

Generátory měřicího signálu

1. Zadání:

A. Na předloženém generátoru obdélníkového a trojúhelníkového signálu s OZ změřte:

- a) kmitočet f_0
- b) amplitudu obdélníkového U_{mp} a trojúhelníkového U_{mt} signálu
- c) rozsah regulace napětí U_R (U_{Rmin} , U_{Rmax}) pro nastavení minimálního a maximálního offsetu. Ověřte tento rozsah i výpočtem.
- d) rozsah regulace střídavy S_{min} , S_{max} při konstantní amplitudě signálu
- e) závislost frekvence a výstupního napětí obdélníkového signálu na velikosti napájecího napětí v rozsahu $\pm U_B = 5$ až 15 V.

B. Z předložených částí sestavte:

- 1) oscilátor s Wienovým článkem a OZ
- 2) oscilátor s aproximačním funkčním měničem

V obou případech změřte:

- a) kmitočet f_0
- b) amplitudu U_m
- c) zatěžovací charakteristiku $U_{výst} = f(I_{výst})$ a výstupní odpor $R_{výst}$

Všechny závislosti zpracujte graficky

Doporučená literatura:

Katalogy TESLA nebo jiné podle použitých integrovaných obvodů

Seifart, M.: Polovodičové prvky a obvody na spracovanie spojitých signálov. ALFA, Bratislava 1988

Hiller, H.: Operationsverstärker - Schaltungen und Anwendungen. VEB Vlg Technik Berlin, 1982

Vedral, J.: Elektronické obvody měřicích přístrojů. Skriptum ČVUT-FEL, Praha 1994

Tietze, U., Schenk, Ch.: Halbleiter-Schaltungstechnik. Springer Vlg, Berlin 1993

Kabeš, K.: Operační zesilovače v automatizační technice (zejména kapitola 39 o omezovačích). SNTL, Praha 1989

2. Popis měřeného předmětu:

Měřeným předmětem je jednoduchý generátor tvarových kmitů (obdélík a trojúhelník) s operačními zesilovači vhodného typu, popř. s integrovaným komparátorem s logickým výstupem (na př. MAC 111 nebo MAC 160), oscilátor s operačním zesilovačem a stabilizací amplitudy. Zde se uvedou konkrétní zapojení generátorů.

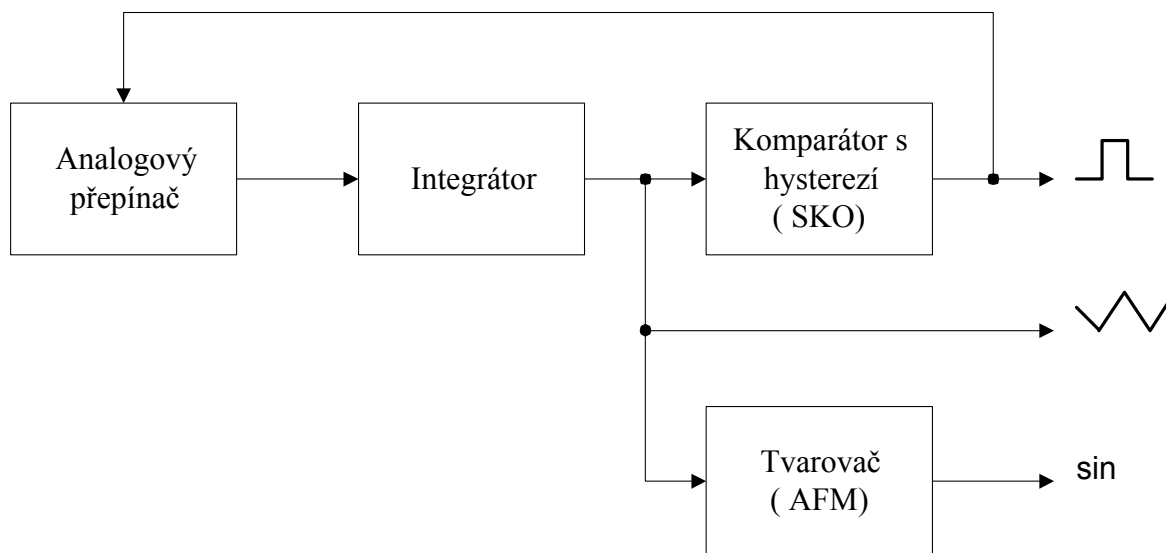
3. Teoretický rozbor:

a) vlastností měřeného předmětu

Generátory neharmonických signálů

Generátory neharmonických signálů mají široké využití v elektronických přístrojích i v elektrických měřeních. Uvedme namátkou několik příkladů. V časové základně osciloskopu je běh času simulován pilovými kmity, dynamické vlastnosti elektronických prvků i systémů jsou charakterizovány odezvou na skok napětí, realizovaný periodickým obdélíkovým signálem, logické obvody pracují s dvouhodnotovým signálem rovněž ve tvaru obdélíku, při zobrazování voltampérových charakteristik nebo při ladění oscilátorů řízených napětím (VCO) se s výhodou používá trojúhelníkových signálů.

Zdroji neharmonických signálů jsou zpravidla *funkční generátory*, které generují současně obdélíkový, trojúhelníkový a harmonický signál. Všechny tři signály mají shodný kmitočet a přesně definovanou časovou souslednost (v přeneseném slova smyslu fázový rozdíl, uvažujeme-li fázové vztahy mezi základními harmonickými).



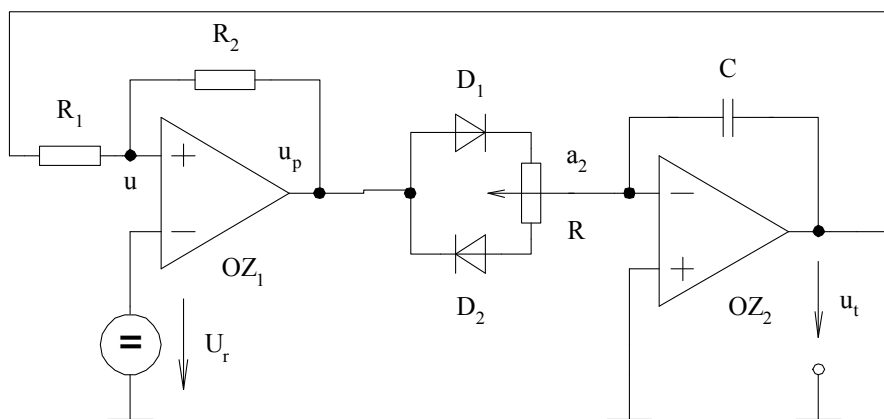
Obr. 47

Funkční generátory se uplatňují i v případech, kdy potřebujeme pouze generátor harmonického signálu. Při generování zejména nízkofrekvenčních harmonických signálů je nezbytná stabilizace amplitudy výstupního napětí oscilátoru (viz na př. RC oscilátory s Wienovým nebo přemostěným T-článkem). Stabilizační obvody jsou často relativně složité a nákladné.

Ukazuje se, že v mnoha případech je výhodnější vyrobit nejprve trojúhelníkový signál pomocí integrátoru a analogového komparátoru s hysterezí (Schmittova obvodu). Trojúhelník se pak tvaruje na harmonický signál aproximačním funkčním měničem. Základní blokové schéma funkčního generátoru je na obr. 47.

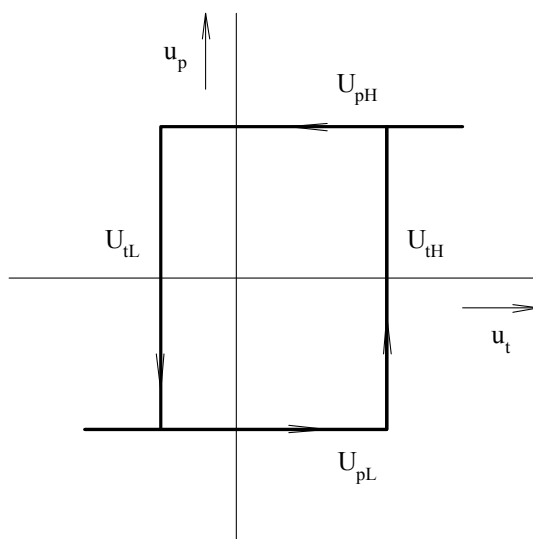
Generátor obdélníkového a trojúhelníkového signálu

Napětí trojúhelníkového průběhu jednoduše získáme integrováním obdélníkového napětí. Někdy je účelné sestavit ze dvou operačních zesilovačů generátor, který generuje současně obdélníkové i trojúhelníkové napětí (obr. 48).

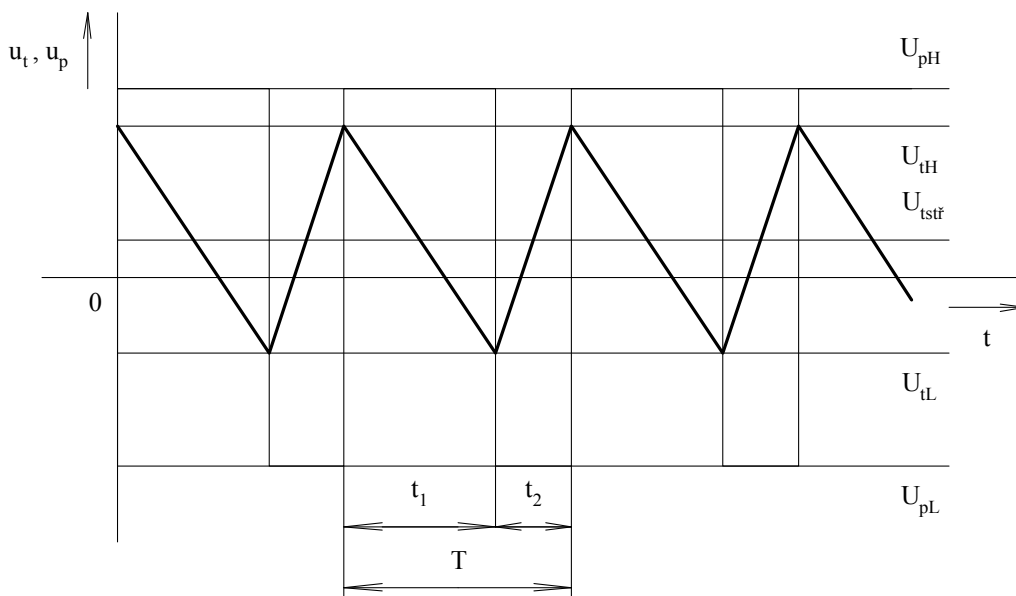


Obr. 48

Zesilovač OZ_1 pracuje jako neinvertující komparátor a zesilovač OZ_2 jako invertující integrátor. Při výkladu funkce budeme předpokládat, že je na výstupu komparátoru právě napětí $u_p = U_{pH}$. Protože toto napětí působí na vstupu integrátoru OZ_2 , bude jeho výstupní napětí u_t rovnoměrně klesat rychlostí nepřímo úměrnou časové konstantě integrátoru $\tau_{i1} = a_2 \cdot R \cdot C$ (regulace střídý). V okamžiku, kdy napětí u_t dosáhne sestupné prahové hodnoty U_{tL} komparátoru, překloupí se OZ_1 do stavu záporné saturace ($u_p = U_{pL}$). Napětí u_p se integruje s časovou konstantou $\tau_{i2} = (1 - a_2) \cdot R \cdot C$ a napětí u_t se rovnoměrně zvyšuje. Dosáhneme-li naběžné prahové hodnoty U_{tH} komparátoru, zesilovač OZ_1 se překloupí do stavu kladné saturace a celý děj se opakuje (obr.49, 50).



Obr. 49



Obr. 50

Potenciometrem R můžeme měnit dobu klesání (t_1) a dobu stoupání (t_2) trojúhelníkového průběhu napětí u_t a současně i střidu S_p obdélníkového napětí u_p . Při $u_p > 0$ vede dioda D_1 a dobu t_1 (neboli strmost sestupné části obdélníkového průběhu) určuje odpor mezi běžcem a horním koncem potenciometru R . Při $u_p < 0$ vede dioda D_2 a dobu t_2 (neboli strmost stoupající části trojúhelníkového průběhu) určuje odpor mezi běžcem a dolním koncem potenciometru R . Pohybuje-li se běžec potenciometru nahoru, zvětšuje se strmost sestupné části, pohybuje-li se dolů, zvětšuje se strmost stoupající části. Je-li běžec ve střední poloze, obvod generuje souměrné trojúhelníkové napětí. Frekvence generovaného napětí nezávisí na nastavení potenciometru R .

Pomocí zdroje U_r můžeme za podmínek dále stanovených měnit střední hodnotu výstupního trojúhelníkového napětí U_{tAV} (offset).

Pro odvození patřičných vztahů si generátor rozdělíme na dvě části :

Komparátor

Vztah mezi hysterezí U_H neinvertujícího komparátoru a rozkmitem jeho výstupního napětí ($U_{pH} - U_{pL}$) se odvodí postupem uvedeným v úloze „Analogový komparátor“.

Za předpokladu $U_{pL} = -U_{pH}$ (symetrické úrovně výstupního napětí komparátoru) platí:

$$U_H = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot U_{pH}$$

Z popsaného principu činnosti generátoru je patrné, že rozkmit trojúhelníkového signálu je roven hysterezi komparátoru ($U_H = U_{tH} - U_{tL}$)

Integrátor

U integrátoru s OZ platí rovnost proudů tekoucích přes odpor R a zpětnou vazbou přes kondenzátor C

$$\frac{u_p}{R} = -C \cdot \frac{du_t}{dt} \quad -\frac{1}{R \cdot C} \cdot \int u_p dt = \int du_t$$

$$u_t = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot \int u_p dt$$

Za dobu t_1 , kdy se integruje napětí U_{pH} s časovou konstantou $a_2 \cdot R \cdot C$ změní se výstupní napětí v absolutní hodnotě o hodnotu rozkmitu trojúhelníkového signálu, tedy $(U_{tH} - U_{tL}) = 2 \cdot U_{tH}$.
Za dobu t_2 , kdy se integruje napětí U_{pL} s časovou konstantou $(1 - a_2) \cdot R \cdot C$ změní se výstupní napětí v absolutní hodnotě opět o hodnotu rozkmitu trojúhelníkového signálu, tedy $(U_{tH} - U_{tL}) = 2 \cdot U_{tH}$.

Dosažením příslušných veličin do předcházejícího vztahu pro u_t integrací v mezích 0 až t_1 , resp. 0 až t_2 a příslušnými úpravami dostaneme dva vztahy jeden pro t_1 , druhý pro t_2 .

Perioda kmitů T je rovna součtu t_1 a t_2 . Za předpokladu $U_{pL} = -U_{pH}$ pro ní platí:

$$T = R \cdot C \cdot \frac{U_H}{U_{pH}}$$

Frekvence kmitů f :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{U_{pH}}{R \cdot C \cdot U_H}$$

Střída pravouhlého signálu S_p :

$$S_p = \frac{t_1}{T} = t_1 \cdot f = a_2$$

Pro střidu trojúhelníkového signálu platí:

$$S_t = 1 - S_p$$

Střední hodnota výstupního napětí u_t - ofset:

$$U_{tAV} = \frac{U_{tH} + U_{tL}}{2} = \frac{1}{2} \cdot \left(U_r \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} - U_{pL} \cdot \frac{R_1}{R_2} + U_r \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} - U_{pH} \cdot \frac{R_1}{R_2} \right)$$

$$U_{tAV} = U_r \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} - \frac{R_1}{2 \cdot R_2} \cdot (U_{pH} + U_{pL}) = U_r \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} - \frac{R_1}{2 \cdot R_2} \cdot (U_{pH} - U_{pH}) = U_r \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Pro správnou činnost generátoru je nutné, aby platilo:

$$U_{tH} < U_{pH} \quad U_{tL} > U_{pL}$$

Z provedeného odvození je zřejmé, že obě veličiny S a ofset se dají nastavovat nezávisle na sobě a lineárně: střída pomocí R a ofset U_r .

Chceme-li navrhnout generátor s konstantní frekvencí, střídou 0,5 bez možnosti nastavování ofsetu je možné v zapojení podle obr. 4 vypustit zdroj U_r , diody D_1 , D_2 a potenciometr R nahradit pevným rezistorem R , který připojíme mezi výstup OZ_1 a invertující vstup OZ_2 . Jmenovitá hodnota odporu R bude přitom pro stejnou frekvenci poloviční než v případě generátoru s proměnnou střídou.

Liší-li se požadované amplitudy signálů od přirozených amplitud výstupních napětí použitých integrovaných obvodů (u OZ saturační napětí, u komparátorů zpravidla log. úroveň TTL) je třeba výstupní napětí upravit vhodným omezovačem nebo snížením napájecího napětí OZ , v nouzi alespoň odporovým děličem.

Generátory harmonického signálu - oscilátory

Oscilátory jsou protipólem frekvenčně stabilních zesilovačů. Vyžadují se od nich oscilace na některém kmitočtu f_0 . Pro to se zavádí definovaná kladná zpětná vazba na kmitočtu f_0 . Obvod musí být uspořádán tak, aby oscilace měly konstantní amplitudu a minimální zkreslení. Selektivita obvodu může být zajištěna různými způsoby. Vždy však musí na kmitočtu f_0 platit, že celkový fázový posuv je 0° (nebo 360°) - kladná zpětná vazba.

Pro zesílení zesilovače se zpětnou vazbou platí:

$$\bar{A}' = \frac{\bar{A}}{1 - \bar{A} \cdot \bar{B}}$$

kde **A** ... zesílení zesilovače bez zpětné vazby
B ... napěťový přenos zpětnovazebního článku

Z tohoto vztahu vyplývá pro $\bar{A} = \infty$ (zesilovač ztratí stabilitu a rozkmitá se) tzv. Nyquistovo kritérium vzniku oscilací ve tvaru

$$\bar{A} \cdot \bar{B} = 1$$

Po úpravách

$$\bar{A} \cdot \bar{B} = A \cdot e^{j \cdot \varphi_A} \cdot B \cdot e^{j \cdot \varphi_B} = A \cdot B \cdot e^{j(\varphi_A + \varphi_B)} = 1$$

kde φ_A ... fázový posun zesilovače
 φ_B ... fázový posun zpětnovazebního článku

dostaneme dvě dílčí podmínky:

amplitudovou:

$$A \cdot B = 1$$

a fázovou:

$$\varphi_A + \varphi_B = 2 \cdot k \cdot \pi \quad k = 0, 1, \dots$$

V praxi to znamená, že pro vznik oscilací je třeba aby se zesílení zesilovače rovnalo převrácené hodnotě přenosu zpětnovazebního článku a aby zpětnovazební signál přicházel na vstup zesilovače se stejnou fází jako má vstupní signál.

Wienův oscilátor

Nejjednodušším generátorem sinusového napětí je oscilátor s Wienovým můstkem v operační síti OZ (obr.51).

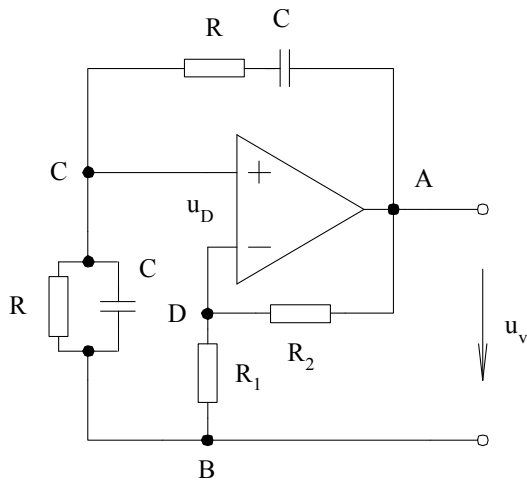
Wienův můstek je mezi body A a B napájen výstupním napětím u_V operačního zesilovače a jeho výstupní napětí u_D mezi body C a D se přivádí mezi vstupy zesilovače. Mezi body A a B můstku jsou zapojeny vlastně dvě paralelní větve, a to frekvenčně závislá větev, tvořená serií a paralelní kombinací rezistorů R a kondenzátorů C, a frekvenčně nezávislá větev, sestavená z rezistorů R_2 a R_1 . Frekvenčně závislá větev zajišťuje kladnou zpětnou vazbu do neinvertujícího vstupu zesilovače činitelem:

$$\bar{\beta} = \frac{\bar{Z}_4}{\bar{Z}_3 + \bar{Z}_4}$$

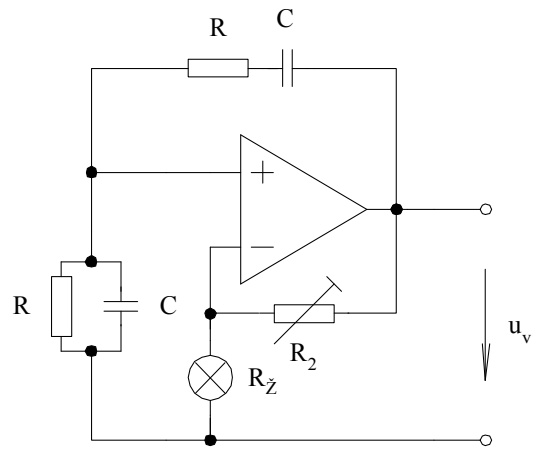
kde impedance Z_3 je impedance serií kombinace R, C a Z_4 impedance paralelní kombinace R, C:

$$\bar{Z}_3 = R - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$\bar{Z}_4 = \frac{R}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C}$$



Obr. 51



Obr. 52

Zpětnovazební činitel β je frekvenčně závislý a matematicky lze odvodit, že při frekvenci

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

nabývá jeho modul maximální hodnoty $\beta = 1/3$. Při frekvenci f_0 mají impedance Z_3 a Z_4 stejný fázový úhel a zpětnovazební napětí na neinvertujícím vstupu je ve fázi s výstupním napětím u_v operačního zesilovače. Tím je splněna fázová podmínka pro vznik trvalých oscilací.

Aby byl Wienův můstek při frekvenci f_0 vyvážený, musí být splněna podmínka:

$$\frac{\bar{Z}_4}{\bar{Z}_3 + \bar{Z}_4} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{3}$$

Z toho:

$$3 \cdot R_1 = R_1 + R_2$$

$$R_2 = 2 \cdot R_1$$

Odporů rezistorů R_1 a R_2 určují zesílení operačního zesilovače v neinvertujícím zapojení, které je

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 3$$

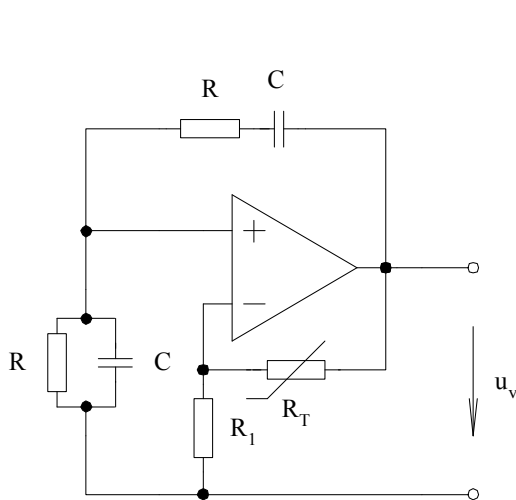
Celkové zesílení otevřené smyčky je $A \cdot \beta = 1$. Při zesílení $A \cdot \beta = 1$ mají oscilace konstantní amplitudu, při $A \cdot \beta > 1$ se amplituda oscilací zvětšuje, až dosáhne maximálního výstupního napětí zesilovače. Při $A \cdot \beta < 1$ se amplituda oscilací zmenšuje až do jejich zániku.

Generování sinusových kmitů s konstantní amplitudou vyžaduje přesně nastavený a stálý přenos operačního zesilovače, daný poměrem R_2/R_1 , což lze obtížně zajistit. Proto se v generátorech tohoto typu používají obvody pro automatické řízení zesílení. Počáteční přenos zesilovače se zvolí nepatrně větší než 3, aby obvod bezpečně kmital a aby na vstupu operačního zesilovače bylo napětí $u_D \neq 0$. Dosáhne-li amplituda výstupního napětí u_v

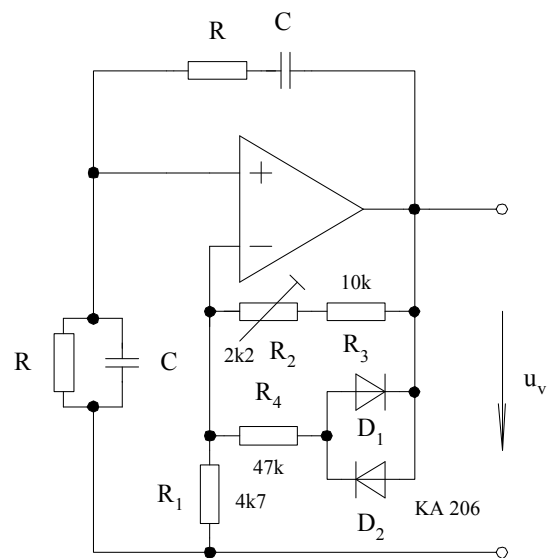
požadované úrovně, obvod automatického řízení zesílení začne zmenšovat přenos zesilovače, zvětšování amplitudy sinusového signálu se zastaví a napětí u_D se rovná nule.

Ke stabilizaci amplitudy generovaných kmitů je možno použít žárovku (obr. 52) nebo termistor (obr.53). Žárovka (v podžhaveném stavu) reaguje na růst amplitudy kmitů růstem odporu vlákna R_z , odpor termistoru R_T naopak při zvětšování amplitudy klesá. Žárovku nebo termistor zapojujeme místo rezistorů R_1 resp. R_2 tak aby při vzrůstu amplitudy výstupního napětí zesílení zesilovače klesalo a naopak.

Na obr. 54 je sinusový generátor s Wienovým článkem, využívající k automatickému řízení zesílení (a tím ke stabilizaci amplitudy generovaných kmitů) dvě proti sobě zapojené diody ve zpětnovazební větvi operačního zesilovače. Odpor ve zpětné vazbě se nastaví trimrem R_2 tak, aby obvod bezpečně kmital. Zvětšuje-li se amplituda výstupního napětí u_v , zvětšuje se proud procházející příslušnou diodou v propustném směru. Úbytek napětí na diodě se také zvětšuje, ale jen úměrně s logaritmem proudu, odpor diody v propustném směru se tedy zmenšuje. Tím se výsledný odpor ve zpětné vazbě mezi výstupem a invertujícím vstupem OZ zmenšuje, záporná zpětná vazba se zvětšuje a zesílení zesilovače klesá. Podobně pracuje obvod, jestliže amplituda výstupního napětí vlivem malého přenosu A, β klesá.



Obr. 53



Obr. 54

b) měřicí metody

Z hlediska použitých metod se jedná o běžná měření frekvence, času, napětí a proudu např. pomocí osciloskopu. Pouze je nutné upozornit, že v případě generátoru obdélníku a trojúhelníku měříme proud a napětí neharmonického průběhu a proto je zde třeba použít vhodné přístroje (měřící skutečnou efektivní hodnotu - TRUE RMS) nebo vhodnou metodu. Výstupní odpor generátoru určujeme ve vhodném pracovním bodě ze zatěžovací charakteristiky stejným způsobem jako v případě jakéhokoli jiného zdroje.