

Měření na bipolárním tranzistoru.

Úkol:

1. Změřte a nakreslete čtyři výstupní charakteristiky $I_C = f(U_{CE})$ bipolárního tranzistoru PNP při vámi zvolených hodnotách I_B .
2. Změřte a nakreslete dvě převodní charakteristiky $I_C = f(I_B)$ při zvolených hodnotách U_{CE} .
3. Ve zvoleném pracovním bodě určete graficko-početní metodou diferenciální h -parametry h_{22e} a h_{21e} . Parametr h_{21e} porovnejte s katalogovým údajem.
4. Zbývající h -parametry (h_{11e} , h_{12e}) určete orientačně měřením v okolí zvoleného pracovního bodu.

Přístroje:

tranzistor PNP, číslicové voltmetry, analogový a číslicový ampérmetr, přípravek s rezistory, posuvný rezistor 250Ω

Návod:

K napájení použijeme dva zdroje napětí, jeden pro obvod báze – emitor a druhý pro obvod kolektor - emitor. Do série se zdrojem I_B zařadíme velký odpor (řádově stovky $k\Omega$), abychom vytvořili zdroj proudu (*vysvětlete!*). Do obvodu kolektoru zařadíme zatěžovací odpor 250Ω .

1. Výstupní charakteristiky $I_C = f(U_{CE})$ se měří při konstantním I_B . Všechny výstupní charakteristiky vycházejí z jediné saturační přímky; je nutno volit měřené body tak, aby se dala zakreslit i její poloha a přechod (ohyb), na který navazuje téměř lineární část každé charakteristiky. Při měření nastavíme vždy konstantní I_B a poté proměříme celou charakteristiku; I_B se již nesmí měnit.
2. Pevodní charakteristiky $I_C = f(I_B)$ měříme při konstantním U_{CE} . Toto napětí je třeba při každém měření znovu nastavit změnou napětí zdroje, protože při změně I_B se mění I_C , tudíž i úbytek napětí na zatěžovacím odporu, a při konstantním napětí zdroje by se změnilo i U_{CE} .

3. Parametr h_{22e} (výstupní diferenciální vodivost) vypočítáme graficko-početní metodou: na tečně ve zvoleném pracovním bodě výstupní charakteristiky určíme ΔI_C a ΔU_{CE} ; spočítáme $h_{22e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}}$.

Podobně určíme h_{21e} (proudové zesílení): $h_{21e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$.

4. Zbývající h -parametry určíme tak, že rozladíme okolí pracovního bodu na obě strany a zjistíme příslušné rozdíly sledovaných veličin. Např. při zjišťování h_{11e} nastavíme konstantní U_{CE} a I_B . Pak změňme I_B o malou hodnotu postupně na obě strany na I_{B1} a I_{B2} (jejich rozdíl je ΔI_B), přičemž se změňme U_{BE} z U_{BE1} na U_{BE2} (jejich rozdíl je ΔU_{BE}). Napětí U_{CE} musíme nastavit v obou případech na zvolenou hodnotu. Parametr h_{11e} (vstupní diferenciální odpor) je $h_{11e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$.

Podobně určíme h_{12e} (zpětný napěťový přenos $h_{12e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}}$). Zde může být obtížně měřitelný rozdíl

ΔU_{BE} , protože U_{BE} se při změně U_{CE} (a konstantním I_B) téměř nemění.

Vzor tabulky:

$I_B = \dots$	U_{CE} (V)			
	I_C (mA)			

$U_{CE} = \dots$	I_B (μA)			
	I_C (mA)			

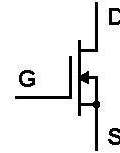
Měření na unipolárním tranzistoru.

Úkol:

1. Změřte a nakreslete výstupní charakteristiky $I_D = f(U_{DS})$ unipolárního tranzistoru MOSFET typu N s vodivým kanálem v zapojení SS (se společným source). Změřte charakteristiku při $U_{GS} = 0$ a po dvou charakteristikách při kladném a záporném řídicím napětí U_{GS} . Vyznačte všechny oblasti pracovních režimů (obohacený, ochuzený, odporový, nasycení).
2. Změřte a nakreslete převodní charakteristiku $I_D = f(U_{GS})$ při vámi zvoleném napětí U_{DS} . Ve zvoleném pracovním bodě určete graficko-početní metodou parametr y_{21} . Výsledek porovnejte s katalogovým údajem.
3. Zobrazte na osciloskopu výstupní charakteristiky. Stáhněte je ve formátu obrázku.

Přístroje:

tranzistor KF 520, číslicové voltmetry, analogový ampérmetr, posuvný rezistor 250 Ω , usměrňovač, generátor, osciloskop



Návod:

Tranzistor KF 520 je MOSFET typu N s vodivým (zabudovaným) kanálem. To znamená, že ho lze řídit napětím U_{GS} obou polarit. Je-li $U_{GS} > 0$, pracuje v obohaceném režimu a saturační proud je větší než při $U_{GS} = 0$, je-li $U_{GS} < 0$, pracuje v ochuzeném režimu a saturační proud je menší.

Tranzistor je opatřen ochranným odporem mezi G a S, aby se nezničil náhodným statickým nábojem.

1. K měření použijeme dvojitý zdroj napětí. Mezi G a S přivádíme z prvního zdroje řídicí napětí U_{GS} , z druhého zdroje napájíme výstupní obvod (přes zatěžovací rezistor). Nastavíme $U_{GS} = 0$ a měříme první výstupní charakteristiku $I_D = f(U_{DS})$. Další charakteristiky změříme při dvou kladných (obohacený režim) a dvou záporných (ochuzený režim) konstantních napětích U_{GS} . Na každé křivce lze nalézt část, kdy proud narůstá s napětím přibližně lineárně (odporový režim) a část, kdy se proud s rostoucím napětím již téměř nezvyšuje (saturace neboli nasycení). Meze měření volíme tak, abychom nepřekročili mezní parametry tranzistoru (U_{DS} , I_D , P).
2. Pevodní charakteristiku změříme tak, že měníme postupně U_{GS} od záporných do kladných hodnot, přičemž měříme I_D a napětí zdroje výstupního obvodu nastavujeme tak, abychom měli vždy konstantní (zvolené) napětí U_{DS} . Charakteristiku je nutno nakreslit přes dva kvadranty, protože řídicí napětí nabývá obou polarit. Parametr y_{21} zjistíme graficko-početní metodou. Na tečně v pracovním bodě určíme ΔI_D a ΔU_{GS} a vypočítáme $y_{21} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$.
3. Na řídicí vstup tranzistoru G přivádíme konstantní napětí U_{GS} . Výstupní obvod D-S napájíme ze střídavého zdroje (generátoru) a usměrňovače, aby napětí U_{DS} pulsovalo. Osciloskopem v režimu XY snímáme napětí U_{DS} a proud I_D (jako úbytek napětí na zatěžovacím odporu). Průběhy zaznamenáme (funkce AUTOSTORE). Zobrazené charakteristiky stáhneme do PC pomocí doplňku Excelu nebo programu IntuiLink. Obrázek doplníme cejchováním os.

Vzor tabulky:

$U_{GS} = \dots$	U_{DS} (V)			
	I_D (mA)			

$U_{DS} = \dots$	U_{GS} (V)			
	I_D (mA)			

Měření na integračním RC článku

Úkol:

- Změřte útlumovou a fázovou charakteristiku integračního RC článku.
- Graficky znázorněte změřené a teoreticky spočítané závislosti útlumu A_{UdBm} (dB), A_{UdB} (dB) a fázového posuvu φ_m (°), φ (°) obou článků na frekvenci f (Hz) v semilogaritmických souřadnicích. Naměřenou a teoretickou závislost nakreslete vždy do jednoho grafu. Určete graficky i početně mezní kmitočet. Proved'te také detailní odvození vzorců pro teoretický výpočet.

Přístroje:

přípravek s R a C , generátor, osciloskop

Návod:

Útlumová charakteristika je závislost útlumu $A_{UdB} = 20 \log A_U = 20 \log \frac{U_2}{U_1}$ na frekvenci.

Fázová charakteristika je závislost fázového posuvu φ mezi vstupním a výstupním napětím na frekvenci. Osa frekvence je vždy logaritmická.

- Měření** provádíme asi dvě dekády na obě strany od mezní frekvence f_0 , kterou si nejprve spočítáme ze změřených hodnot R a C ($f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC}$). V každé dekádě provádíme asi 5 měření (1 – 2 – 3 – 5 – 7).
 - Útlum se spočítá podle definičního vztahu z hodnot vstupního a výstupního napětí článku, měřených digitálním osciloskopem (funkce MEASURE, efektivní hodnota RMS).
 - Fázový posuv měříme na osciloskopu pomocí kurzorů; dáváme přitom pozor na jeho znaménko – zde je U_2 zpožděno za U_1 , fázový posuv je záporný (fázor U_1 v reálné ose, U_2 ve 4. kvadrantu).
- Teoretický výpočet** útlumu a fázového posuvu provedeme z komplexního přenosu článku, z něhož určíme modul přenosu A_U (absolutní hodnotu A_U) a $\text{tg } \varphi$ jako poměr imaginární a reálné části A_U .

Přenos integračního článku $A_U = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{j\omega RC + 1}$. Zavedením mezní frekvence pak

$$A_U = \frac{1}{j \frac{f}{f_0} + 1}. \text{ Z toho modul } A_U = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 1}}.$$

$$\circ \text{ Útlum } A_{UdB} = 20 \log A_U = 20 \log \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 1}} = -10 \log \left[\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 1 \right].$$

$$\circ \text{ Fázový posuv } \varphi = \text{arctg} \frac{\text{Im}(A_U)}{\text{Re}(A_U)} = \text{arctg} \frac{-\frac{f}{f_0}}{1} = \text{arctg} \left(-\frac{f}{f_0} \right) = -\text{arctg} \frac{f}{f_0}.$$

Záhlaví tabulky:

$R = \dots\dots\dots \Omega$

$C = \dots\dots\dots \text{nF}$

$\tau = \dots\dots\dots \text{ms}$

$f_0 = \dots\dots\dots \text{Hz}$

f (Hz)	U_1 (V)	U_2 (V)	A_{Um} (dB)	φ_m (°)	A_U (dB)	φ (°)

Měření na derivačním RC článku

Úkol:

- Změřte útlumovou a fázovou charakteristiku derivačního RC článku.
- Graficky znázorněte změřené a teoreticky spočítané závislosti útlumu A_{UdBm} (dB), A_{UdB} (dB) a fázového posuvu φ_m ($^\circ$), φ ($^\circ$) obou článků na frekvenci f (Hz) v semilogaritmických souřadnicích. Určete graficky i početně mezní kmitočet. Proveďte také detailní odvození vzorců pro teoretický výpočet.

Přístroje:

přípravek s R a C , generátor, osciloskop

Návod:

Útlumová charakteristika je závislost útlumu $A_{UdB} = 20 \log A_U = 20 \log \frac{U_2}{U_1}$ na frekvenci.

Fázová charakteristika je závislost fázového posuvu φ mezi vstupním a výstupním napětím na frekvenci. Osa frekvence je vždy logaritmická.

- Měření** provádíme asi dvě dekády na obě strany od mezní frekvence f_0 , kterou si nejprve spočítáme ze změřených hodnot R a C ($f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC}$). V rozmezí každé dekády provádíme asi 5 měření.
 - Útlum se spočítá podle definičního vztahu z hodnot vstupního a výstupního napětí článku, měřených digitálním osciloskopem (funkce MEASURE, efektivní hodnota RMS).
 - Fázový posuv měříme na osciloskopu pomocí kurzorů; dáváme přitom pozor na jeho znaménko - zde U_2 předbíhá před U_1 , fázový posuv je kladný (fázor U_1 v reálné ose, U_2 v 1. kvadrantu).
- Teoretický výpočet** útlumu a fázového posuvu provedeme z komplexního přenosu článku, z něhož určíme modul přenosu A_U (absolutní hodnotu A_U) a tg φ jako poměr imaginární a reálné části A_U .

Přenos derivačního článku $A_U = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega RC}{j\omega RC + 1}$. Zavedením mezní frekvence pak

$$A_U = \frac{j \frac{f}{f_0}}{j \frac{f}{f_0} + 1}. \text{ Z toho modul } A_U = \frac{\frac{f}{f_0}}{\sqrt{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 1}}.$$

$$\circ \text{ Útlum } A_{UdB} = 20 \log A_U = 20 \log \frac{\frac{f}{f_0}}{\sqrt{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 1}} = 20 \log \frac{f}{f_0} - 10 \log \left[\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + 1 \right].$$

$$\circ \text{ Fázový posuv } \varphi = \arctg \frac{\text{Im}(A_U)}{\text{Re}(A_U)} = \arctg \frac{\frac{f}{f_0}}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2} = \arctg \left(\frac{f_0}{f} \right).$$

Záhlaví tabulky:

$R = \dots\dots\dots \Omega$

$C = \dots\dots\dots \text{nF}$

$\tau = \dots\dots\dots \text{ms}$

$f_0 = \dots\dots\dots \text{Hz}$

f (Hz)	U_1 (V)	U_2 (V)	A_{Um} (dB)	φ_m ($^\circ$)	A_U (dB)	φ ($^\circ$)

Měření na operačních zesilovačích I.

Úkol:

Proveďte následující měření na operačním zesilovači (OZ) 1458:

1. Zapojte invertující zesilovač. Pro $A_U = 10$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ navrhnete velikost odporu R_1 . Zapojte obvod, změřte a nakreslete převodní charakteristiku $U_2 = f(U_1)$ pro obě polarity vstupního napětí až do saturace. Určete vstupní odpor.
2. Pro neinvertující zesilovač a $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ určete A_U . Zapojte obvod, změřte a nakreslete převodní charakteristiku $U_2 = f(U_1)$ pro obě polarity vstupního napětí až do saturace. Jaký je vstupní odpor?
3. Změřte vstupní klidové proudy I_{IB}^+ a I_{IB}^- a proudovou nesymetrii vstupů I_{IO} (za předpokladu vykompenzované napěťové nesymetrie). Výsledky porovnejte s katalogovými hodnotami.
4. Změřte vstupní napěťovou nesymetrii U_{IO} . Výsledek porovnejte s katalogovou hodnotou.

Přístroje:

OZ 1458; sada rezistorů; digitální voltmetry

Návod:

Nezapomeneme na správné napájení OZ z dvojitého zdroje napětí, střed zdroje se vždy spojí se zemí.

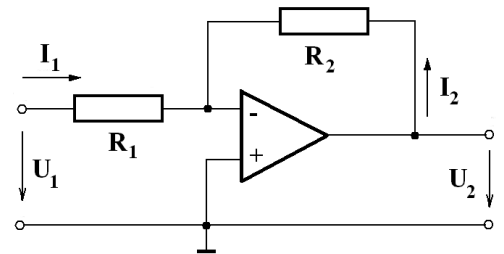
Napěťový přenos OZ v invertujícím i neinvertujícím zapojení určíme za zjednodušujících předpokladů:

- OZ má nekonečně velký vstupní odpor, takže do jeho vstupů neteče proud;
- mezi oběma vstupy + a - je nulové napětí.

1. Platí $I_1 = -I_2$; dále: invertující vstup má proti zemi nulové napětí

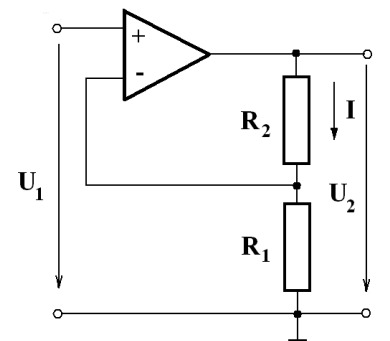
(virtuální zem). Napěťový přenos $A_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2 I_2}{R_1 I_1} = -\frac{R_2}{R_1}$.

Vstupní odpor je roven R_1 , což může být nevýhoda (kdy?).
Převodní charakteristika $U_2 = f(U_1)$ je lineární až do saturace.
 U_2 pak dále již neroste.



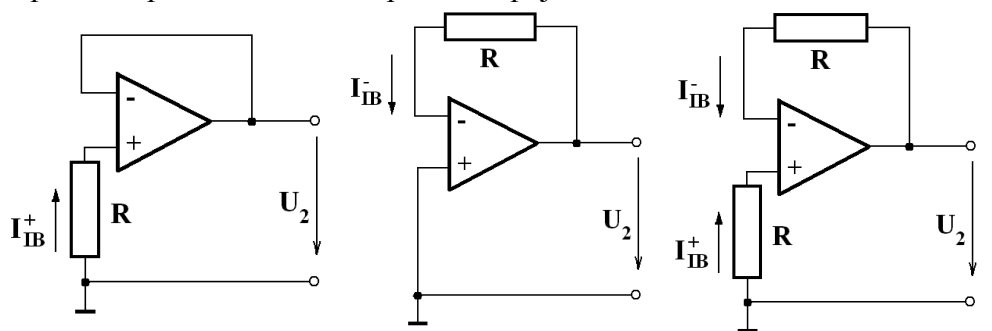
2. Spočítáme napěťový přenos $A_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2 + R_1}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} + 1$ za stejných

předpokladů (proč je na odporu R_1 napětí U_1 ?). Vstupní odpor je velmi veliký a odpovídá vstupu OZ.



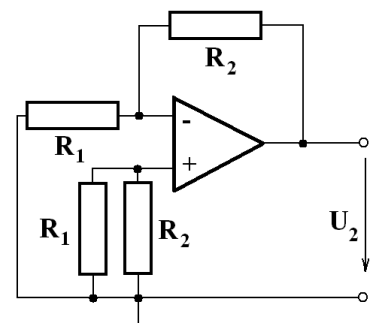
3. Vstupní klidové proudy I_{IB}^+ a I_{IB}^- jsou proudy, které tečou do vstupů OZ. Určíme je pomocí úbytku napětí na zpětnovazebním odporu v zapojení

podle obrázků (napište vzorce). Nejsou-li oba proudy přesně stejné (to by byl poloideální OZ), vzniká vstupní proudová nesymetrie. V zapojení podle obr. vpravo platí $U_2 = R(I_{IB}^- - I_{IB}^+) = RI_{IO}$. Nesymetrii změřenou tímto způsobem kontrolujte výpočtem z měření I_{IB}^+ a I_{IB}^- .



4. Vstupní napěťová nesymetrie je hodnota rozdílového napětí, které musíme přivést na vstup OZ, aby se na výstupu objevilo nulové napětí. Naopak při nulovém rozdílovém napětí mezi vstupy je na výstupu určité napětí, čehož využijeme při měření. V zapojení podle obrázku jsou vykompenzovány vstupní klidové proudy (jak?), takže předpokládáme nulové vstupní rozdílové napětí. Při něm se vlivem nesymetrie objeví na výstupu napětí

U_2 . Pak $U_{IO} = \frac{U_2}{A_U}$, přičemž $A_U = \frac{R_2}{R_1}$ (volíme např. $R_2 = 100R_1$).



Měření na operačních zesilovačích II.

Úkol

Proveďte následující měření na operačním zesilovači (OZ) 1458:

1. Zapojte invertující zesilovač s $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$; navrhnete velikost odporu R_1 tak, aby $A_U = 10$. Zapojte obvod, změřte zesílení střídavým signálem a ověřte, že výstupní napětí je fázově posunuto o 180° . Změřte a nakreslete převodní charakteristiku. Sejměte časové průběhy obou napětí.
2. Zapojte neinvertující zesilovač s $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ a $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$. Vypočítejte A_U . Střídavým signálem ověřte, že výstupní napětí je ve fázi se vstupním. Změřte a nakreslete převodní charakteristiku. Sejměte obrázek.
3. Určete dobu ustálení výstupního napětí Δt a rychlost přeběhu výstupního napětí S při skokové změně vstupního napětí. Sejměte obrázek s označenými veličinami.
4. Změřte a nakreslete v zapojení podle bodu 2 frekvenční charakteristiky $A_{\text{UdB}} = f(f)$ a $\varphi = f(f)$. Z charakteristiky zisku určete mezní frekvenci f_m .

Přístroje:

OZ 1458, sada rezistorů, generátor, osciloskop, PC.

Návod:

Napěťový přenos OZ určíme za zjednodušujících předpokladů:

- OZ má nekonečně velký vstupní odpor, takže do jeho vstupů neteče proud;
- mezi oběma vstupy + a - je nulové napětí.

Měření podle bodu 1 a 2 provedeme při nízké frekvenci, např. 1 kHz.

1. Pro invertující zapojení platí $I_1 = -I_2$. (proudy jsou střídavé, jde proto o fázory proudů)

$$\text{Napěťový přenos } A_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2 I_2}{R_1 I_1} = -\frac{R_2}{R_1}. \text{ Znaménko - značí,}$$

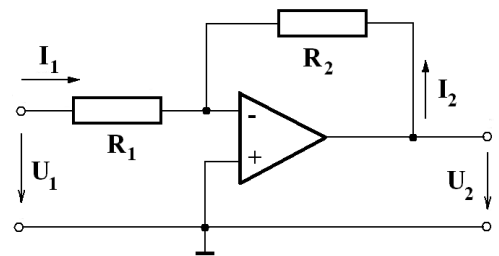
že výstupní napětí je v protifázi ke vstupnímu.

Spočítáme R_1 podle požadavku zadání.

Převodní charakteristika $U_2 = f(U_1)$ je lineární až do saturace.

Výstupní napětí se pak začne „ořezávat“.

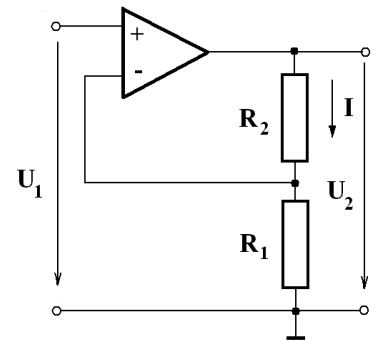
Stáhneme do PC obrázek monitoru osciloskopu a uložíme ho.



2. Spočítáme napěťový přenos $A_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2 + R_1}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} + 1$ za stejných

předpokladů (proč je na odporu R_1 napětí U_1 a proč je výstupní napětí ve fázi se vstupním?).

Sejmeme obrázek.



3. Doba ustálení Δt je doba mezi 10 a 90% doby od skokové změny na vstupu do dosažení ustálené hodnoty na výstupu. Rychlost přeběhu výstupního napětí je poměr $S = \frac{\Delta u_2}{\Delta t}$ (uvádí se ve $\text{V}/\mu\text{s}$), kde

Δu_2 je změna napětí za Δt . Měření provedeme tak, že na vstup OZ přivedeme obdélkový signál o přiměřené frekvenci, zobrazíme časový průběh výstupního napětí patřičně roztažený časovou lupou, umístíme kurzory na potřebné pozice. Obrázek sejmeme pro kladnou a zápornou změnu vstupního napětí a průběh vyhodnotíme na základě uvedených definic.

4. Frekvenční charakteristiky měříme obvyklým způsobem. Při konstantním napětí na vstupu začne výstupní napětí klesat až od určité vyšší frekvence. Podobné je to s fázovým posuvem výstupu oproti vstupu. Mezní frekvence je frekvence, při které poklesne zesílení o 3 dB oproti zesílení střídavého signálu nízké frekvence. Mezní frekvence závisí na zapojení. (Jak spočítáme napětí odpovídající snížení úrovně o 3 dB od výchozí hodnoty?)

Měření na operačních zesilovačích III.

Úkol:

Proveďte následující měření na operačním zesilovači (OZ) 1458:

1. Vytvořte z OZ zdroj proudu řízený vstupním napětím U_1 . Použijte $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, nastavte $I = 3 \text{ mA}$ a ověřte, do jak velké hodnoty zatěžovacího odporu R_z bude proud skutečně konstantní. Porovnejte s teoretickým výpočtem.
2. Vytvořte z OZ komparátor. Ověřte jeho odezvu při různých hodnotách referenčního napětí U_{ref} včetně nuly. Na osciloskopu zobrazte převodní charakteristiku komparátoru $u_2 = f(u_1)$, obrázek sejměte, vytiskněte a označte hodnoty saturačních napětí.
3. Doplňte komparátor hysterezí. Zjistěte vliv poměru odporů R_1/R_2 na hysterezi. Zobrazte, sejměte a vytiskněte převodní charakteristiky pro dvě různé hodnoty hystereze. Porovnejte s vypočtenou hodnotou.
4. Vytvořte zapojení astabilního klopného obvodu (KO) podle obr. 4. Zobrazte osciloskopem, sejměte a vytiskněte časové průběhy napětí na výstupu OZ a na časovacím kondenzátoru. Z obrázku určete periodu napětí. Porovnejte ji se spočítanou teoretickou hodnotou periody KO.

Přístroje:

OZ 1458, generátor, osciloskop, PC, voltmetr, ampérmetr, sada R a C

Návod:

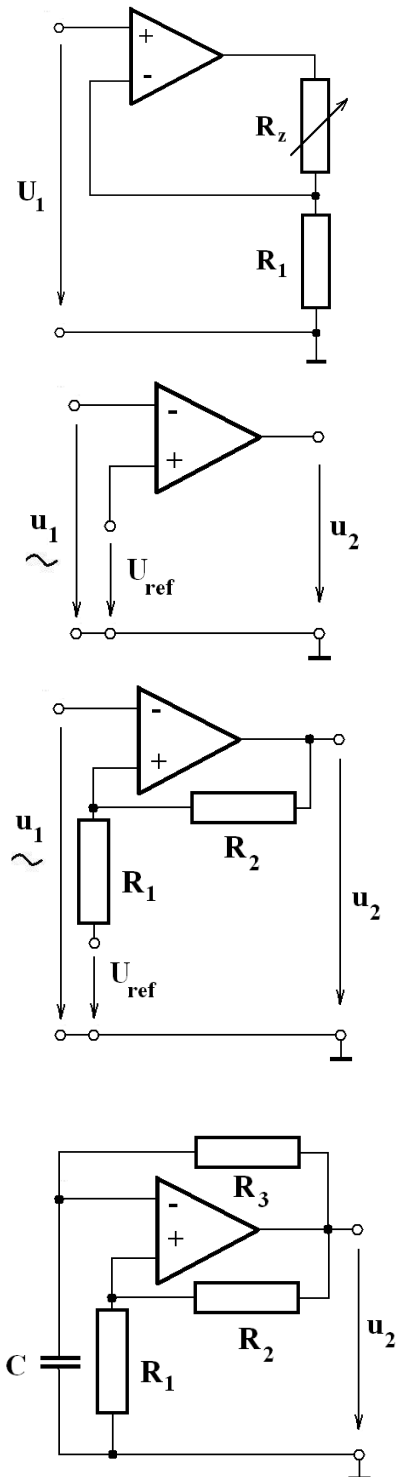
1. Na odporu R_1 je konstantní napětí U_1 (proč?). Zátěží R_z teče stejný proud jako odporem R_1 . Součet úbytků napětí na R_1 a R_z může být roven maximálně saturačnímu napětí OZ. (Jak velký může nejvýše být R_z , aby proud nezačal klesat?)
2. Pokud je mezi oběma vstupy OZ (vnucené) nenulové napětí, výstupní napětí OZ nabývá pouze dvou hodnot – kladné a záporné – odpovídající nasycení (saturaci) obou vnitřních zesilovačů. Komparátor porovnává dvě napětí – vstupní a referenční. U komparátoru bez hystereze se mění výstupní napětí ze záporné na kladnou hodnotu saturačního napětí OZ při poklesu vstupního napětí pod hodnotu referenčního a naopak. Rychlost změny závisí na vlastnostech OZ. Přepneme osciloskop do režimu XY (v horizontálním menu), zobrazíme převodní charakteristiku $u_2 = f(u_1)$ a sejmeme obrázek monitoru. Určíme z něj saturační napětí obou polarit.
3. Hystereze se dosáhne kladnou zpětnou vazbou a zvyšuje se tak i stabilita komparátoru při pomalých změnách vstupního napětí (při překlápění by mohlo vznikat zakmitání obvodu). K překlopení dochází poté, co poklesne či převýší vstupní napětí součet referenčního napětí s úbytkem napětí na odporu R_1 . Tento úbytek však závisí na tom, je-li před překlopením na výstupu kladné nebo záporné saturační napětí. Proto vzniká hystereze o velikosti $U_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ na obě strany od překlápěcí úrovně U_{ref} (odvod'te!).

Obrázek monitoru opět sejmeme a vyhodnotíme.

4. Astabilní KO se překlápí podobně jako komparátor po poklesu či převýšení napětí na C (invertující vstup) oproti neinvertujícímu vstupu, na kterém je část výstupního napětí $U_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ (napěťový dělič R_1, R_2). Kondenzátor se

střídavě přebíjí vlivem kladného či záporného výstupního napětí přes odpor R_3 (exponenciálně s časovou konstantou $\tau = R_3 \cdot C$). Lze odvodit dobu půlkmitu (půlperrody) výstupního obdélníkového napětí $\frac{T}{2} = t \cdot \ln \frac{2R_1 + R_2}{R_2}$ (je-li stejně velké kladné a záporné saturační napětí).

Sejmeme časové průběhy u_2 a u_C , pomocí kurzorů změříme T a porovnáme s vypočtenou hodnotou.



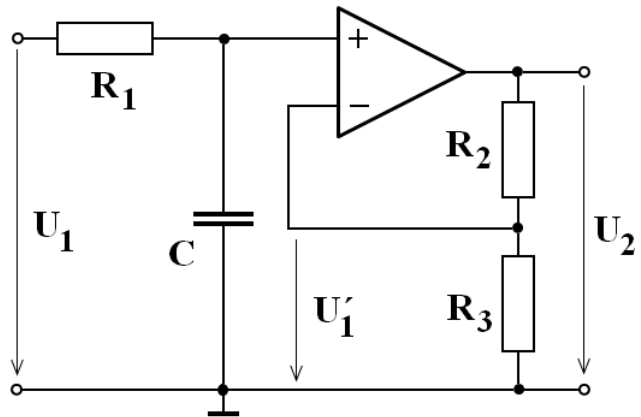
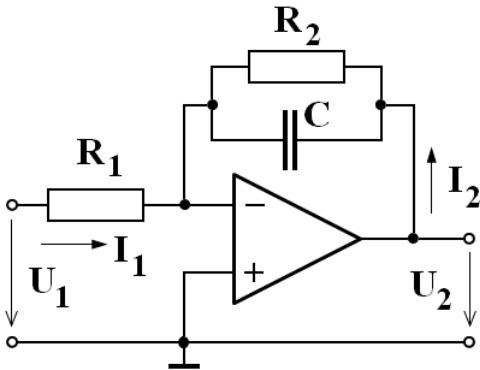
Měření na aktivních RC filtrech s operačními zesilovači.

Úkol:

1. Změřte frekvenční charakteristiky a) invertujícího, b) neinvertujícího aktivního RC filtru s OZ zapojeného jako dolnofrekvenční propust. Zvolte hodnoty odporů tak, abyste v propouštěném pásmu měli zisk A_{udB} kolem 20 dB. Zvolte C tak, aby mezní frekvence byla v řádu jednotek kHz.
2. Graficky znázorněte změřené a teoreticky spočítané charakteristiky zisku A_{UdBm} (dB), A_{UdB} (dB) a fázové charakteristiky φ_m (°), φ (°) filtrů na frekvenci f (Hz).

Návod:

Aktivní filtry se od pasivních liší tím, že propouštěné frekvenční pásmo zesilují – napěťová úroveň v dB zde je kladná, jde o zisk. Výpočet komplexního přenosu A_U provedeme s tím, že uvažujeme ideální OZ.



$$\text{a) Invertující filtr: } A_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C} I_2}{R_1 I_1} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + j\omega R_2 C} \quad (\text{platí } I_1 = -I_2),$$

Vztah připomíná přenos integračního RC členu, mezní frekvence závisí na $R_2 C$ a zesílení v propouštěném pásmu je dáno poměrem R_2/R_1 . Navrhne tedy tento poměr tak, aby zisk A_{UdB} byl asi 20 dB. C zvolíme tak, aby $f_0 = \frac{1}{2\pi R_2 C}$ byla v řádu jednotek kHz.

$$\text{Výsledky (odvoďte): zisk } A_{\text{UdB}} = 20 \log \frac{R_2}{R_1} - 10 \log \left[1 + \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right]; \text{ fázový posuv } \varphi = \arctg \left(-\frac{f}{f_0} \right)$$

Pozor na velikost fázového posuvu: výsledek se zdá formálně shodný s integračním článkem, ale úhel je ve skutečnosti ve 2. kvadrantu, nikoliv ve 4. Funkce $\text{tg } \varphi = \text{tg}(\varphi + 180^\circ)$. Invertor obrací fázi o 180° .

$$\text{b) Neinvertující filtr: } A_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{1 + j\omega R_1 C} \left(\frac{R_2}{R_3} + 1 \right) \quad (\text{platí } \frac{U'_1}{U_1} = \frac{1}{1 + j\omega R_1 C} \text{ a také } \frac{U_2}{U'_1} = \frac{R_2}{R_3} + 1).$$

$$\text{Výsledky: zisk } A_{\text{UdB}} = 20 \log \left(\frac{R_2}{R_3} + 1 \right) - 10 \log \left[1 + \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right]; \text{ fázový posuv } \varphi = \arctg \left(-\frac{f}{f_0} \right).$$

Mezní frekvence závisí na $R_1 C$ a zesílení v propouštěném pásmu je dáno poměrem $R_2/R_3 + 1$

Měření A_{UdBm} a φ_m provedeme pomocí osciloskopu známým způsobem (měření napětí, kurzory...).

Záhlaví tabulek:

- a) $R_1 = \dots \Omega$ $R_2 = \dots \Omega$ $C = \dots \text{ nF}$ $f_0 = \dots \text{ Hz}$
 b) $R_1 = \dots \Omega$ $R_2 = \dots \Omega$ $R_3 = \dots \Omega$ $C = \dots \text{ nF}$ $f_0 = \dots \text{ Hz}$
 a) i b)

f (Hz)	U_1 (V)	U_2 (V)	A_{UdBm} (dB)	φ_m (°)	A_{UdB} (dB)	φ (°)

Modelování el. obvodů v prostředí VEE I.

Úkol:

1. Lissajousovy obrazce

Simulujte měření kmitočtů metodou Lissajousových obrazců. Vytvořte Lissajousovy obrazce pro poměr kmitočtů 1:1, 1:2, 2:3 a fázový posuv 0° , 90° . Libovolně tři vytiskněte.

2. Pasivní dvojbrany

Zobrazte útlumovou a fázovou charakteristiku integračního, derivačního a Wienova RC členu. Program musí také spočítat mezní kmitočet.

Návod:

Fyzické přístroje i bloky provádějící výpočty představují virtuální objekty. Vkládají se tak, že se vyberou v menu a umístí na pracovní plochu kliknutím. Vlevo v menu *Properties* se nastaví jejich vlastnosti podle potřeby. Další úpravy se provádějí v místním menu, to se vyvolá kliknutím pravým tlačítkem na objekt.

Propojování objektů se provádí spojnicemi z pinů – čtverečků po stranách objektů. Vlevo jsou vstupní piny, vpravo výstupní, nahoře sekvenční vstupní a dole sekvenční výstupní. Spojnice se vygeneruje po kliknutí na výchozí a pak cílový pin.

1. Úlohu spouští objekt *START* (menu *FLOW*), nepřetržitý chod zajišťuje objekt *UNTIL BREAK (FLOW – REPEAT)*, jehož výstupy vedou na sekvenční piny potenciometrů *REAL64 SLIDER (DATA – CONTINUOUS)*, pomocí kterých se nastaví kmitočty (nejmenší krok – *DetentSize* – volíme 1). Harmonické průběhy o těchto kmitočtech následně vytvoří generátory *FUNCTION GENERATOR (DEVICE – VIRTUAL SOURCE)*. Obrazce kreslí objekt zapisovače *X vs Y PLOT (DISPLAY)*. (viz obrázek)

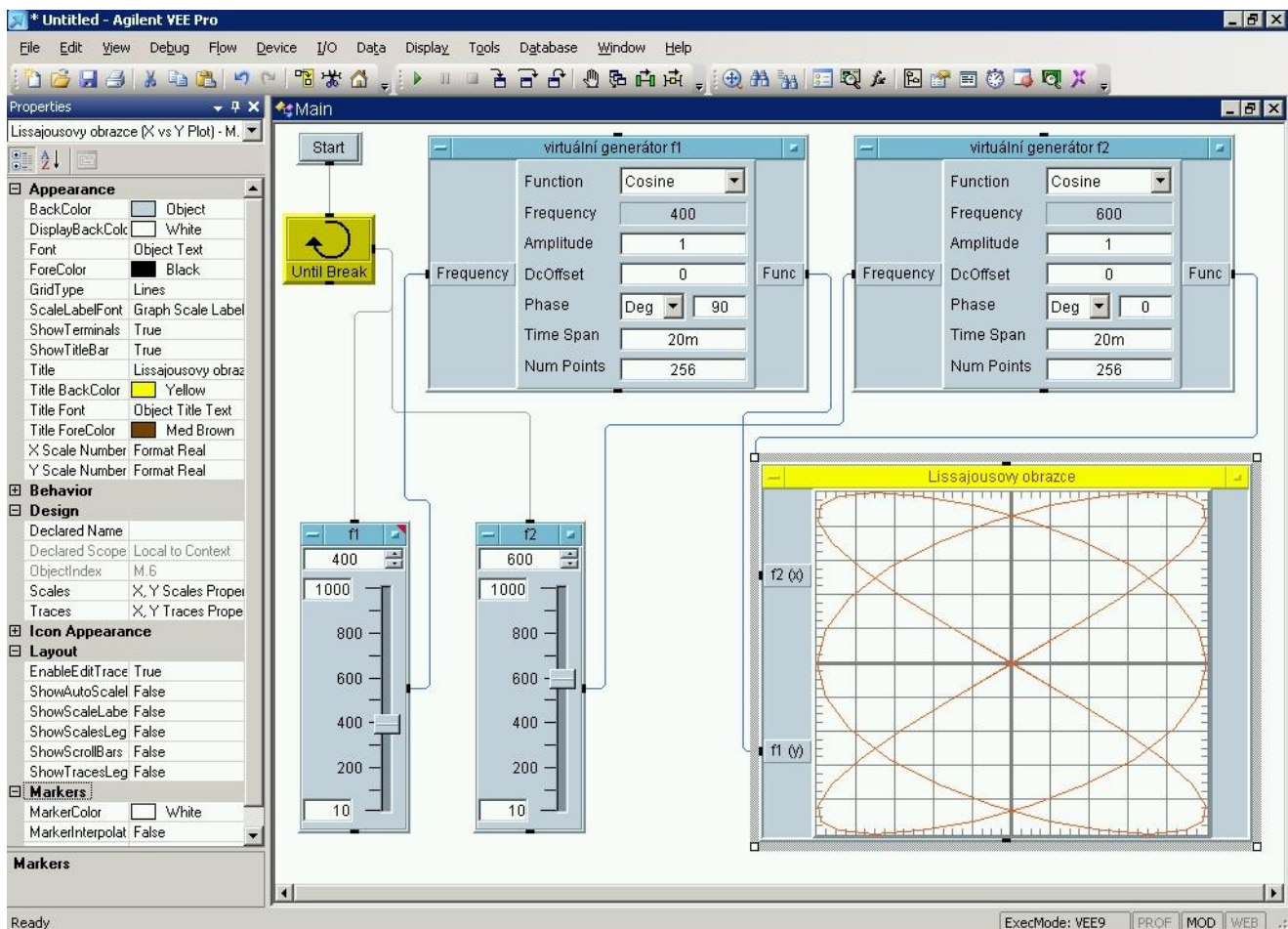
2. Zadáme konstanty *R* a *C* (*DATA – CONSTANT – REAL64*). Lze užít *p, n, u, m, k, M* atd. (např. $10\text{ k}\Omega$ zadáme jako *10k*). Abychom mohli logaritmičticky „projet“ určité kmitočtové pásmo, použijeme pro generování kmitočtů funkci *FOR LOG RANGE* vybranou v menu *FLOW - REPEAT*. Pásmo volíme asi dvě dekády na obě strany od mezního kmitočtu. Ten vypočítáme pomocí objektu *vzorec (FORMULA v menu DEVICE)* a znázorníme objektem *ALPHANUMERIC* (v menu *DISPLAY*).

Dalším objektem *vzorec* vypočítáme komplexní přenos (imaginární složka se uvádí do závorky za *j*, např. reaktance X_C se vyjádří $1/(j(2\pi f C))$). Výrazy pro výpočet komplexního přenosu obou členů z *R, C* a *f* i hodnoty *R, C* použité při měření si připravíme **předem** (viz dřívější úlohy). Na výstupu tohoto vzorce je **komplexní číslo!** Cesta je pak dělí na dvě větve.

První větev vede k útlumu - modul přenosu vypočítá ve vzorci funkce *mag()*, logaritmus funkce *log10()*. Je možno obě funkce sdružit do jednoho vzorce.

Druhá větev vede k výpočtu fázového posuvu - *phase()*.

Charakteristiky nakreslí zapisovač *X vs Y PLOT*, kterému přidáme další y-vstup (pravým tlačítkem místní menu a *ADD TERMINAL – DATA INPUT*) a stupnici frekvence nastavíme logaritmičticky (v menu *PROPERTIES, SCALES*).



Měření na rezonančním obvodu.

Úkol:

1. Zapojte paralelní rezonanční obvod (PRO), najděte rezonanční kmitočet a změřte rezonanční křivku ve vhodně zvolené oblasti. Nakreslete ji v poměrných jednotkách a určete z ní činitel jakosti Q .
2. Vyvolejte v obvodu tlumené kmitý, zobrazte je na osciloskopu a určete z nich činitel jakosti Q .
3. Nastavte na generátoru funkci rozmitání, zobrazte rezonanční křivku a určete z ní činitel Q .
4. Porovnejte výsledky všech tří metod.

Přístroje:

přípravek s rezonančním obvodem, generátor 33120A (33220A), osciloskop HP 5603B (DSO3062A)

Návod:

1) Rezonanční křivka je závislost impedance rezonančního obvodu na frekvenci. Při napájení ze zdroje proudu je napětí na PRO přímo úměrné impedanci, takže postačí měřit napětí. Zdroj proudu vytvoříme z generátoru zařazením sériové velké impedance, tj. např. kondenzátoru s velmi malou kapacitou. Tím současně impedance oddělíme PRO od generátoru a zabráníme přílišnému zatlumení kmitů rezonančního obvodu do malé výstupní impedance generátoru.

U PRO nabývá impedance při rezonanci maximální hodnoty $Z_0 = R_p$ (napětí maximální hodnoty U_0). Podle maxima napětí vyhledáme rezonanční frekvenci f_0 a v jejím vhodně zvoleném okolí změříme rezonanční křivku. Nakreslíme ji ovšem ne v původních, ale v poměrných jednotkách $f_r = f/f_0$; $U_r = U/U_0$. Při rezonanci je $f_r = 1$, $U_r = 1$.

Činitel jakosti Q lze z rezonanční křivky definovat jako $Q = \frac{f_0}{B_3}$, kde B_3 je šířka pásma (v Hz) při

poklesu impedance na $\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$ hodnoty impedance při rezonanci R_p (což je vyjádřeno v decibelech o 3 dB). Z rezonanční křivky nakreslené v poměrných jednotkách určíme Q takto: změříme

na křivce relativní šířku pásma Δf_r při $Z_r = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$ a vypočítáme $Q = \frac{f_0}{B_3} = \frac{f_0}{\frac{B_3}{f_0}} = \frac{1}{\Delta f_r}$.

2) Tlumené kmitý v PRO vyvoláme pilovitým impulsem z generátoru (nastavíme pilovité kmitý o frekvenci mnohem menší než f_0 , aby PRO mohl tlumeně kmitat – např. o tři řády). Z osciloskopu pomocí kurzorů zjistíme dobu T_1 , za kterou klesne počáteční amplituda U_0 tlumených kmitů na polovinu, tedy $u = U_0/2$. Dosazením do rovnice obalové křivky tlumených kmitů $u(t) = U_0 e^{-bt}$ (b je činitel tlumení) dostaneme $\frac{U_0}{2} = U_0 e^{-bT_1}$ a vypočítáme b (po zlogaritmování rovnic - vysvětlete).

Činitel tlumení b pro tlumené kmitý PRO lze vypočítat jako $b = \frac{R_s}{2L}$ (to plyne z poměrně složité teorie

tlumených kmitů). Q vypočítáme dosazením převráceného podílu $\frac{L}{R_s} = \frac{1}{2b}$ do rovnice $Q = \frac{\omega_0 L}{R_s}$

(definice Q pro sérioparalelní náhradní schéma PRO a za předpokladu, že kondenzátor je ideální C). Rezonanční frekvenci f_0 (pro určení ω_0) zjistíme pomocí časových kurzorů z křivky tlumených kmitů.

3) Naprogramujeme na generátoru lineární rozmitání v okolí f_0 , a to v menu pomocí tlačítek na panelu přístroje: SWP (sweep) MENU, START f , STOP f , SWP TIME např. 10 ms, SWP MODE *linear*. Vhodně nastavíme časovou základnu osciloskopu a zobrazíme průběh rezonanční křivky. Q vypočítáme z f_0 a B_3 změřených pomocí kurzorů, obrázek monitoru stáhneme do PC.

Záhlaví tabulky a vypočtené hodnoty:

1)

f (Hz)	$f_r = f/f_0$ (-)	U (V)	$U_r = U/U_0$ (-)

 $\Delta f_r = \dots\dots\dots$ $Q = \dots\dots\dots$

2) $T_1 = \dots\dots\dots$ $b = \dots\dots\dots$ $Q = \dots\dots\dots$

3) $f_0 = \dots\dots\dots$ $B_3 = \dots\dots\dots$ $Q = \dots\dots\dots$

Měření elektrických obvodů pomocí prostředí VEE I.

Úkol:

1. RC filtry

Změřte útlumovou charakteristiku integračního a derivačního RC článku. Odhadněte z nich mezní kmitočet.

2. Rezonanční obvody

Změřte rezonanční křivku paralelního rezonančního obvodu. Určete z křivky pásmo B_3 a činitel jakosti.

Návod:

Fyzické přístroje (funkční generátor, multimetr) ovládáme nikoliv ručně z panelu (jako doposud), nýbrž přímo z programu přes rozhraní GP-IB. Řídíme je pomocí objektu PANEL DRIVER (I/O – INSTRUMENT MANAGER – GET DEVICE). Přístroj musí být zapnut; pokud není přístroj aktivní, je označen NOT LIVE. Přístroj řídíme pomocí nastavených hodnot na PANEL DRIVERu a vstupů do PANEL DRIVERu. Činnost přístroje sledujeme či zaznamenáváme pomocí výstupů z PANEL DRIVERu (ADD TERMINAL INPUT nebo OUTPUT). Tak např. pro vysílání požadované frekvence do generátoru použijeme vstup FREQUENCY a pro čtení údaje multimetru výstup READING.

1. Abychom mohli „projet“ určité kmitočtové pásmo, použijeme funkci FOR LOG RANGE (FLOW - REPEAT), kterou řídíme generátor.. Ten generuje postupně žádané kmitočty a vysílá je do obvodu. Na výstupu obvodu je připojen multimetr, jehož údaje se čtou; je možno je převádět na úroveň (decibely). Obě veličiny (frekvence a útlum) se přivádějí na zapisovač X vs Y PLOT a ten kreslí graf (osa X je logaritmická). Podle průběhu křivky zvolíme vhodné kmitočtové pásmo (asi dvě dekády na obě strany od mezního kmitočtu) a počet hodnot na dekádu (/DEC), aby křivka vypadala spojitě.
2. Program je velmi podobný – kmitočtové pásmo ovšem projíždíme lineárně (FOR RANGE). Nejprve prozkoumáme širší rozmezí kmitočtů a zjistíme tak rezonanční kmitočet. Pak pásmo zúžíme a křivka se vykreslí podrobně. Pásmo B_3 určíme pomocí značek (MARKERS – delta, interpolate), vyvolaných v místní nabídce pod vlastnostmi (PROPERTIES).

Frekvenční analýza periodických signálů.

Úkol:

1. Seznamte se s funkcí *FFT* osciloskopu DSO. Zjistěte odstup šumu od sinusového signálu z generátoru.
2. Proměřte kmitočtové spektrum obdélníkového, trojúhelníkového a pilovitého signálu. Změřte harmonické kmitočty, jejich úrovně a porovnejte je s teoretickými hodnotami.
3. Změřte frekvenční spektrum sledu impulsů pro široký a osamocený impuls.
4. Proveďte matematickou analýzu časového průběhu v programu *Scope 6*.

Přístroje:

funkční generátor, osciloskopy Keysight a Tektronix, PC

Návod:

Každý periodický průběh veličiny lze rozložit na nekonečné množství harmonických (sinusových) složek, které mají frekvence rovné násobku základní frekvence periodického průběhu. Tento Fourierův rozvoj lze často (pracně) spočítat analyticky. Opakují-li se ve druhé polovině periody některé funkce hodnoty z první poloviny periody s opačným znaménkem, má funkce jen liché harmonické (např. obdélníkový či trojúhelníkový průběh).

Osciloskopy DSO obsahují často modul, pomocí něž lze harmonické složky změřit – provádí tzv. rychlou Fourierovu transformaci *FFT*. Na obrazovce pak není zobrazen časový průběh, ale frekvenční spektrum (vodorovně frekvence, svisle napětí či úroveň). Také existují programy, které spočítají harmonické složky po analýze daného průběhu.

Při použití funkce *MATH FFT* musíte nejprve nastavit zdrojový průběh v časové oblasti tak, aby byl zobrazen větší počet period signálu, na displeji byl vertikálně celý průběh a vertikální posun byl nulový. Vzorkovací kmitočet funkce *FFT* (*Sa/s*) je závislý také na nastavené rychlosti časové základny. Nejvyšší kmitočet (Nyquistův), který lze správně měřit, je roven polovině vzorkovacího kmitočtu.

1. Na osciloskopu *Keysight* vyzkoušejte nejprve spektrum sinusového signálu o amplitudě 1 V a frekvenci např. 10 kHz. Po nastavení časového průběhu vyvolejte menu *MATH*, funkci *f(t)* a operátor *FFT*. Nastavte vhodné měřítko frekvenčního spektra (*span*) a frekvenci uprostřed displeje (*center*). V podmenu *More FFT* zvolte vhodné vzorkovací okno. Pro lepší rozlišení kmitočtu je vhodné Hanningovo, pro přesnější určení úrovně ploché (flattop). Pomocí kurzorů změřte frekvenci a úroveň 1. harmonické a odstup šumu od signálu (či parazitních harmonických) v dB. Vypočítejte příslušné napětí.
2. Změřte při téže frekvenci úroveň harmonických požadovaných průběhů a zapište je do tabulky.
3. Nastavte na generátoru při frekvenci 10 kHz široký impuls (např. $T_s = 20\% T$), zobrazte a stáhněte frekvenční spektrum a jeho obálku. Totéž proveďte pro osamocený impuls (neboli velmi úzký impuls vzhledem k periodě *T*).
4. Použijte osciloskop *Tektronix* a funkční generátor. Zobraze na osciloskopu jen o málo více než jednu periodu signálu. Potom v programu *Scope* obraz stáhněte (přes sériové rozhraní), pomocí kurzorů označte jednu periodu zobrazeného průběhu (pilu vytvoříte např. jako půlperidu trojúhelníka) a proveďte matematickou analýzu *FFT*. Program vypočítá jednotlivé harmonické ve voltech a v procentech z 1. harmonické. Tyto hodnoty převed'te na dB vztažené k 1. harmonické.

Naměřené hodnoty

Sinus – odstup signál – šum dB, tj. při $U_m = 1$ V je šum mV

harmo- nická	obdélník			trojúhelník				pila			
	teor. úroveň (dB)	změřená úroveň (dB)		harmo- nická	teor. úroveň (dB)	změřená úroveň (dB)		harmo- nická	teor. úroveň 100% pily (dB)	změřená úroveň (dB)	
		osc.	PC			osc.	PC			osc.	PC
1.	0			1.	0			1.	0		
3.	-9,952			3.	-22,082			2.	-6,021		
5.	-13,979			5.	-30,946			3.	-9,542		
7.	-16,902			7.	-36,776			4.	-12,04		
9.	-19,076			9.	-41,121			5.	-13,98		
11.	-20,819			11.	-49,418			6.	-15,56		

Měření na stabilizátorech.

Úkol

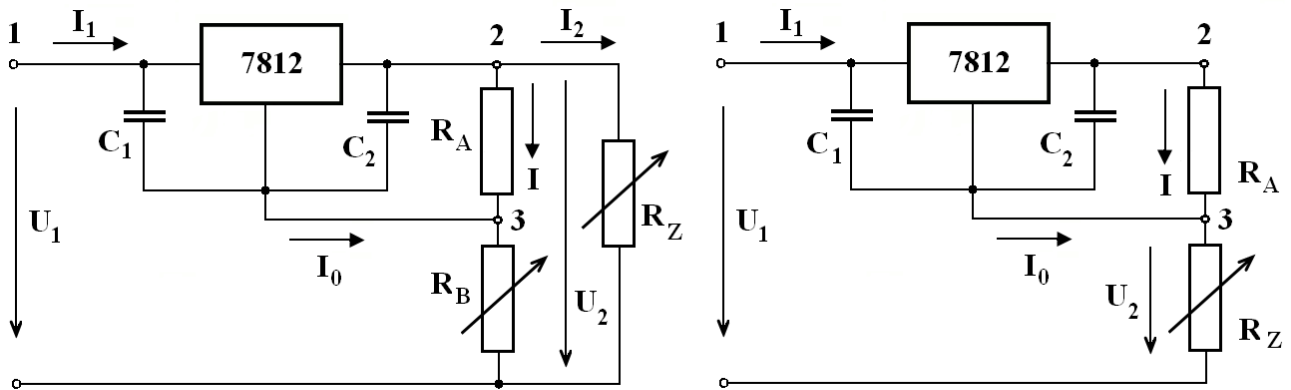
1. Změřte zatěžovací charakteristiku $U_2 = f(I_2)$ integrovaného stabilizátoru 7812 při jmenovitém napětí do maximálního proudu 200 mA.
2. Zapojte obvod pro dosažení jiného než jmenovitého napětí (obr. vlevo). Vypočítejte hodnotu odporu R_B pro výstupní napětí 15 V a porovnejte se skutečností. Změřte zatěžovací charakteristiku.
3. Zapojte obvod jako zdroj konstantního proudu I (obr. vpravo). Spočítejte tento proud pro $R_A = 330 \Omega$ a porovnejte se skutečností. Změřte zatěžovací charakteristiku.
4. Na spínaném stabilizátoru LM 2574 HVN 5 V změřte a nakreslete závislosti činitele plnění na napájecím napětí $t/T = f(U_1)$ a proudu ze zdroje na napětí zdroje $I_1 = f(U_1)$, vše při konstantním proudu zátěže $I_2 = 100 \text{ mA}$. Napětí zdroje nastavujte v rozmezí 7 – 20 V.

Přístroje:

přípravky s IO 7812 a LM 2574; posuvné odpory (např. $R_B = 250 \Omega$, $R = 600 \Omega$)
digitální voltmetr a ampérmetr, osciloskop

Návod:

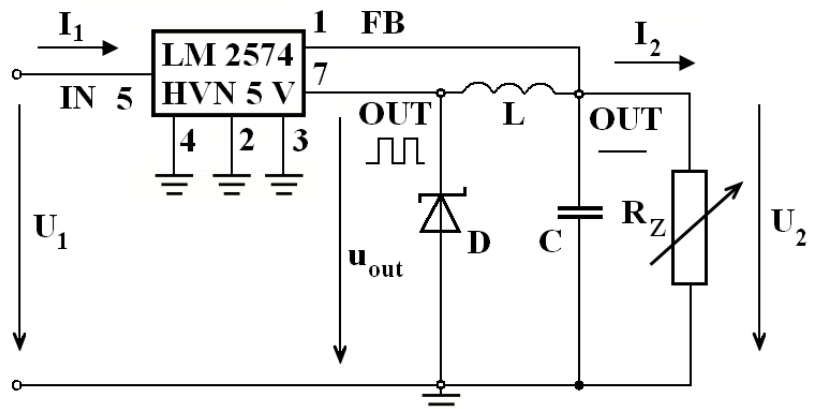
Zpětnovazební stabilizátor řady 7812 je zapojen na přípravku doporučeným způsobem s C_1 a C_2 , vývody jsou totožné s body 1, 2, 3. Na přípravku je též rezistor $R_A = 330 \Omega$.



1. Zapojíme zdroj mezi body 1, 3, zátěž mezi body 2, 3 a proměříme zatěžovací charakteristiku z chodu naprázdno (odpojená zátěž) do maximálního zadaného proudu.
2. Zapojíme obvod podle obr. vlevo (měřicí přístroje nejsou zakresleny). Je-li $R_A = 330 \Omega$ a předpokládáme-li, že proud I_0 je zanedbatelný, vypočítáme hodnotu R_B tak, aby výstupní napětí bylo 15 V. (Na R_A je stabilizované napětí z bodu zadání 1, na R_B je zbytek do 15 V, oběma odpory teče tentýž proud I . Na posuvném odporu nastavíme vypočtenou hodnotu R_B pomocí ohmmetru.)
3. Zapojíme obvod podle obr. vpravo (měřicí přístroje nejsou zakresleny). Zátěži je vnucen proud I tekoucí odporem R_A , který je dán výstupním napětím obvodu z bodu zadání 1 a velikostí R_A . Tento proud poteče do zátěže bez ohledu na její velikost až potud, kdy součet napětí na R_A a R_Z se přiblíží k napětí U_1 asi na 1 V (úbytek uvnitř IO). Pak už IO proud neudrží a ten bude s rostoucím R_Z klesat.

Spínaný stabilizátor LM 2574 je zapojen na přípravku s výstupním obvodem tvořeným kondenzátorem, tlumívkou a Schottkyho diodou.

4. Na výstup připojíme zatěžovací odpor R_Z a nastavíme proud $I_2 = 100 \text{ mA}$. Výstupní vyhlazené napětí je $U_2 = 5 \text{ V}$. Měříme napětí U_1 a proud I_1 zdroje na vstupu přípravku. Na výstupu IO zobrazíme na osciloskopu pulsující napětí u_{out} a pomocí kurzorů změříme činitel plnění t/T . Je zřejmé, že s rostoucím napětím zdroje se pulsy zužují a proud ze zdroje klesá.



Modelování el. obvodů v prostředí VEE II.

Úkol:

1. Rezonanční obvody

Zobrazte rezonanční křivku paralelního rezonančního obvodu. Vyzkoušejte, jak se mění její tvar se změnami R_s , L či C .

Stejným způsobem zobrazte rezonanční křivku sériového rezonančního obvodu.

2. Amplitudová modulace

Vytvořte amplitudově modulovaný signál. Zobrazte jeho průběh v čase a frekvenční spektrum.

Pozorujte, jak se obě závislosti mění při změnách modulační frekvence a hloubky modulace.

Návod:

1. Rezonanční křivka je závislost impedance na frekvenci.

Složky impedance C , L a R_s zadáme pomocí potenciometrů REAL64 SLIDER (menu DATA – CONTINUOUS), přičemž zvolíme stupnice potenciometrů v rozumných mezích (nF – pF, mH – μH, Ω). Dáváme pozor na nastavení kroku v místní nabídce *properties – detens*.

Kmitočty vytváří objekt FOR RANGE. Jejich rozmezí musíme vyzkoušet tak, aby rezonanční kmitočet ležel asi uprostřed. Nepřetržité generování kmitočtů zajistí sekvence START – UNTIL BREAK – FOR RANGE. Předpokládáme sérioparalelní náhradní schéma - komplexní impedance se vypočítá podle

vzorce ($Y = j\omega C + \frac{1}{R_s + j\omega L}$, $Z = \frac{1}{Y}$) v objektu FORMULA (DEVICE). Modul impedance spočítá

funkce *mag()*.

Rezonanční křivku nakreslí zapisovač X vs Y PLOT v lineárních souřadnicích. Doplníme ho řídicím vstupem CLEAR, aby se průběžně mazaly dříve nakreslené grafy.

Dále spočítáme pomocí vzorce $\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_s}{L}\right)^2}$ rezonanční kmitočet a znázorníme ho objektem

ALPHANUMERIC (DISPLAY).

Důležitá poznámka: výstupy objektu smyčkování UNTIL BREAK vedeme ke všem potenciometrům REAL64 SLIDER a zdroji frekvence FOR RANGE, abychom zajistili nepřetržité dodávání dat pro zapisovač.

Podobně namodelujeme rezonanční křivku sériového rezonančního obvodu, kde $Z = R_s + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$

a $\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC}}$.

2. Modulační kmitočet a hloubku modulace vytvoříme potenciometry REAL64 SLIDER. Nepřetržitý běh programu zajistí UNTIL BREAK.

Obě vlny – modulační i nosnou – vytvoříme funkčními generátory (DEVICE – VIRTUAL SOURCE - FUNCTION GENERATOR). Abychom mohli plynule měnit modulační kmitočet, přidáme do jeho generátoru vstup z příslušného potenciometru. Kmitočet nosné zadáme přímo v generátoru.

Modulovanou vlnu vytvoříme podle vzorce $u(t) = (1 + m \sin \omega t) \sin \Omega t$ objektem FORMULA (vstupy jsou nosná $\sin \Omega t$ a modulační kmitočet $\sin \omega t$ z generátorů, hloubka modulace z potenciometru.

Modulovanou vlnu znázorníme v čase pomocí zapisovače XY TRACE (DISPLAY).

Frekvenční spektrum vytvoříme ve vzorci (FORMULA) funkcí *fft(x)* a znázorníme objektem MAGNITUDE SPECTRUM (DISPLAY – SPECTRUM (FREQ)).