

Radioelektronická měření (MREM)

# Generátory signálů

4. přednáška

Jiří Dřínovský

Ústav radioelektroniky FEKT VUT v Brně

# Úvod

Důležitou aplikací měřicí techniky je ověřování funkcí nejrůznějších elektrických zařízení, proměřování frekvenčních charakteristik, měření poměru signál-šum, měření nelineárností obvodů apod. Pro všechna tato (a řadu dalších) měření je zapotřebí mít k dispozici zkušební signál s nastavitelnými parametry a s garantovanou přesností. Generované signály jsou *stejnoseměrné, periodické a neperiodické (stochastické čili náhodné nebo šumové)*. Místo signálu náhodného se v praxi často používá signál *pseudonáhodný*, který má vlastnosti obdobné signálu náhodnému; ačkoliv je periodický, jeho perioda může být podstatně delší než je doba měření a pak se uživateli jeví jako neperiodický.

Zvláštní skupinu tvoří generátory používané pro ověřování EMC – elektromagnetické kompatibility (slučitelnosti) různých zařízení. Tyto generátory generují např. definované skupiny pulsů (*bursts*).

# Generátory harmonického průběhu

Základním blokem těchto generátorů je *harmonický oscilátor*. Ten je obvykle tvořen zpětnovazebním obvodem sestávajícím se zesilovače a frekvenčně závislého obvodu ve zpětné vazbě (filtru). Přenos tohoto obvodu závisí na frekvenci. Používá se *kladná zpětná vazba*, čili signál se z výstupu zesilovače přivádí na vstup se stejnou polaritou (používá se např. neinvertující vstup operačního zesilovače). Má-li dojít ke generování harmonického signálu o frekvenci  $f_0$ , musí být splněny dvě podmínky:

- tzv. zesílení *otevřené smyčky* (součin zesílení zesilovače a přenosu filtru) musí být na frekvenci  $f_0$  rovno jedné;
- celkový fázový posuv *otevřené smyčky* (součet fázových posuvů zesilovače a filtru) musí být na frekvenci  $f_0$  roven  $0^\circ$  nebo  $k \cdot 360^\circ$ ,  $k$ -celé kladné.

Pro frekvence odlišné od  $f_0$  je zesílení *otevřené smyčky* podstatně menší než jedna. Změny frekvence generovaného signálu se dosahuje změnou parametrů filtru, v praxi změnou hodnot  $R$ ,  $C$  nebo  $L$  (tzv.

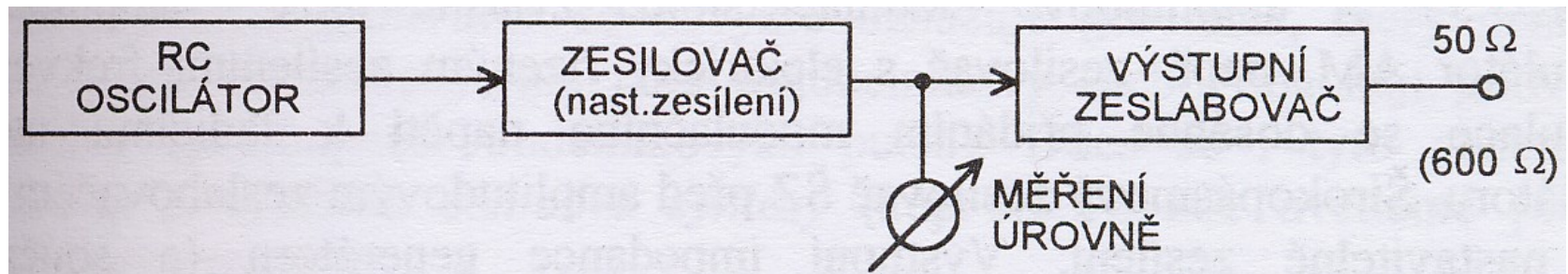
# Generátory harmonického průběhu

---

*laděním* generátoru), takže se mění frekvence, pro kterou jsou splněny uvedené dvě podmínky stability oscilací. V praxi je zesílení otevřené smyčky na počátku o něco větší než jedna, takže vzniknou oscilace s postupně rostoucí amplitudou, a nějakým způsobem je zajištěno omezení růstu oscilací nad zvolenou úroveň (v nejjednodušším případě samočinným poklesem zesílení zesilovače při růstu amplitudy vstupu do oblasti, kde začíná nasycení zesilovače).

# Nízkofrekvenční generátory

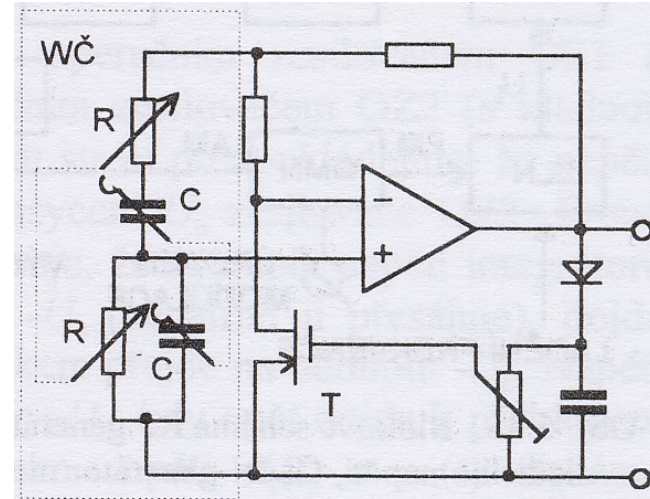
Tyto generátory slouží ke generování harmonických signálů o frekvencích od desítek Hz do jednotek MHz. Jejich vstupní impedance bývá většinou  $50\ \Omega$ , případně  $600\ \Omega$  (v audio pásmu).



RC oscilátor pracuje způsobem, který byl popsán na předchozích snímcích. Filtr ve zpětné vazbě je vhodný RC obvod (u LC obvodu by vycházeli příliš velké hodnoty indukčností). Typickým představitelem nízkofrekvenčního harmonického oscilátoru je *oscilátor s Wienovým můstkem*.

# Nízkofrekvenční generátory

Wienův můstek je frekvenčně závislý impedanční můstek tvořený tzv. Wienovým členem  $W\check{C}$  a dvojicí rezistorů. Pro kruhovou frekvenci  $\omega_0 = 1/(RC)$  je přenos Wienova členu reálný a roven  $1/3$ . Aby byla stabilizována amplituda signálu, nahrazuje se spodní z dvojice rezistorů nelineárním prvkem, např. tranzistorem  $T$ . Potenciometr v bázi tranzistoru slouží ke změně amplitudy.



Výstup oscilátoru je připojen na zesilovač s nastavitelným zesílením sloužící k nastavení amplitudy výstupního napětí. Rozsah výstupního napětí generátoru se volí *nastavitelným zeslabovačem* (atenuátorem) s definovanou výstupní impedancí ( $50 \Omega$  nebo  $600 \Omega$ ); zeslabení se většinou uvádí v dB. Výstupní úroveň se měří před zeslabovačem a výstupní napětí se definuje buď pro výstup naprázdno ( $R_z \rightarrow \infty$ ), nebo pro jmenovitou zatěžovací impedanci generátoru; pokud v tomto druhém

# Nízkofrekvenční generátory

---

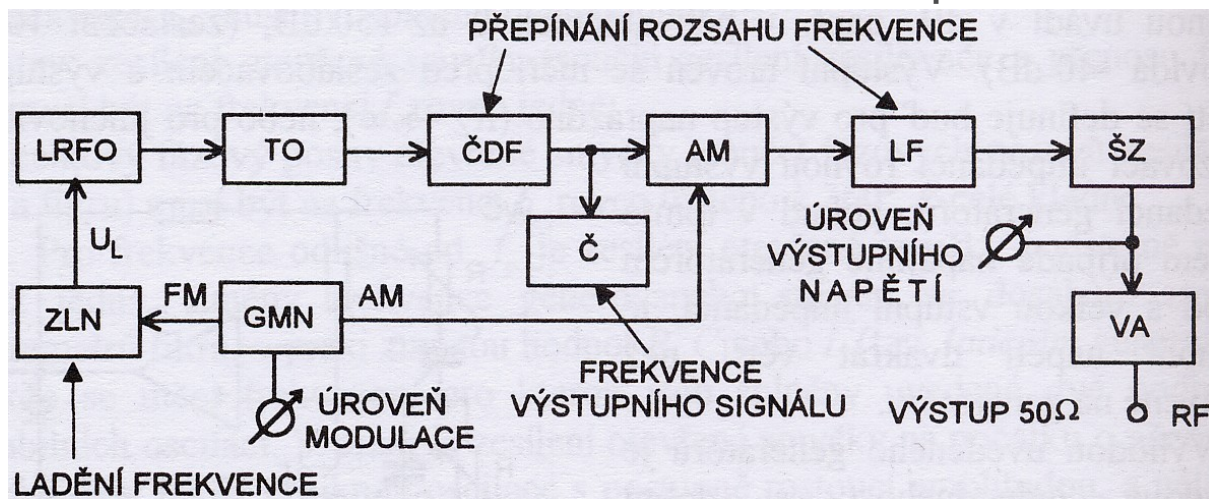
případě napájíme generátorem obvod s velkou vstupní impedancí, je výstupní napětí dvakrát větší než nastavené na generátoru.

Výhodou uvedeného generátoru je obvodová jednoduchost a dobrá spektrální čistota generovaného signálu (činitel zkreslení řádu 0,1 % nebo 0,01 %). Přesnost nastavení frekvence bývá asi 3 %, kolísání amplitudy v rozsahu nastavených frekvencí bývá desetiny dB.

# Radiofrekvenční generátory (RF generátory)

Využívají harmonického oscilátoru s LC filtrem ve zpětné vazbě (LC oscilátoru). V polovině 20. století se konstruovaly podle téměř nezměněného blokového schématu; používají se pro radioelektronická měření ve frekvenčním pásmu od stovek kHz do stovek MHz. Obvykle umožňují amplitudovou a frekvenční modulaci generovaného signálu.

Přepínání frekvencí v širokém rozsahu se dosahuje převedením signálu tvarovacím obvodem TO na pravoúhlé impulsy. Číslicovým dělením frekvence těchto impulsů (ČDF) lze snadno frekvenci snížit a filtrací pomocí laděného filtru LF získáme opět harmonický signál.



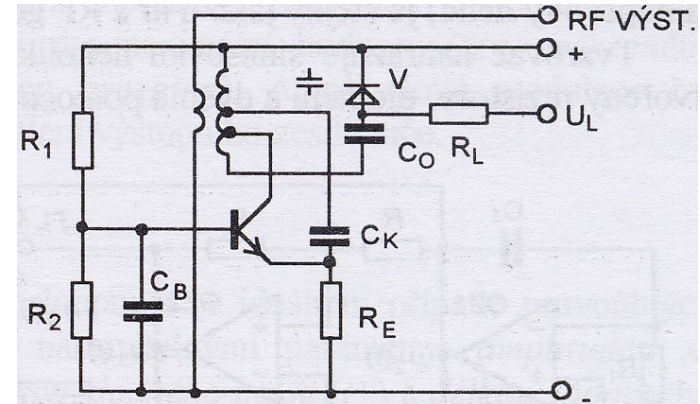


# Radiofrekvenční generátory (RF generátory)

Princip získání amplitudově a frekvenčně modulovaného výstupního signálu i změna amplitudy výstupního signálu pomocí amplitudového zeslabovače je vidět z blokového schématu. K amplitudové modulaci slouží zvláštní blok – amplitudový modulátor AM, např. zesilovač s elektricky řízeným zesílením; frekvenční modulace se dosáhne přidáním modulačního napětí k ladícímu napětí oscilátoru. Širokopásmový zesilovač ŠZ před amplitudovým zeslabovačem VA má nastavitelné zesílení. Výstupní impedance generátoru (a současně amplitudového zeslabovače) je  $50 \Omega$  (výjimečně  $75 \Omega$ ).

# Radiofrekvenční generátory (RF generátory)

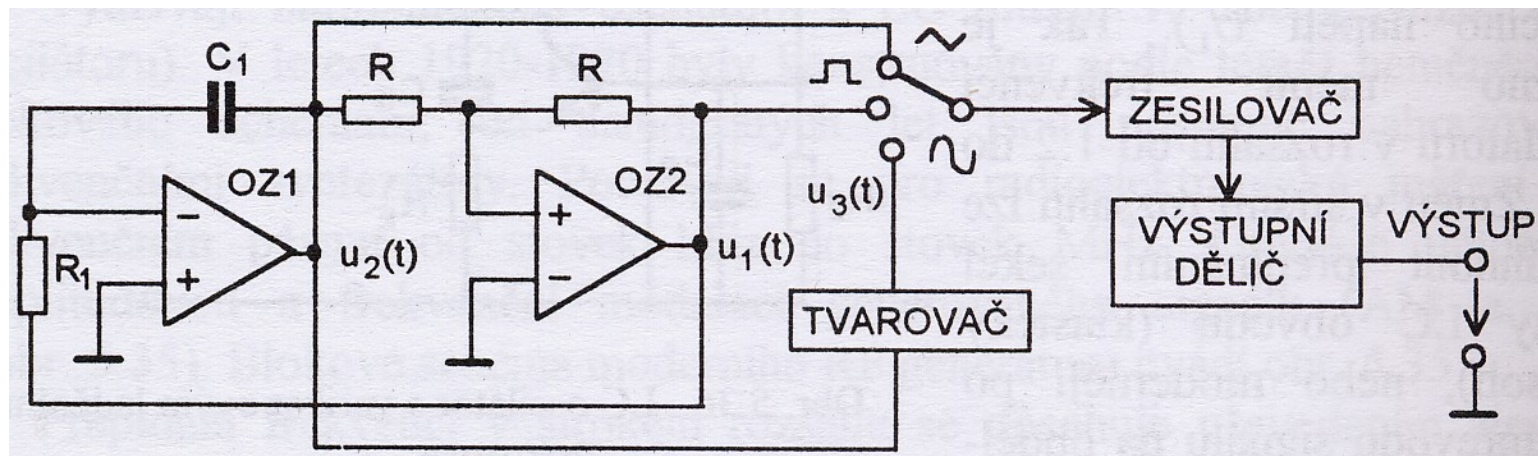
Frekvence oscilací je měněna změnou kapacity varikapu  $V$  (diody pólované v závěrném směru, jejíž kapacita se mění se změnou ladicího napětí  $U_L$ ). Tímto způsobem je možno měnit frekvenci oscilátoru v rozsahu od 1:2 do 1:3. Změn v širším rozsahu lze dosáhnout přepínáním sekcí cívky LC obvodu (klasický způsob), nebo, moderněji po mezipřevodu signálu na obdélníkový číslicovým děličem kmitočtu.



# Funkční generátory

Jako *funkční generátor* se obvykle označuje generátor, který generuje signál nejen harmonický, ale také trojúhelníkový (nebo obecněji pilový) a pravoúhlý (posloupnost obdélníkových pulsů). Dnes se i tyto generátory konstruují s využitím *číslicové syntézy*.

Základním blokem funkčních generátorů je obvod generující trojúhelníkové periodické napětí a posloupnost pravoúhlých impulsů. Trojúhelníkové napětí je pomocí *tvarovače* (obvodu s nelineární a definovanou závislostí výstupního napětí na vstupním napětí) převedeno na (přibližně) harmonické napětí. Tento převod by šel



# Funkční generátory

provést dokonaleji pomocí laděného filtru, ale realizace takového filtru pro široké frekvenční pásmo je obtížná; tvarovač je jednoduchý obvod, v širokém pásmu frekvenčně nezávislý.

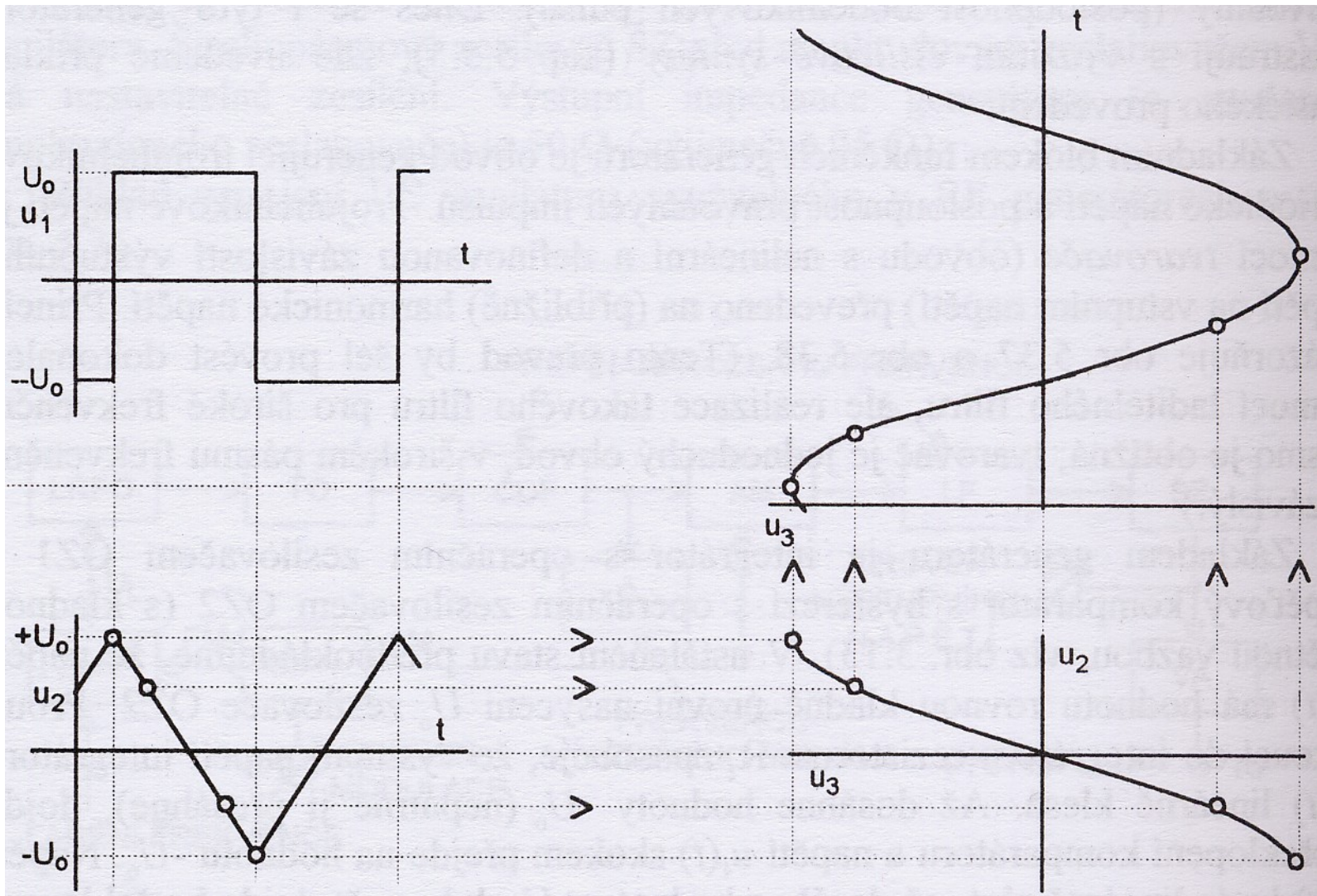
Základem generátoru je integrátor s operačním zesilovačem OZ1 a napěťový komparátor s hysterezí s operačním zesilovačem OZ2 (s kladnou zpětnou vazbou). V ustáleném stavu předpokládejme, že napětí  $u_2(t)$  má hodnotu rovnou kladné úrovni nasycení  $U_0$  zesilovače OZ2. Proud tekoucí do integrátoru rezistorem  $R_1$  způsobuje, že výstupní napětí integrátoru  $u_1(t)$  lineárně klesá. Až dosáhne hodnoty  $-U_0$  (nepatrně ji přesáhne), dojde k překlopení komparátoru a napětí  $u_1(t)$  skokem přejde na hodnotu  $-U_0$ . Napětí  $u_2(t)$  bude lineárně růst, až dosáhne hodnoty  $+U_0$ , kdy opět dojde k překlopení komparátoru a děj se opakuje. Vyvedením napětí  $u_1(t)$  a  $u_2(t)$  získáme obdélníkové a trojúhelníkové napětí. Využitím tvarovače sinusovou převodní charakteristikou (monotónní, od záporného maxima do kladného

# Funkční generátory

maxima) získáme harmonické napětí. Výstup generátoru (zesilovač a napěťový dělič) je stejný jako u nf a RF generátorů. Tvarovač nahrazuje sinusovku několika přímkovými úseky; je to obvod tvořený rezistory, diodami a dvěma pomocnými napětími.

Frekvence generátoru je nastavitelná změnou časové konstanty integrátoru (hodnoty  $RC$ ) v rozsahu mHz až desítek MHz. Přesnost nastavení frekvence jsou jednotky procent z rozsahu, kolísání amplitudy přes celý frekvenční rozsah je asi 1 dB. Linearita trojúhelníkového napětí bývá asi 1 % amplitudy. Funkční generátory mají často také amplitudově a frekvenčně modulovaný výstup signálu. Důležitým případem frekvenční modulace je spojitá změna výstupní frekvence od minimální do maximální hodnoty (tzv. *frekvenčně rozmítaný výstup*, *frequency sweeping*). Amplitudové modulace lze dosáhnout elektrickým řízením zesílení výstupního zesilovače.

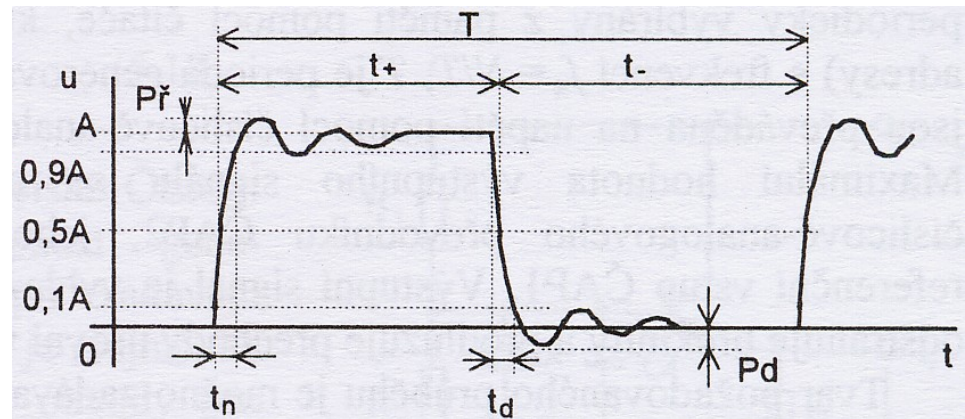
# Funkční generátory



# Pulsní generátory

*Pulsní generátory generují posloupnost (v ideálním případě pravoúhlých nebo lichoběžníkových) pulsů s nastavitelnými parametry: amplitudou  $A$ , frekvencí  $f$  (nebo periodou  $T$ ), délkou kladného pulsu ( $t_+$ ) a délkou záporného pulsu ( $t_-$ ), činitelem plnění  $t_+/T$  (duty factor), zpožděním proti okamžiku spuštění, často i nastavitelnou dobou náběhu  $t_n$  a dobou doběhu  $t_d$  (a tedy nastavitelným sklonem náběžné a sestupné hrany). Zkratky P<sub>ř</sub> a P<sub>d</sub> označují překmit a podkmit napětí proti ideálnímu průběhu pulsu.*

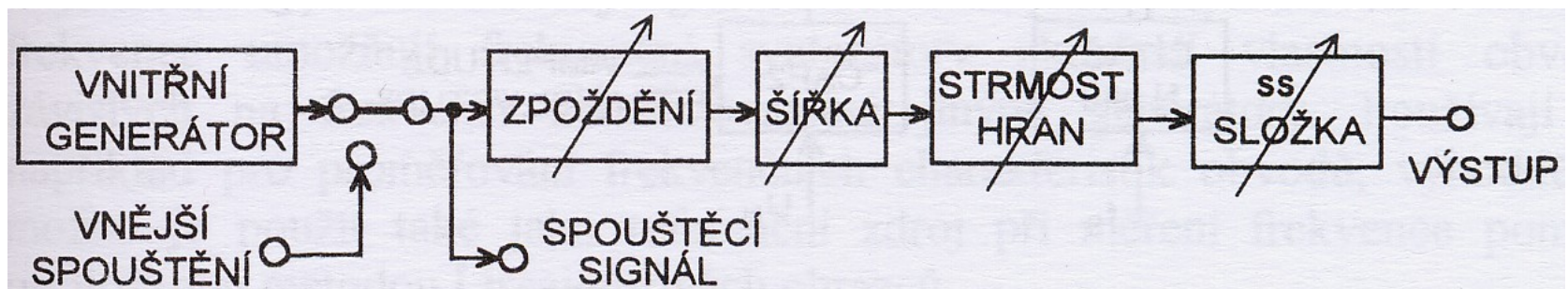
Doba náběhu a doba doběhu jsou definovány pro úrovně 0,1 A a 0,9 A, ale některé pulsní generátory umožňují jejich definování uživatelem; šířka pulsu je definována pro úroveň 0,5 A.



# Pulsní generátory

Nejjednodušší generátory vyrábějí pouze kladné pulsy. Dokonalejší generátory vyrábějí také symetrické pulsy a často umožňují i nastavení stejnosměrného offsetu.

Kaskáda bloků za prepínačem bývá často zdvojena; pak jde o dvoukanálový generátor. Některé generátory jsou schopné generovat i definované skupiny pulsů, případně posloupnosti dat v různých formátech. Existují také pulsní generátory, na jejichž výstupním signálu je možno předvolit zkreslení (špičky, zákmity apod.) a zkoušet tak různá zařízení v podmínkách bližších reálnému provozu.

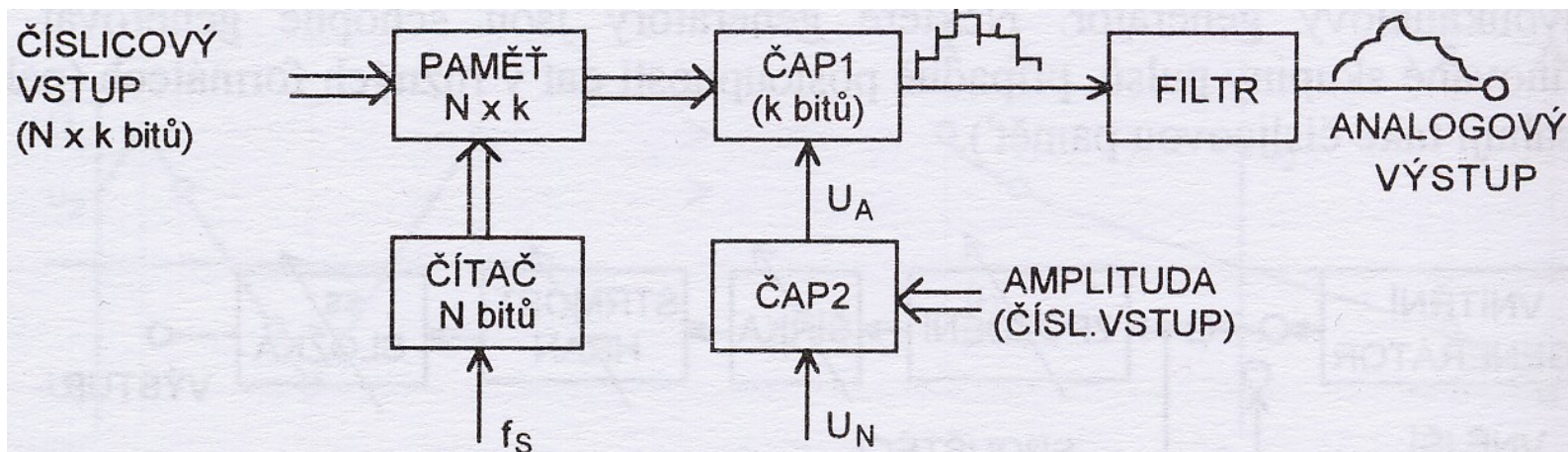




# Arbitrary waveform generators

Libovolný periodický průběh je možno (přibližně) generovat pomocí *generátoru programovatelného průběhu*. Uživatel přitom definuje tvar průběhu a jeho frekvenci.

Posloupnost  $N$  hodnot signálu ( $k$ -bitových slov) v jedné periodě je uložena v číslicové paměti generátoru. Jednotlivá slova v paměti vyjadřují amplitudy vzorků, vzdálených od sebe o stejné časové intervaly. Tyto vzorky jsou periodicky vybírány z paměti pomocí čítače, který čítá pulsy (a generuje adresy) s frekvencí  $f_s = N/T$ ;  $T$  je perioda generovaného napětí. Čísla z paměti jsou převáděna na napětí pomocí



# Arbitrary waveform generators

D/A převodníku (ČAP1). Maximální hodnota výstupního signálu se nastavuje pomocí druhého D/A převodníku (ČAP2), jehož výstup je připojen na referenční vstup ČAP1. Výstupní signál je vyhlazen filtrem, který odstraňuje překmity a prodlužuje přechody úrovní výstupního signálu z ČAP1.

Tvar požadovaného průběhu je možno zadávat bod po bodu z klávesnice, vypočítat v počítači, nebo sejmout ze záznamu z paměti osciloskopu. Základní periodické průběhy (sinusovka, obdélník, trojúhelník) jsou často uloženy v paměti ROM v generátoru. Dokonalost generovaného průběhu je určena počtem vzorků na periodu signálu. Zvyšování počtu vzorků na periodu  $N$ , ale při dané frekvenci hodin generátoru  $f_s$  zmenšuje rozsah nastavitelných frekvencí signálu. Frekvence generovaného signálu je totiž dána vztahem  $f_{\text{SIG}} = f_s/N$ .

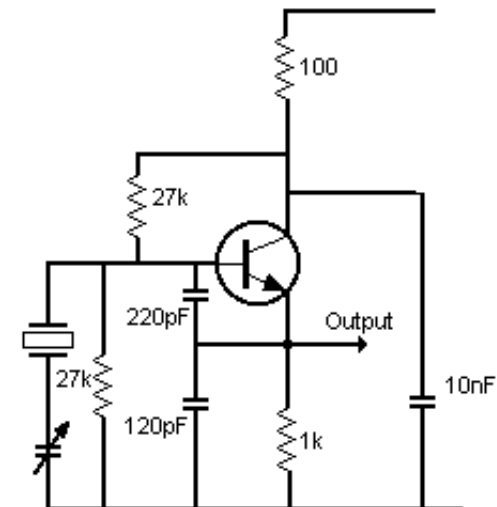
# Frekvenční syntezátory

*Frekvenční syntezátory (frequency synthesizers)* jsou dnes nejperspektivnějším typem signálních generátorů. Jejich základním znakem je vysoká přesnost a stabilita frekvence generovaného signálu, která se zadává číslicově např. jako osmimístné číslo. Rozlišovací schopnost (váha poslední číslice zadávané frekvence) může být  $\mu\text{Hz}$ ,  $\text{mHz}$  nebo  $\text{Hz}$ . Přesnost a stabilita frekvence těchto generátorů je určena přesností a stabilitou frekvence *krystalového oscilátoru*  $f_r$ , jako část zpětnovazebního obvodu používá piezoelektrických vlastností výbrusu křemenného krystalu X.

Výstupní frekvence syntezátoru je dána výrazem

$$f_o = \frac{m}{n} f_r$$

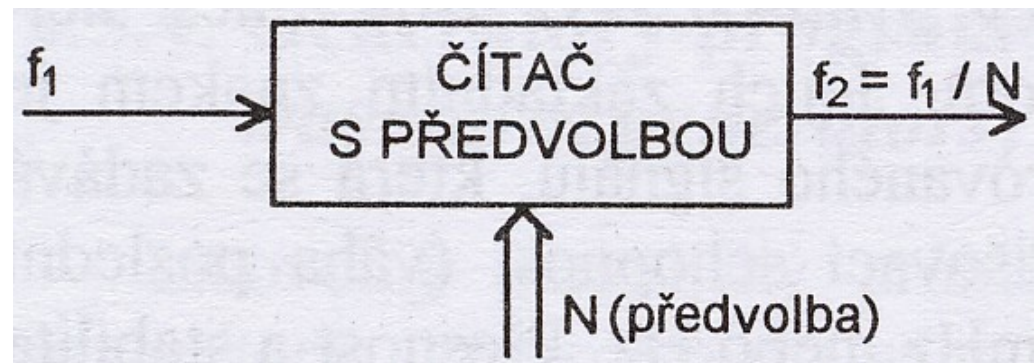
kde  $m$ ,  $n$  jsou kladná celá čísla. Číslo  $n$  určuje rozlišovací schopnost generátoru, číslo  $m$  volíme při zadávání frekvence. Z výše uvedeného vztahu je zřejmé, že



# Frekvenční syntezátory

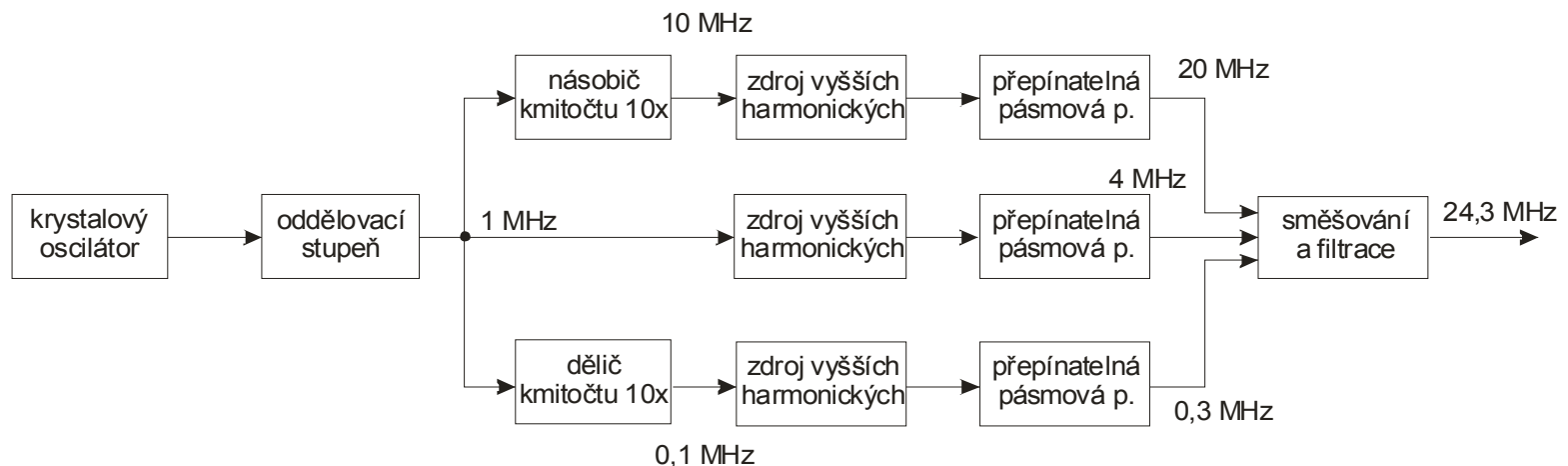
syntezátor musí obsahovat obvody pro dělení a násobení frekvence, potřebné jsou dále obvody pro sčítání a odčítání frekvencí (směšovače) a filtry typu pásmové propust (které z deformovaného signálu o frekvenci odpovídající střední frekvenci filtru vyrobí harmonický signál). Číslicové dělení frekvence se dnes realizuje snadno pomocí přednastavitelných čítačů.

Výstupní signál frekvenčních syntezátorů je harmonický, ale řada současných syntezátorů dává i trojúhelníkový, pilový (tj. nesouměrný trojúhelníkový) a obdélníkový signál. V důsledku přesnosti nastavení a stability frekvence umožňují frekvenční syntezátory zkoušení vlastností obvodů závislých na frekvenci nerealizovatelné jinými generátory. Používají se např. pro proměňování frekvenčních charakteristik obvodů.



# Frekvenční syntezátory, přímá číslicová syntéza

Přístroje využívající *přímé číslicové syntézy* (*direct digital synthesis, DDS*) generují výstupní signál pomocí frekvenčních děliček, násobiček (s pevnými násobícími koeficienty), směšovačů a pásmových propustí přímo ze signálu referenčního krystalového oscilátoru. Základní výhodou DDS je rychlost změny výstupní frekvence, nevýhodou je složitost obvodů a tedy vysoká cena.

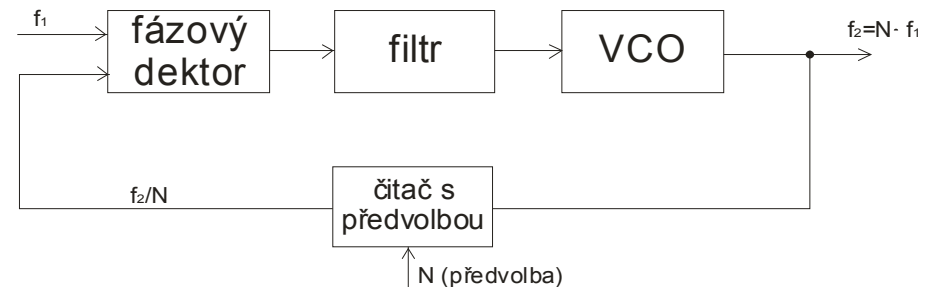


# Frekvenční syntezátory, nepřímá číslicová syntéza

*Nepřímá číslicová syntéza* používá pro generování výstupního signálu i obvodů *fázově vázaných smyček* (*phase-locked loop, PLL*). Obvody PLL umožňují násobení frekvencí s nastavitelným koeficientem a sčítání frekvencí. Jejich nevýhodou je pomalejší odezva než u přímé číslicové syntézy.

Výstupní frekvence  $f_2$  generovaná napětově řízeným oscilátorem je vydělena  $N$  pomocí integrované děličky frekvence. Výstupní frekvence děličky je porovnávána se vstupním signálem obvodu  $f_1$  ve fázovém detektoru, jehož výstupní signál je úměrný fázovému rozdílu obou signálů. Toto napětí je filtrováno a slouží jako řídicí napětí pro napětově řízený oscilátor. Platí  $f_1 - f_2/N \rightarrow 0$ , tak že  $f_2 = Nf_1$ .

Kombinací několika násobících a sčítacích smyček PLL se dosáhne možnosti zadávat číslicově frekvence ve velmi širokém rozsahu. Stabilita a přesnost výstupní



# Frekvenční syntezátory, nepřímá číslicová syntéza

frekvence je určena stabilitou a přesností použitého krystalového oscilátoru.

Frekvence frekvenčních syntezátorů se mohou nastavovat v rozsahu  $\mu\text{Hz}$  až  $\text{MHz}$ , stabilita frekvence bývá řádu  $10^{-7}/\text{měsíc}$ . Výstupní signál bývá harmonický, obdélníkový a v menším frekvenčním rozsahu i trojúhelníkový, pilový, případně i programovatelný („arbitrary“). Výstupní impedance bývá  $50 \Omega$ , generátory s frekvenční syntézou umožňují i amplitudovou, frekvenční a fázovou modulaci výstupu.

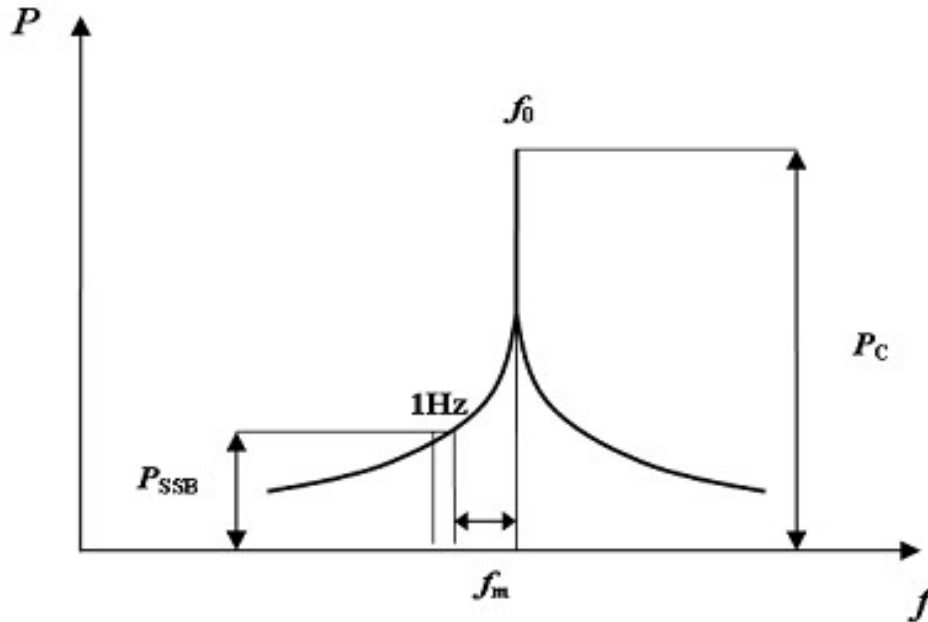
# Generátory signálů, hlavní parametry

---

Kmitočtový rozsah;  
dynamický rozsah;  
maximální výstupní výkon;  
doba přepnutí;  
SSB phase noise;  
modulace;  
výstupní impedance.



# Měření fázového šumu generátorů



$$L_{dB}(f_m) = 10 \cdot \log \frac{P_{SSB}}{P_C} \text{ [dBc/Hz]}$$

$$L_{dB}(f_m) = P_{SSB} - P_C - 10 \cdot \log BN \text{ [dBc/Hz]}$$

$P_{ssb}$  je výkon na offsetu  $f$  od nosné [dBm]

$P_C$  je výkon nosné [dBm]

$BN = 1,2 \cdot RBW$

# Literatura

---

- [1] HAASZ, V., ROZTOČIL, J., NOVÁK, J., *Číslicové měřicí systémy*. ČVUT, Praha 2000, ISBN 80-01-02219-6.
- [2] HAASZ, V. SEDLÁČEK, M., *Elektrická měření, Přístroje a metody*. ČVUT, Praha 2005, ISBN 80-01-02731-7.

# Děkuji Vám za pozornost

## Úkol za extra 1 bod navíc (100+1):

V laboratorních cvičeních budete používat arbitrary waveform generator Agilent 33220A. Nalezněte jiný generátor s lepšími vlastnostmi (vyšší generovaná frekvence), generátor musí mít komunikační port splňující protokol SCPI?

Své odpovědi zašlete spolu s uvedením zdrojem informace (nejlépe [www odkaz](#)) na níže uvedený email do **pá 7. 3. 2008 do 12:00**. První email, který může být vyhodnocován musí být zaslán nejdříve v **út 4. 3. 2008 20:00**. Hodnoceno bude prvních **10 různých odpovědí!!!!**

Ve své odpovědi dále uveďte, které vlastnosti má vámi doporučený generátor, lepší než zmíněný Agilent.



[drino@feec.vutbr.cz](mailto:drino@feec.vutbr.cz)