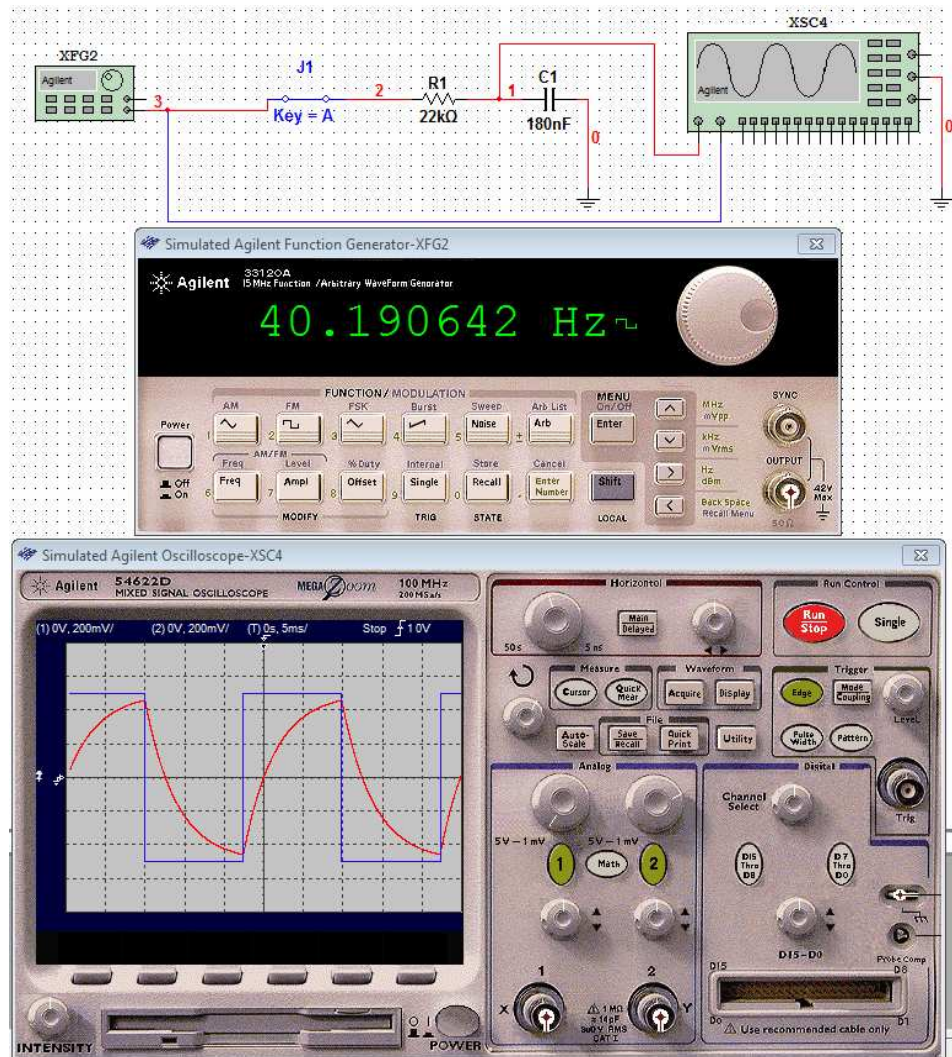
### 3. Měřená soustava:



Obr. č.4 – Schéma zapojení integračního článku

Integrační článek je vyroben jako univerzální z hlediska časových konstant, které zde jsou od desítek mikrosekund až po desítky sekund. Malé časové konstanty pro měření amplitudovo-fázových charakteristik a velké časové konstanty z důvodu měření přechodových dějů.

Přepínač S5 je zde z důvodu univerzálnosti. Pokud jako vstupní signál použijeme generátor, tak spínač bude trvale sepnutý. Pokud ale použijeme zdroj stejnosměrného proudu s konst. napětím, tak tento přepínač budeme nuceni využít.



Obr. č.5 – ukázka zapojení a simulace integračního článku 1.řádu

Jako vstupní signál byl zvolen obdélníkový průběh (modrá barva) a odezva (výstup) na vstupní signál je přechodový děj integračního článku (červená barva).

#### 4. Úkol:

1. Seznamte se s programem *Mereni\_PCH.vee*, který obsluhuje komunikaci s osciloskopem a zprostředkovává naměřená data
2. Naměřte charakteristiku přechodového děje pro dva články s různou časovou konstantou  $\tau$ , z čehož jeden článek bude s rezistorem o hodnotě 1 M $\Omega$ , nebo 2 M $\Omega$
3. Naměřená data zpracujte a zjistěte časovou konstantu  $\tau$  (např. pomocí řešitele v programu EXCEL, nebo pomocí programu MATLAB).
4. Na závěr výsledky porovnejte, pokud nebudou souhlasit, tak odůvodněte, proč se tomu tak stalo.

#### Použitá literatura:

DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky 4. díl : Přenosy v lineárních obvodech a úvod do zesilovačů*. Praha : BEN, 2006. 296 s. ISBN 80-7300-185-3.

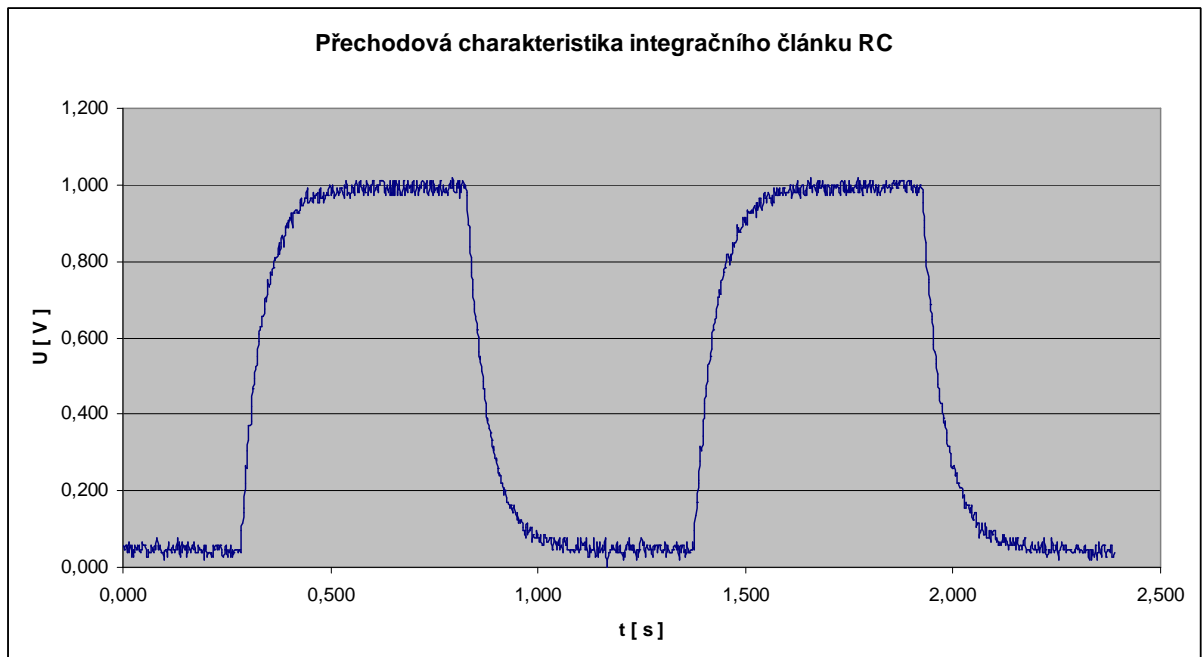
DIETMEIER, Ulrich . *Vzorce pro elektroniku*. 6. dotisk 1. českého vydání. Praha : BEN, 2004. 256 s. ISBN 80-86056-53-8.

*Http://elektro.utb.cz/* [online]. 2004 [cit. 2010-04-17]. Integrovaný článek. Dostupné z WWW: <[http://elektro.utb.cz/laboratore/uloha\\_09.zip](http://elektro.utb.cz/laboratore/uloha_09.zip)>.

## 5. Měření:

Při měření přechodové charakteristiky byl obvod zapojen podle obrázku (Obr. č.5). První integrační článek byl složen z rezistoru  $R = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $C = 100 \text{ nF}$  a  $U_{Vst} = 1 \text{ V}$ . Předpokládaná hodnota časové konstanty  $\tau$  byla tedy  $0,1 \text{ s}$ .

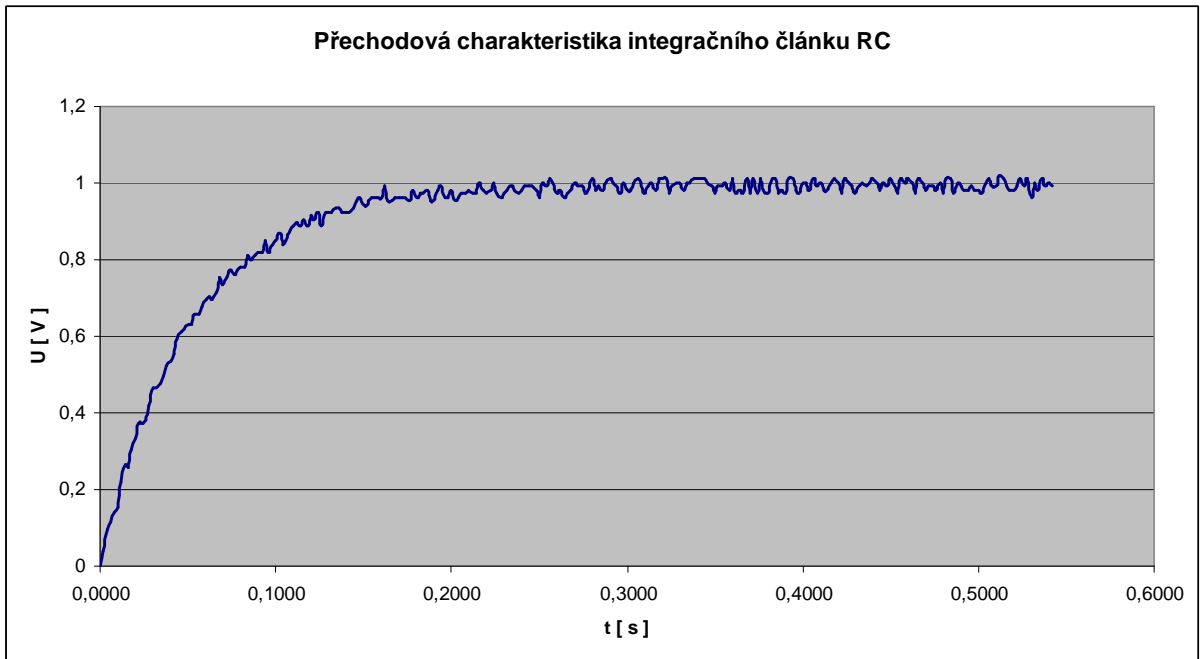
Naměřená data přechodové charakteristiky byla uložena do textového souboru, který můžeme později importovat do programu Excel.



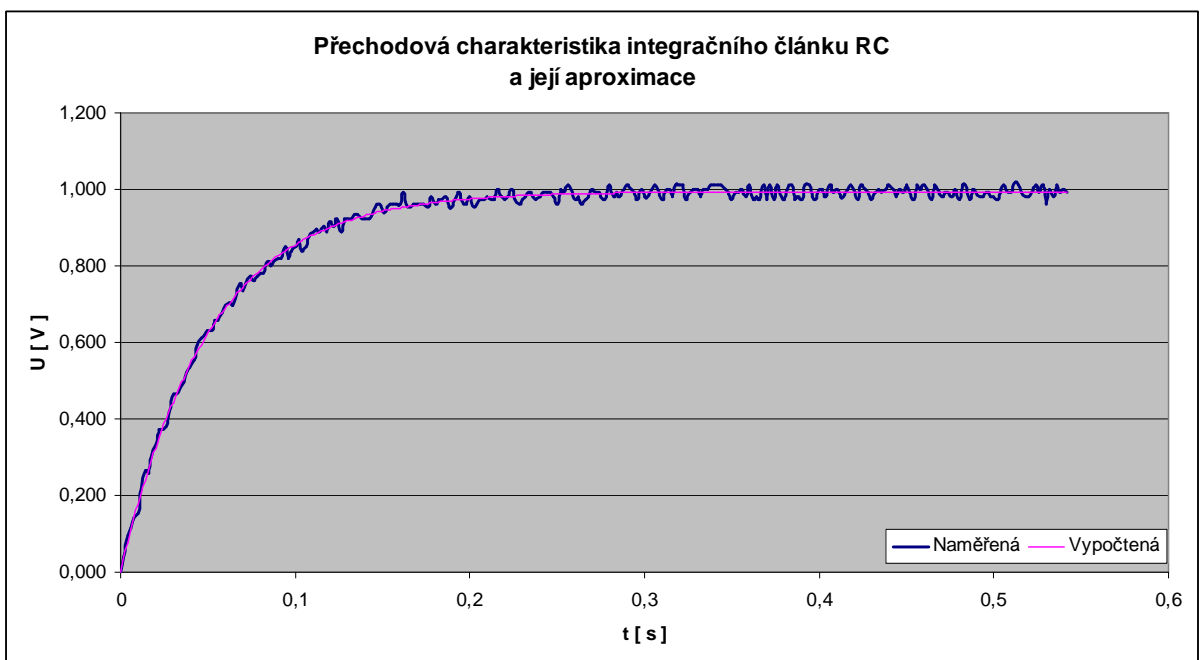
Graf. č.1 – Naměřená přechodová charakteristika integračního článku RC

Z grafu č.1 si pro další zpracování dat vybereme část nabíjení kondenzátoru. Dále tyto hodnoty posuneme do  $t = 0 \text{ s}$ . Z grafu je také zřejmé, že nikdy nebylo dosaženo nulového napětí, tudíž musíme doplnit první hodnotu v  $t = 0 \text{ s}$  pro  $U = 0 \text{ V}$ . Je to z důvodu aproximace naměřených dat diferenciální rovnicí 1.řádu.





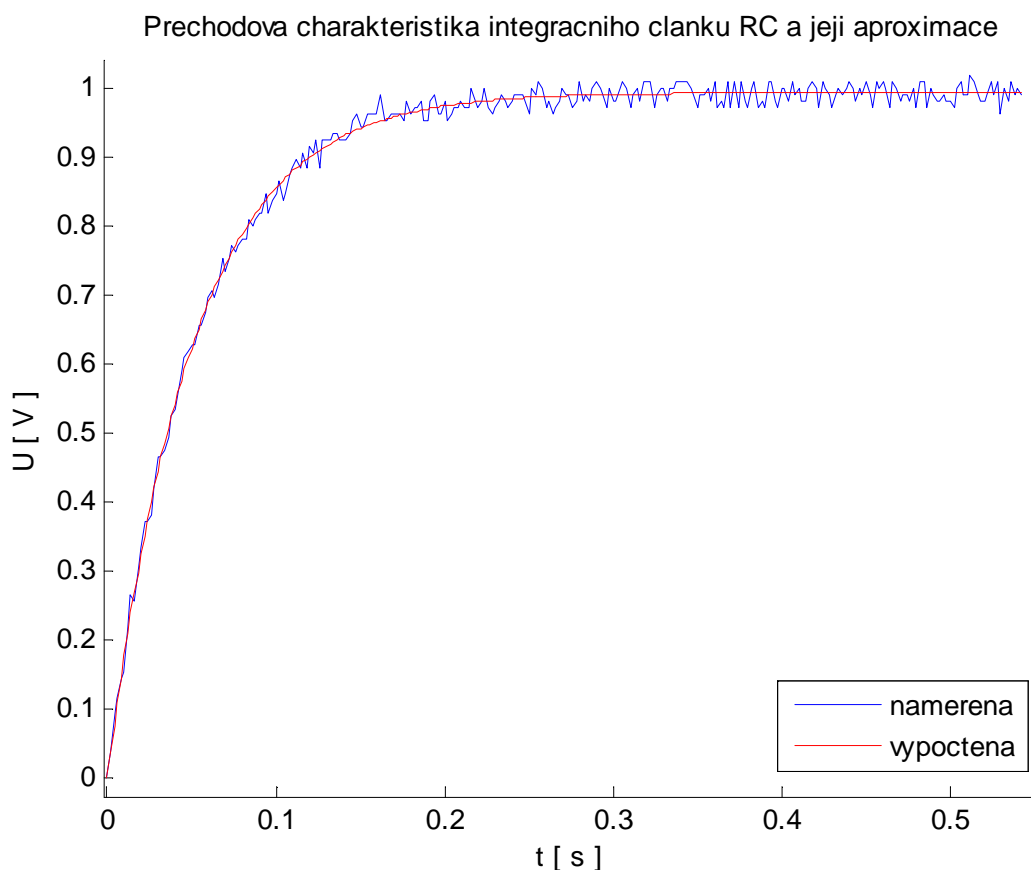
Graf. č.2 – Nabíjení integračního članku RC (data pro aproximaci)



Graf. č.3 – Aproximovaná přechodová charakteristika

Aproximace byla provedena pomocí doplňku *Řešitel* v programu Excel. Parametry aproximace vyšly  $\tau = 0,05\text{s}$  a  $k = 0,99\text{V}$ . Po přepisu vypadá rovnice následovně:

$$u_C(t) = 0,99 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{0,05}} \right) \quad (5.1)$$



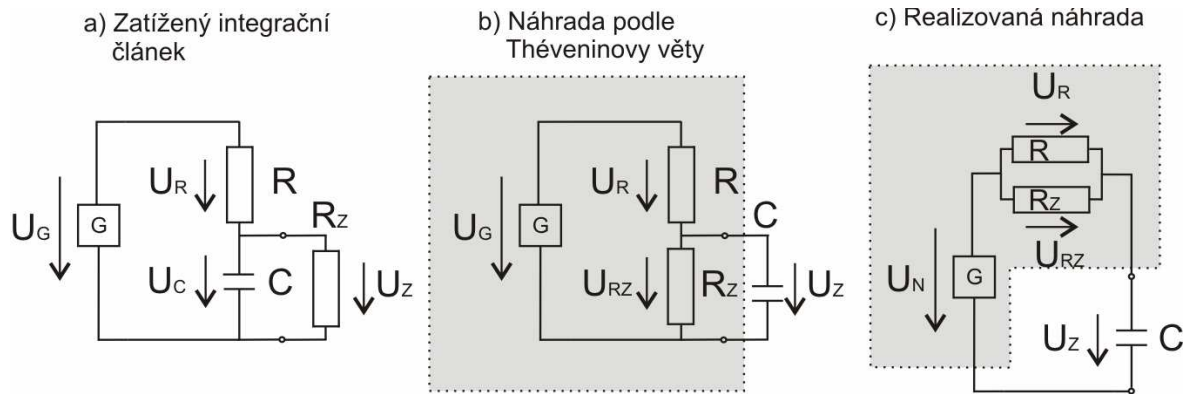
Obr. č.6 - Aproximovaná přechodová charakteristika v programu Matlab

Aproximace byla provedena pomocí příkazu *lsqcurvefit* v programu Matlab. Parametry aproximace vyšly pro  $k = 0,99\text{V}$   $\tau = 0,0507\text{s}$ . Po přepisu vypadá rovnice následovně:

$$u_C(t) = 0,99 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{0,0507}} \right) \quad (5.2)$$

Z aproximací vyplynulo, že vypočtená časová konstanta  $\tau$  neodpovídá předpokládané. Je to způsobeno tím, že na vstupu osciloskopu je zapojen rezistor o hodnotě  $1\text{M}\Omega$  a kondenzátor

o hodnotě 13pF. Jelikož kondenzátor má malou hodnotu, tak ho můžeme zanedbat, ale rezistor na vstupu osciloskopu je roven rezistoru, který obsahuje integrační článek a proto ho nemůžeme zanedbat. Proto časovou konstantu  $\tau$  musíme počítat jako zatížený integrační článek.



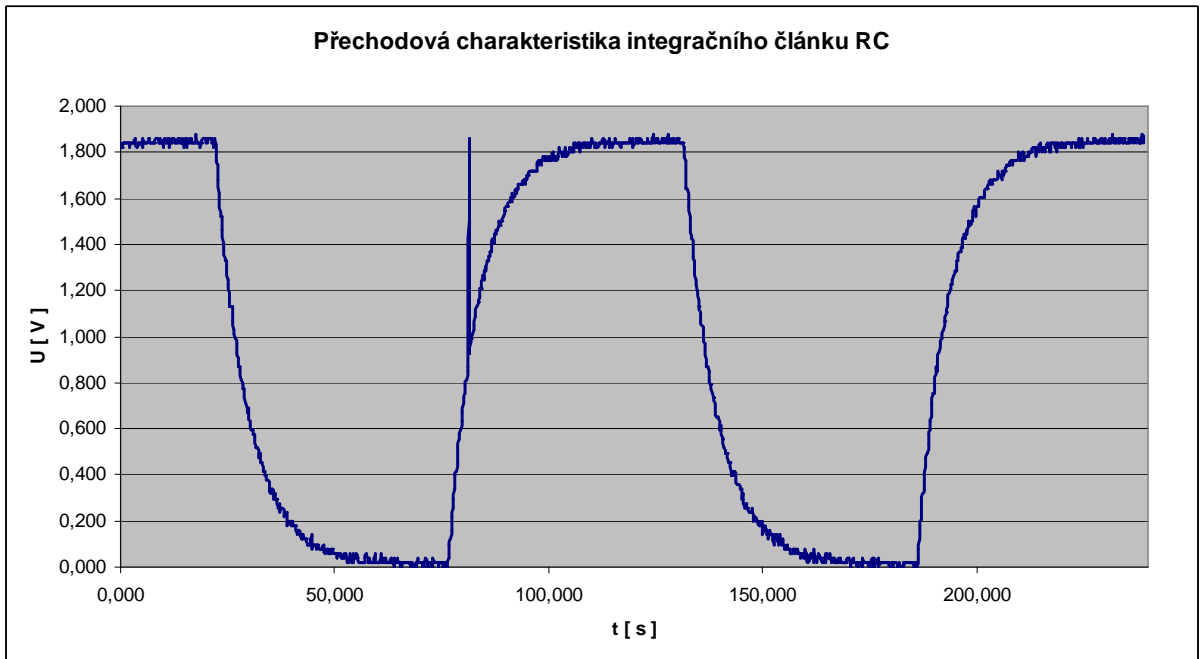
Obr. č.7 – Schéma zapojení zatíženého integračního článku, náhradního zapojení pomocí Théveninovy věty a realizovaná náhrada zatíženého integračního článku

Úpravou a metodou náhradních zdrojů dostaneme výraz pro vypočítání časové konstanty rovnu:

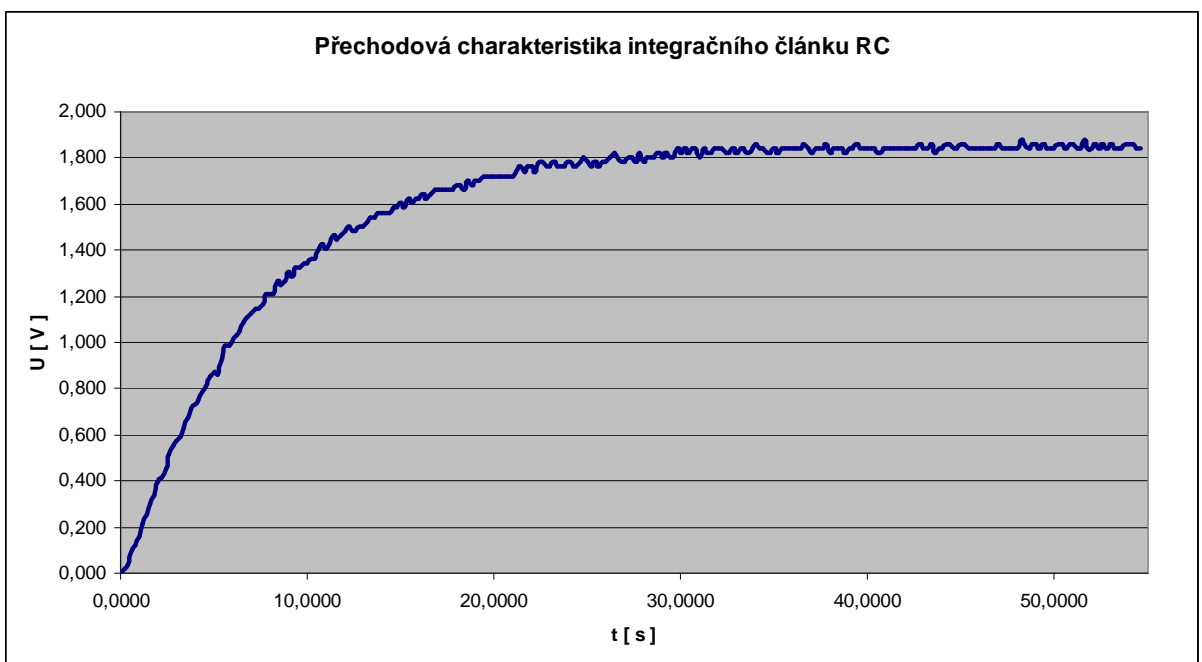
$$\tau = \frac{R \cdot R_Z}{R + R_Z} \cdot C . \quad (5.3)$$

Když dosadíme do vztahu (5.3) hodnoty prvního měřeného integračního článku, tak dostaneme časovou konstantu  $\tau = 0,05s$ .

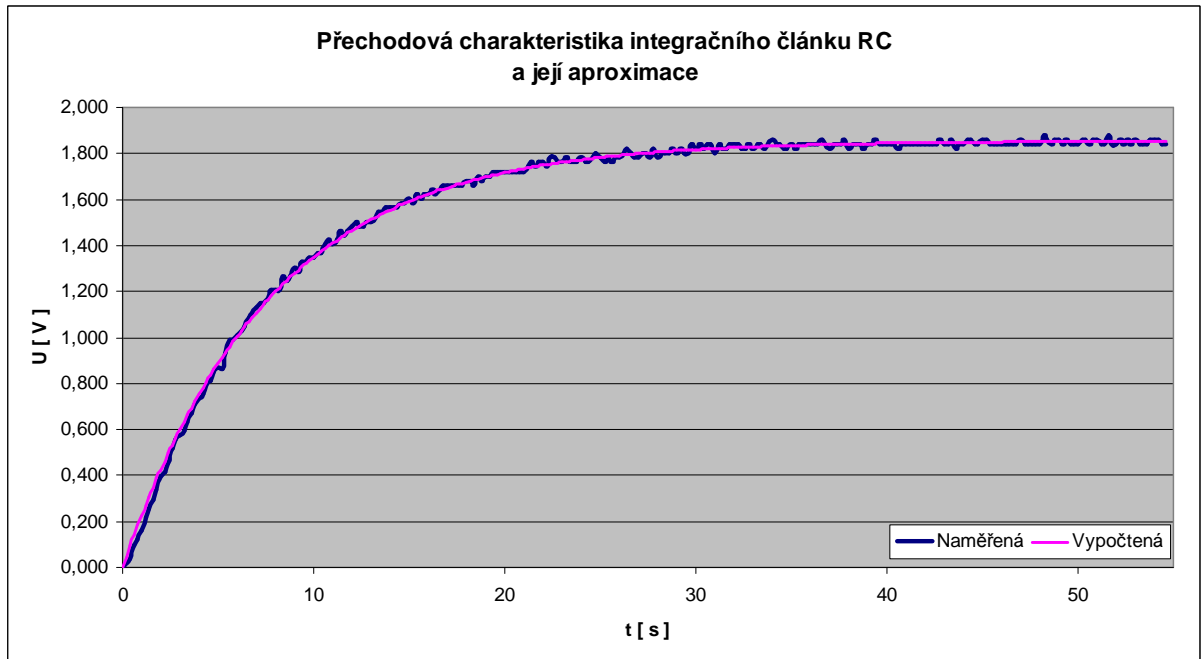
Druhý integrační článek byl složen z rezistoru  $R = 75k\Omega$ ,  $C = 100\mu F$  a  $U_{Vst} = 2V$ . Předpokládaná hodnota časové konstanty  $\tau$  byla tedy 7,5s.



Graf. č.4 – Naměřená přechodová charakteristika integračního članku RC



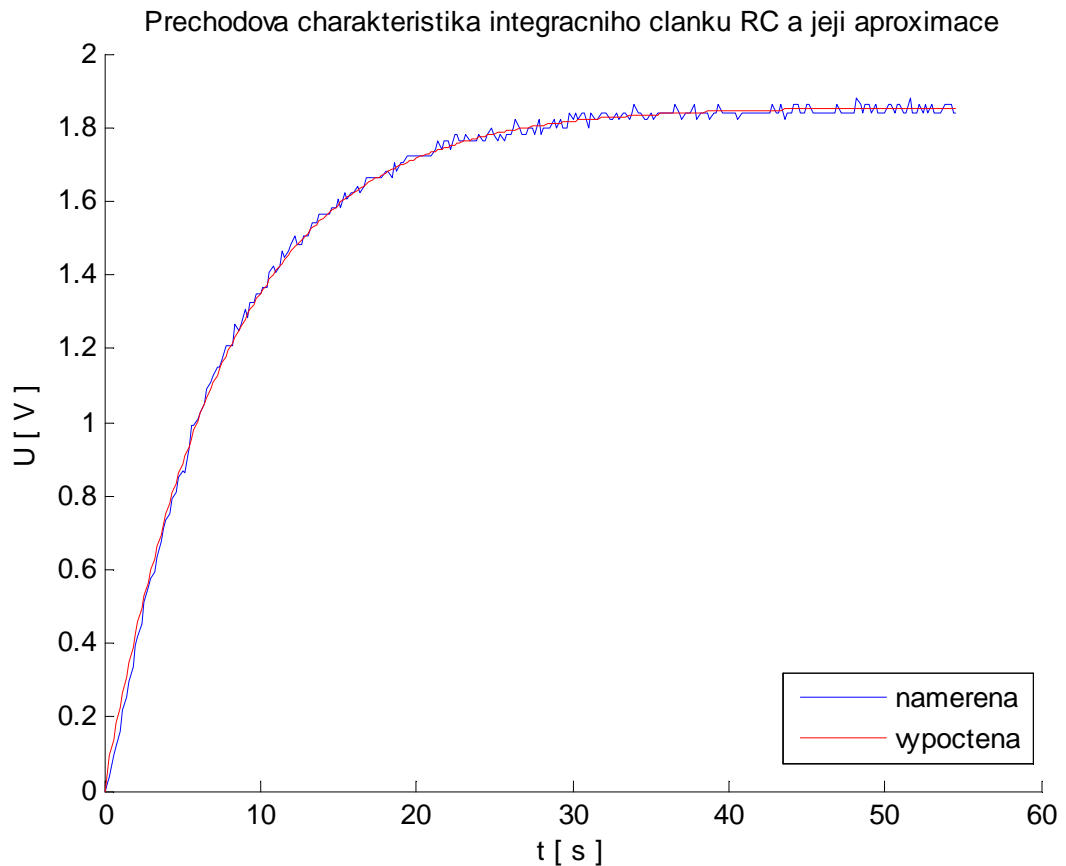
Graf. č.5 – Nabíjení integračního članku RC (data pro aproximaci)



Graf. č.6 – Aproximovaná přechodová charakteristika

Aproximace byla provedena pomocí doplňku *Řešitel* v programu Excel. Parametry aproximace vyšly  $\tau = 7,70\text{s}$  a  $k = 1,85\text{V}$ . Po přepisu vypadá rovnice následovně:

$$u_c(t) = 1,85 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{7,7}} \right) . \quad (5.4)$$



Obr. č.8 - Aproximovaná přechodová charakteristika v programu Matlab

Aproximace byla provedena pomocí příkazu *lsqcurvefit* v programu Matlab. Parametry aproximace vyšly pro  $k = 1,85\text{V}$   $\tau = 7,699\text{s}$  . Po přepisu vypadá rovnice následovně:

$$u_c(t) = 1,85 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{7,699}} \right) . \quad (5.5)$$

Z aproximací vyplynulo, že vypočtená časová konstanta  $\tau$  neodpovídá předpokládané o 0,2s.

Pokud by byla časová konstanta vypočtena podle vzorce (5.3), tak by vyšla časová konstanta 6,98s.

## **6. Závěr:**

Při prvním měření časová konstanta nevyšla podle předpokládané. Bylo to zapříčiněno tím, že rezistor na vstupu osciloskopu ovlivňoval měření přechodového děje integračního članku. Po přepočítání vzorcem (5.3) vyšla hodnota, která už odpovídala hodnotě časové konstanty zjištěné aproximací naměřených dat a to 0,5s.

Při druhém měření nevyšla časová konstanta úplně stejně jako předpokládaná. Ale musíme vzít v úvahu to, že součástky, ze kterých se skládá integrační článek mají toleranci přesnosti  $\pm 10\%$  a některé i  $\pm 20\%$ , tak jsme se nedopustili nějak zvláště velké chyby.

Pro přesnější měření bychom museli změřit jednotlivé součástky integračního članku přesným měřicím přístrojem, např. RLC můstkem.

V grafu č. 4 v čase okolo 75s jde vidět chyba měření. Je způsobena přenosem mezi osciloskopem a počítačem pomocí GPIB rozhraní. Tuto chybu nelze ošetřit softwarově a tudíž musela být opravena ručně.

## PŘÍLOHA P II: VZOROVÝ PROTOKOL – MĚŘENÍ AFCH

### Měření amplitudovo-fázových charakteristik

#### 1. Cíl:

Cílem úlohy je seznámení se s funkcí a principem integračního a derivačního članku, jakožto s reálným modelem. Naměřené amplitudové charakteristiky a charakteristiky fázových posunů mohou být dále porovnány s charakteristikami získanými v simulačním programu *AFCH.vee*.

#### 2. Teorie:

Amplitudová charakteristika je poměr napětí výstupního ku vstupnímu napětí. Jako vstupní signál se předpokládá signál, který je periodickou funkcí času (např. sinusový, obdélníkový průběh apod.). Vstupní i výstupní napětí závisí na kmitočtu a jsou komplexními proměnnými. Pokud jsou splněny předešlé podmínky, tak můžeme definovat vztah:

$$A(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = A(\omega) \cdot e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad , \quad (2. 2)$$

kde modul přenosu je:

$$A(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \sqrt{(\operatorname{Re}[A(j\omega)])^2 + (\operatorname{Im}[A(j\omega)])^2} \quad . \quad (2. 2)$$

Fázový posun je definován vztahem:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A(j\omega)]}{\operatorname{Re}[A(j\omega)]}, \quad \varphi(\omega) = \varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega) \quad . \quad (2. 3)$$

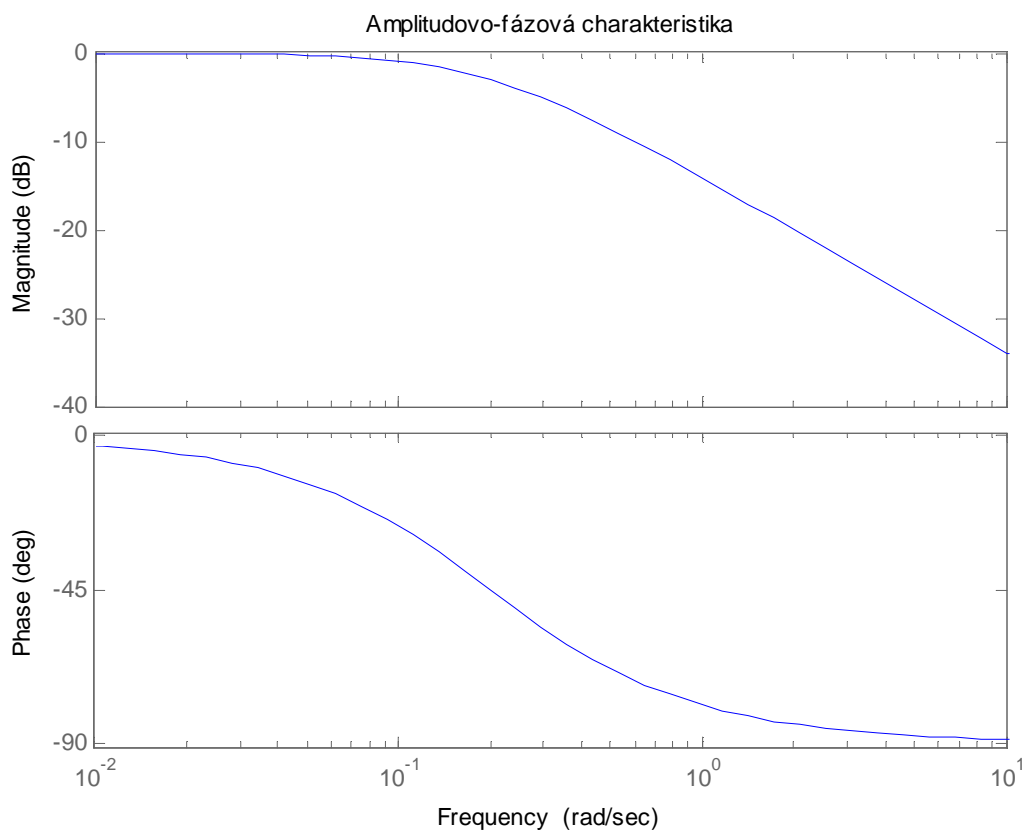
Pro zobrazování charakteristik v grafech může být použito lineárního měřítka, ale zpravidla se používá na ose  $x$  pro frekvenci  $f$  logaritmické měřítko. Je to z důvodu toho, že graf v lineárních souřadnicích je nepřehledný pro celé spektrum vstupního signálu. Proto modul přenosu upravíme na vztah:



$$A_{dB}(\omega) = 20 \cdot \log A(j\omega) \quad . \quad (2.4)$$

Při měření amplitudovo-fázových charakteristik, je důležité znát mezní frekvenci. Mezní frekvence je frekvence, od které začne členek mít útlum, nebo naopak začne vyšší frekvence propouštět. Je to dáno typem článku, jelikož integrační členek (dolní propust') propouští nízké frekvence a derivační členek (horní propust') propouští vyšší frekvence. Mezní frekvence je definována vztahem:

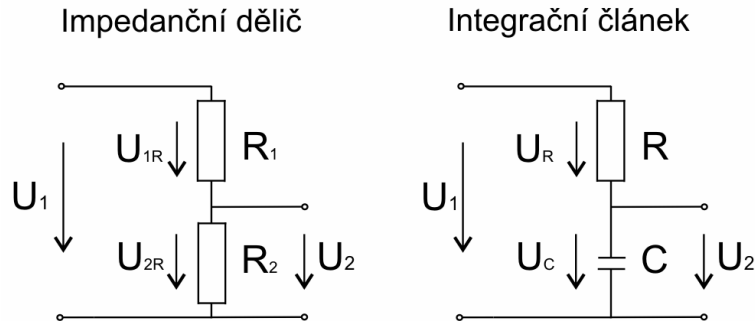
$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad . \quad (2.4)$$



Obr. č. 1 – Amplitudovo-fázová charakteristika s mezní frekvencí 0,2 Hz vygenerovaná v prostředí MTLAB

## 2.1. Integrační člunek:

Integrační člunek na obrázku (Obr. č.2) je filtr typu dolní propust' prvního řádu. Tudíž je to impedanční dělič.



Obr. č. 2 – Schéma zapojení impedančního děliče a integračního člunku

Klasický impedanční dělič je popsán vztahem:

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_1, \quad (2.1.1)$$

u integračního člunku je pouze zaměněn odpor  $R_2$  za kondenzátor. Po úpravě tedy získáme vztah:

$$u_2(j\omega) = \frac{X_C}{R_1 + X_C} \cdot u_1(j\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}} \cdot u_1(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} \cdot u_1(j\omega). \quad (2.1.2)$$

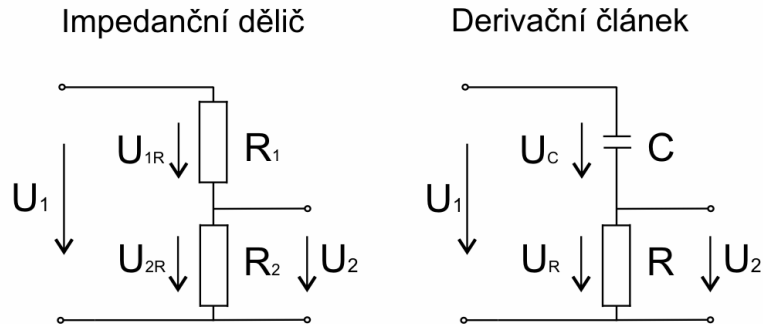
Podělením vztahu (2.1.2) napětím  $u_1(j\omega)$ , vynásobením komplexně sdruženého členu a úpravou získáme vztah modulu přenosu soustavy pro integrační člunek:

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad (2.1.3)$$

kde  $\text{Re} = \frac{1}{1 + (\omega RC)^2}$  a  $\text{Im} = \frac{\omega RC}{1 + (\omega RC)^2}$ .

## 2.2. Derivační člunek:

Derivační člunek na obrázku (Obr. č.3) je filtr typu dolní propust' prvního řádu. Tudíž je to napěťový dělič.



Obr. č. 3 – Schéma zapojení napěťového děliče a derivačního člunku

Klasický napěťový dělič je popsán vztahem:

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_1, \quad (2.2.1)$$

u derivačního člunku je pouze zaměněn odpor  $R_1$  nahrazen kondenzátorem. Po úpravě tedy získáme vztah:

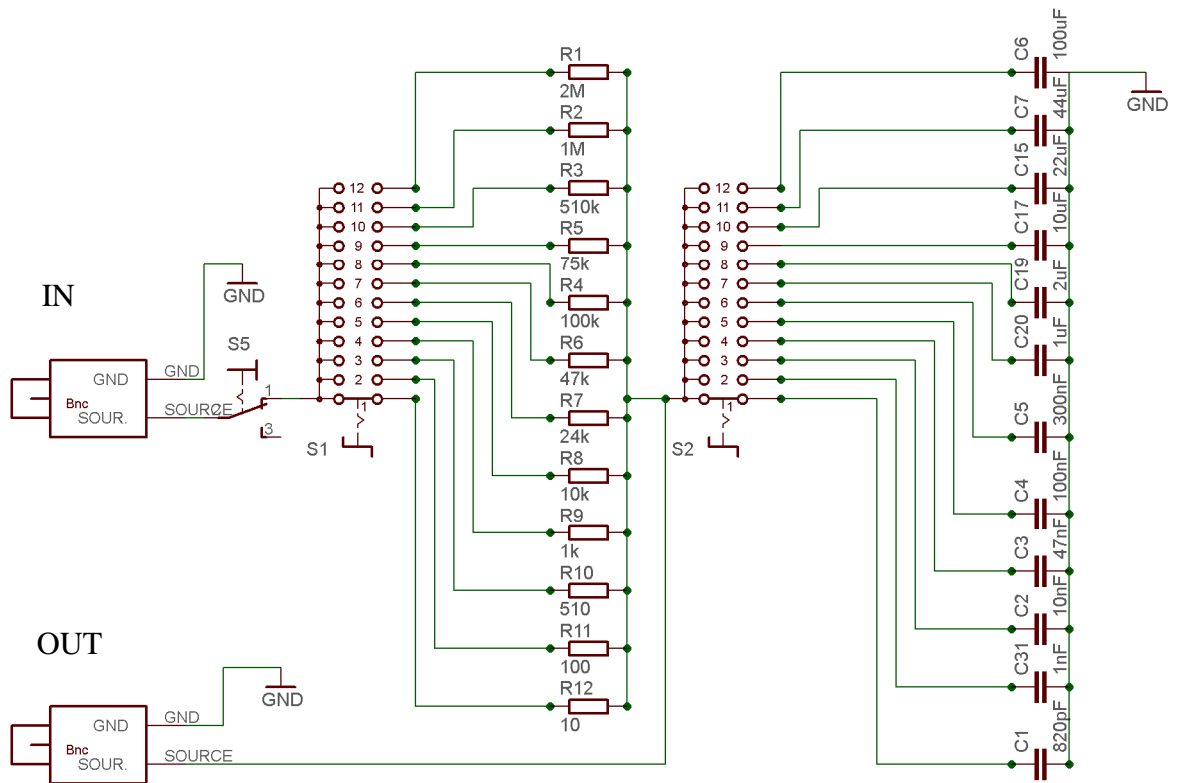
$$u_2(j\omega) = \frac{R}{R + X_C} \cdot u_1(j\omega) = \frac{R}{R_1 - \frac{1}{j\omega C}} \cdot u_1(j\omega) = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \cdot u_1(j\omega). \quad (2.2.2)$$

Podělením vztahu (2.2.2) napětím  $u_1(j\omega)$ , vynásobením komplexně sdruženého členu a úpravou získáme vztah modulu přenosu soustavy pro derivační člunek:

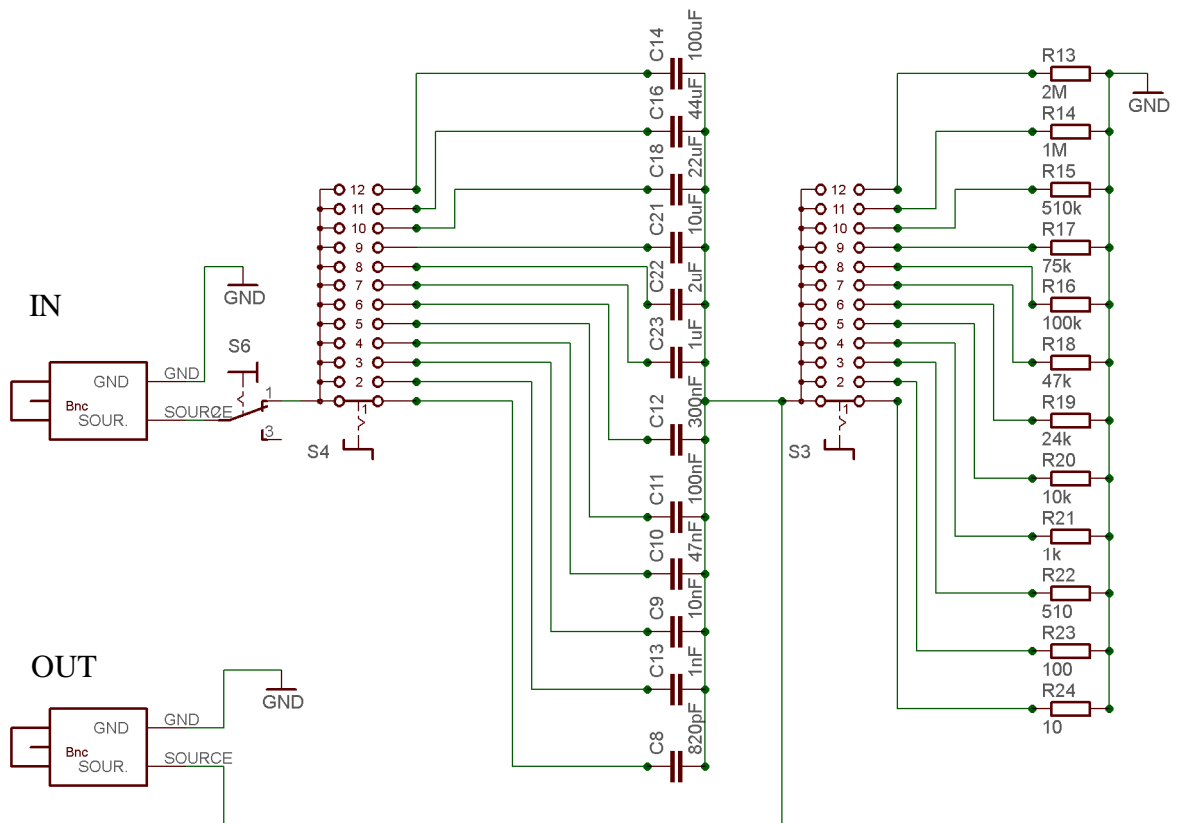
$$A(\omega) = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad (2.2.3)$$

kde  $\text{Re} = \frac{(\omega RC)^2}{1 + (\omega RC)^2}$  a  $\text{Im} = \frac{\omega RC}{1 + (\omega RC)^2}$ .

### 3. Měřená soustava:



Obr. č. 4 – Schéma zapojení integračního článku



Obr. č. 5 – Schéma zapojení derivačního článku

Přepínač *S5* a *S6* při měření amplitudovo-fázových charakteristik je nepotřebný. Takže po celou dobu měření této úlohy bude v sepnutém stavu.

#### 4. Úkol:

1. Sestavte program pro měření a obsluhu přístrojů v programu Vee Pro
2. Změřte amplitudové charakteristiky dvou derivačních článků a dvou integračních článků. Každý měřený článek bude mít svou vlastní mezní frekvenci  $f_0$ . Mezní frekvence volte tak, abyste co nejlépe využili spektrum mezních frekvencí.
3. Při měření využijte celé spektrum signálu, které je generátor schopen vygenerovat.
4. Amplitudové charakteristiky zpracujte a slovně okomentujte.
5. Na závěr výsledky porovnejte, pokud nebudou souhlasit, tak odůvodněte proč se tomu tak stalo.

Pozn. Fázové charakteristiky vykreslete pomocí rovnice pro fázový posun (2.3). Je to z důvodu složitosti a také z časových důvodů, které jsou vymezeny pro měření této úlohy.

**Použitá literatura:**

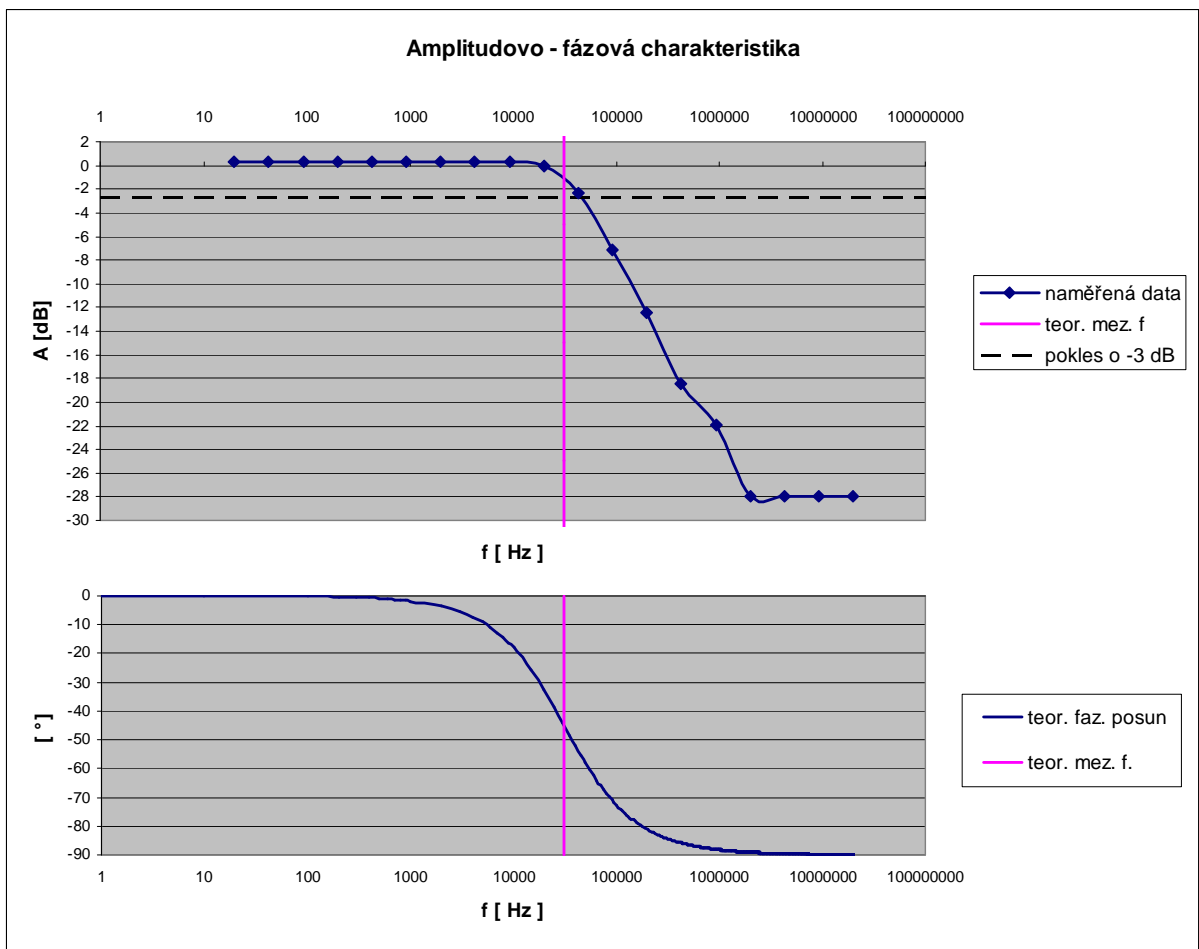
DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky 4. díl : Přenosy v lineárních obvodech a úvod do zesilovačů*. Praha : BEN, 2006. 296 s. ISBN 80-7300-185-3.

*Http://elektro.utb.cz/* [online]. 2004 [cit. 2010-04-17]. Integrovaný článek. Dostupné z WWW: <[http://elektro.utb.cz/laboratore/uloha\\_09.zip](http://elektro.utb.cz/laboratore/uloha_09.zip)>.

## 5. Měření:

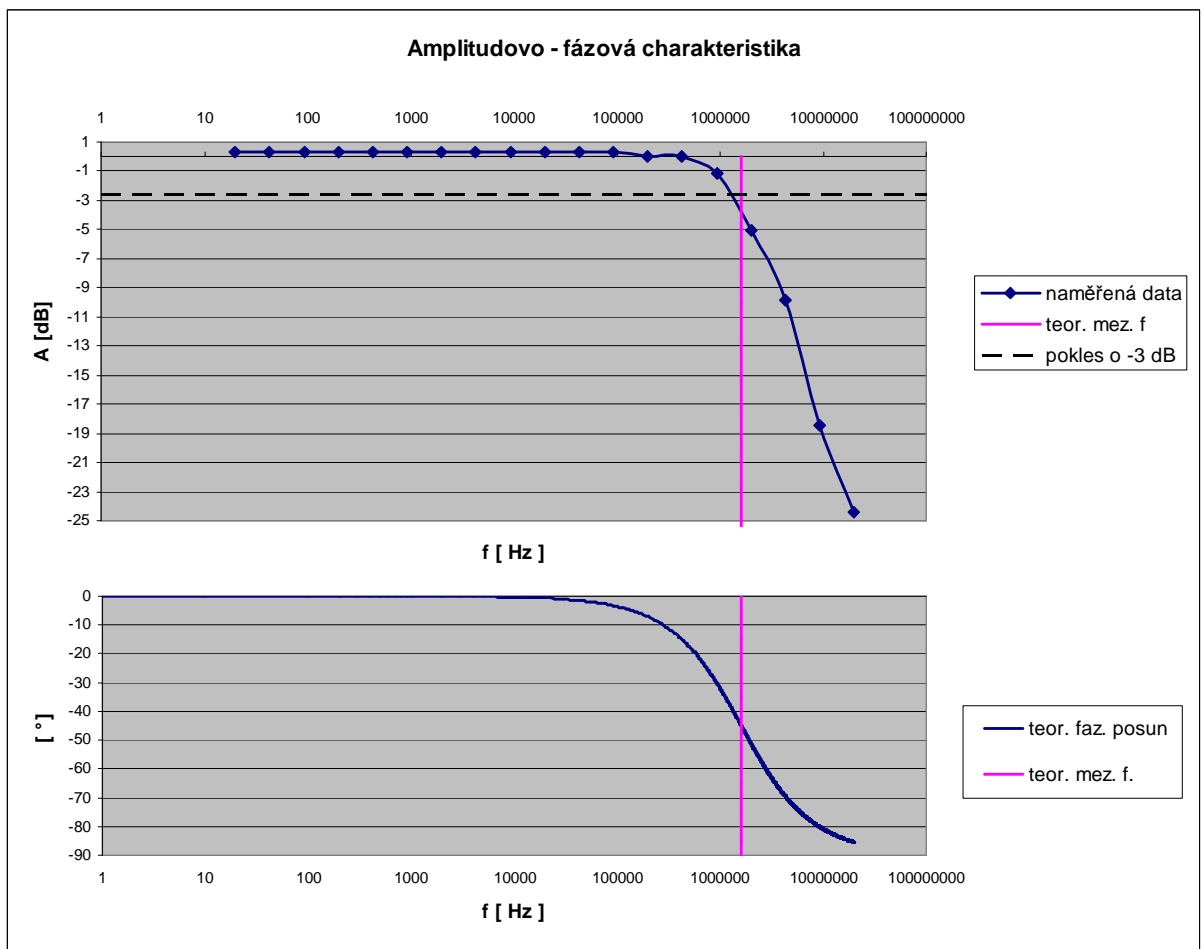
Program pro měření amplitudovo-fázových charakteristik byl sestaven pomocí objektu *For Log Range*, který umožňuje generovat čísla tak, že se definuje počet hodnot na dekádu. Tato čísla sloužila jako jednotlivé frekvence výstupního signálu z generátoru. Vstupním signálem do měřené soustavy byl zvolen obdélníkový průběh napětí o amplitudě 2 V. Mezi vygenerováním frekvence vstupního signálu a odečtením příslušného napětí z osciloskopu byla z důvodu ustálení měřeného napětí časová prodleva. Časová prodleva byla proměnlivá podle velikosti časové základny. Naměřená data byla uložena do souboru a dále byla zpracována v programu Excel.

První integrační článek byl složen z rezistoru o odporu  $510 \Omega$  a kondenzátoru o kapacitě  $10 \text{ nF}$ . Teoretická mezní frekvence by měla být  $31206 \text{ Hz}$ .



Graf č.1 – Amplitudovo-fázová charakteristika prvního integračního článku

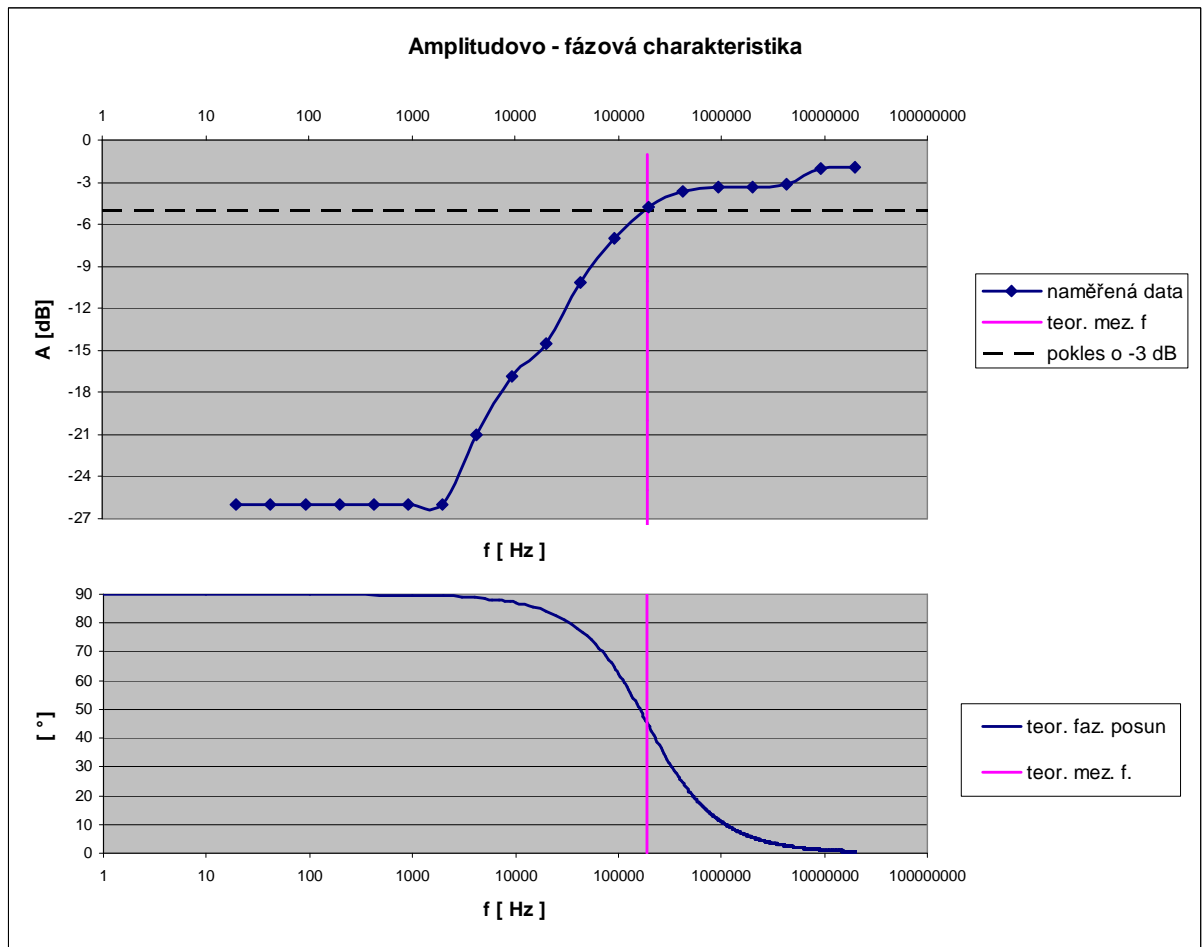
Druhý integrační člunek byl složen z rezistoru o odporu  $100\ \Omega$  a kondenzátoru o kapacitě  $1\ \text{nF}$ . Teoretická mezní frekvence by měla být  $1591549\ \text{Hz}$ .



Graf č.2 – Amplitudovo-fázová charakteristika druhého integračního člunku

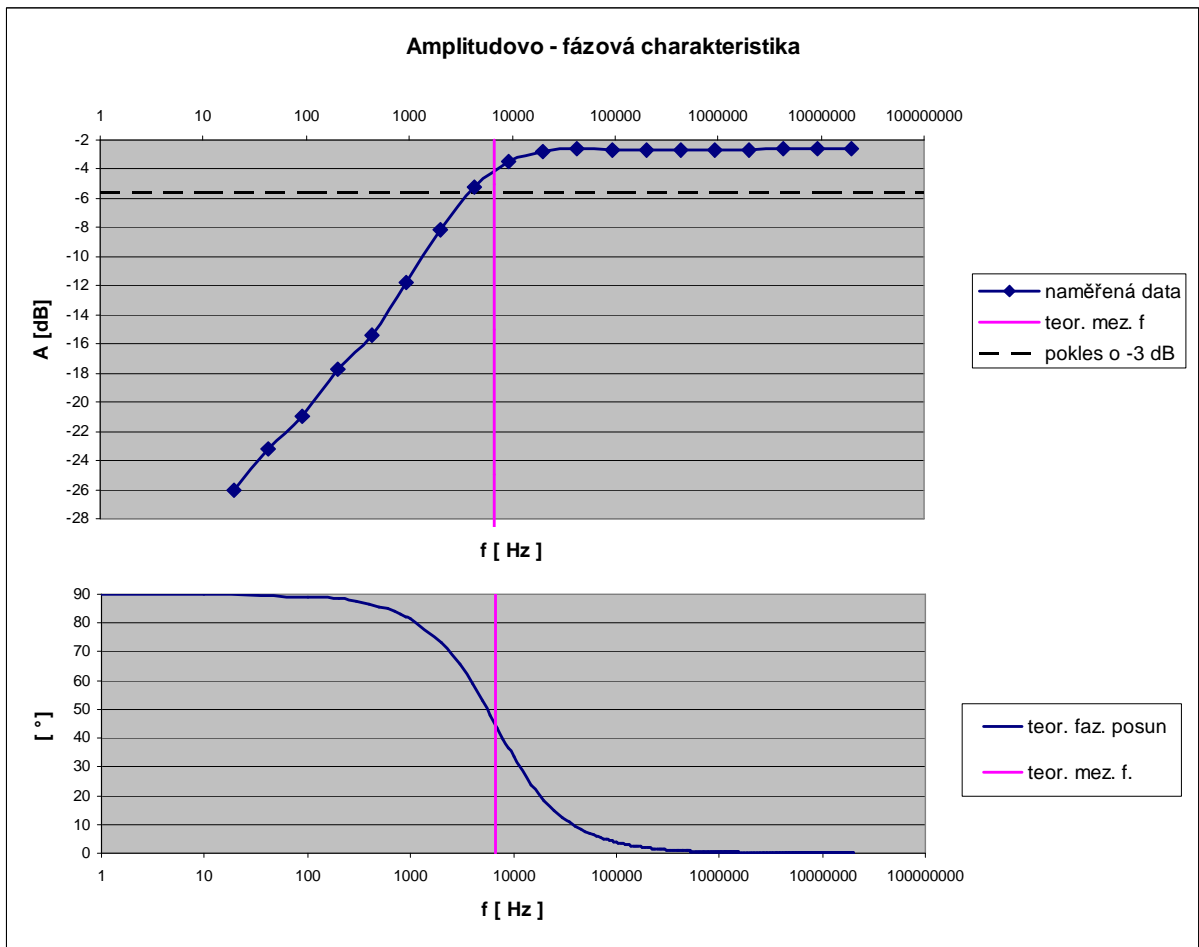


První derivační člunek byl složen z rezistoru o odporu  $1010\ \Omega$  a kondenzátoru o kapacitě  $820\ \text{pF}$ . Teoretická mezní frekvence by měla být  $192169\ \text{Hz}$ .



Graf č.3 – Amplitudovo-fázová charakteristika prvního derivačního člunku

Druhý derivační člunek byl složen z rezistoru o odporu 24 k $\Omega$  a kondenzátoru o kapacitě 1 nF. Teoretická mezní frekvence by měla být 6631 Hz.



Graf č.4 – Amplitudovo-fázová charakteristika druhého derivačního člunku

## 6. Závěr:

Při měření byly zaznamenávány hodnoty napětí  $V_{pp}$ ,  $V_{rms}$  a  $V_{max}$ . Bylo to z toho důvodu, aby bylo možno si následně vybrat hodnoty, při kterých graf vypadá nejlépe. Pro integrační články to bylo napětí  $V_{max}$  a pro derivační články to bylo napětí  $V_{rms}$ .

Grafy byly vykreslovány podle rovnic (2.2), (2.3) a (2.4). Pro přehlednost byl v grafech vždy vyznačen pokles o -3 dB a také předpokládaná mezní frekvence.

Z grafů je zřejmé, že teoretická mezní frekvence se neshodovala s naměřenou. Není to ani možné. Protože parametry součástek, ze kterých se skládají jednotlivé integrační a derivační články mají toleranci  $\pm 10\%$ , tudíž bychom museli jednotlivé součástky změřit a zjistit jejich skutečné hodnoty. Potom bychom se dopustili menší chyby a výsledky by byli

přesnější. Nicméně z grafu lze také vyčíst, že mezní frekvence od předpokládané frekvence není vzdálena o více než  $\pm 2$  dB. Z toho můžeme usuzovat, že měření bylo přesné.