

Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

redakce nakladatelství BEN – technická literatura
redakce@ben.cz



- Stochastické (náhodné) signály jsou určeny pouze pravděpodobností, že v jistém časovém okamžiku dosáhnou zadané hodnoty. Zákonitosti, které určují jejich vlastnosti mají statistickou povahu a jsou vyšetřovány pomocí teorie náhodných procesů. Příkladem takových signálů jsou např. tepelná šumová napětí a proudy vznikající neuspořádaným pohybem elementárních nosičů proudu ve vodičích a v polovodičích.

Při řešení mnoha problémů v elektronice a v mechanice si klademe otázku, jak vyjádřit chování systému kombinací jednoduchých dějů. Matematicky to znamená, vyjádřit složitou funkci jako součet jednoduchých funkcí.

3.1 ČASOVÁ ZÁVISLOST PERIODICKÝCH SIGNÁLŮ

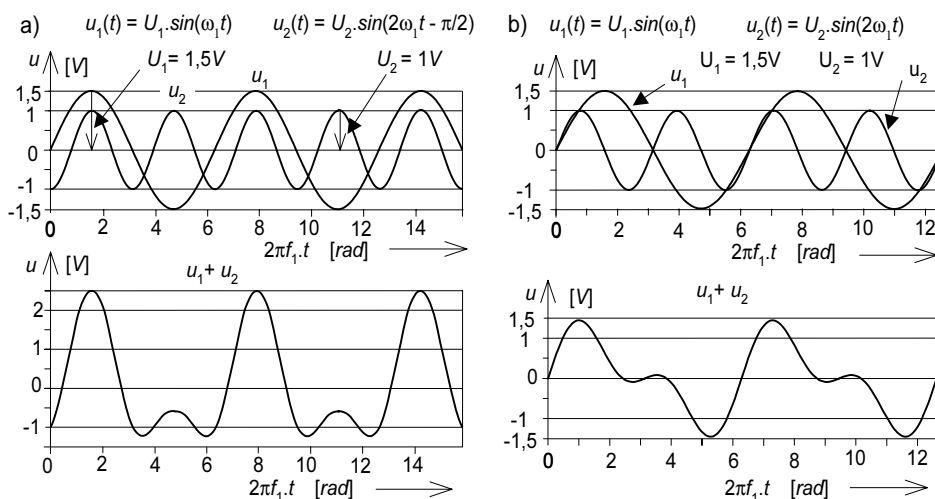
Při své analýze se často omezujeme na periodické funkce, které vyjadřují nejjednodušší typ elektrických signálů. Časovou závislost periodického signálu $s(t)$ popisujeme vztahem:

$$s(t) = s(t \pm kT), \quad (3.1.1)$$

kde

- k je celé číslo,
- T je perioda opakování signálu.

Periodickým signálem je každý sebesložitější tvar signálu, který se periodicky opakuje. Základním typem periodického signálu je harmonický signál.



Obr. 3.1.2

Příklad signálu vytvořeného součtem harmonických signálů o kmitočtech f_1 a $2f_1$ při různém vzájemném fázovém posuvu

Skládání periodických signálů z harmonických

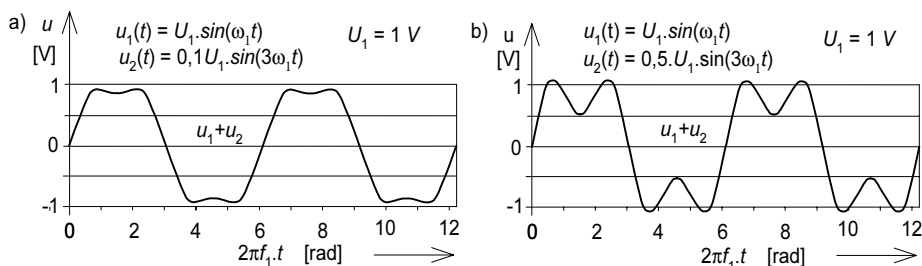
Obr. 3.1.2 znázorňuje vytvoření periodického signálu součtem harmonických signálů o kmitočtech ω_1 a $\omega_2 = 2\omega_1$.

Harmonická

- Signál o kmitočtu ω_1 [rad], případně f_1 [Hz], budeme nazývat první harmonická.
- Signál o kmitočtu $\omega_2 = 2 \cdot \omega_1$ [rad], případně $f_2 = 2 \cdot f_1$ [Hz], budeme nazývat druhá harmonická.
- Signál o kmitočtu $\omega_n = n \cdot \omega$ [rad], případně $f_n = n \cdot f_1$ [Hz], budeme nazývat n -tá harmonická.

Poměr amplitud U_2/U_1 první a druhé harmonické signálu podle obr. 3.1.2 je 2/3. Obrázek znázorňuje vliv vzájemného fázového posuvu harmonických signálů na průběh výsledného signálu.

Obr. 3.1.3 znázorňuje periodické signály vzniklé součtem první a třetí harmonické, počáteční fáze signálů jsou shodné, poměr amplitud na obr. 3.1.3a je $U_2/U_1 = 0,1$, na obr. 3.1.3b je poměr amplitud $U_2/U_1 = 0,5$.



Obr. 3.1.3

Příklad signálu tvořeného součtem harmonických signálů o kmitočtech f_1 a $3 \cdot f_1$, počáteční fáze signálů je shodná, poměr amplitud signálů na obr. a,b je různý

3.2 KMITOČTOVÁ ZÁVISLOST SIGNÁLŮ – SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA

3.2.1 Harmonické signály

Harmonický signál $s(t)$ popíšeme rovnicí:

$$s(t) = S_{\max} \cdot \sin(\omega_0 t + \theta_0) = S_{\max} \cdot \sin(2\pi f_0 t + \theta_0), \quad (3.2.1a)$$

případně

$$s(t) = S_{\max} \cdot \cos(\omega_0 t + \phi_0) = S_{\max} \cdot \cos(2\pi f_0 t + \phi_0), \quad (3.2.1b)$$

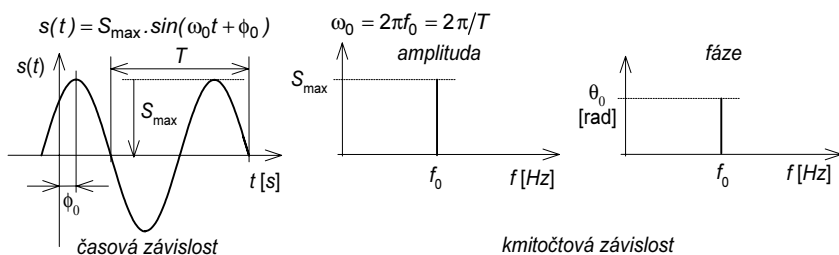
kde

S_{\max} je maximální hodnota, amplituda, funkce $s(t)$;

- ω je úhlový kmitočet [rad/s], $\omega = 2\pi \cdot f$;
- t průběžný čas sledování signálu;
- ω_0 kruhový kmitočet signálu [rad],
- f_0 kmitočet signálu [Hz];
- θ_0 počáteční fáze sinusového průběhu signálu v okamžiku $t = 0$ s;
- ϕ_0 počáteční fáze kosinusového průběhu signálu v okamžiku $t = 0$ s.

Vztahy (3.2.1) obsahují kromě proměnné, kterou je čas t , také konstantu f označující kmitočet a další konstantu θ_0 , případně ϕ_0 , označující počáteční fázi. Grafické znázornění časové závislosti harmonického signálu je uvedeno na obr. 3.2.1a. Obr. 3.2.1b a obr. 3.2.1c znázorňují kmitočtové závislosti harmonického signálu. Protože kmitočet a fáze signálu jsou při daném kmitočtu konstantní veličiny, jsou na kmitočtové ose znázorněny čarami.

Při znázornění v časové oblasti má harmonický signál časově spojitý průběh (obr. 3.2.1a), v kmitočtové oblasti je amplituda harmonického signálu znázorněna čarou o amplitudě S_{\max} (obr. 3.2.1b), fáze je v kmitočtové oblasti znázorněna čarou o velikosti ϕ_0 (obr. 3.2.1c).



Obr. 3.2.1
Znázornění časové a kmitočtové závislosti harmonického signálu

POZNÁMKA: Vztah (3.2.1a) je možné upravit do tvaru:

$$s(t) = S_{\max} \cdot \sin(2\pi f_0 t + \theta_0) = S_{\max} \cdot [\sin(2\pi f_0 t) \cdot \cos \theta_0 + \cos(2\pi f_0 t) \cdot \sin \theta_0]$$

Jelikož je fázový posuv θ_0 konstantní veličina, můžeme části výrazu s $\cos \theta_0$ a $\sin \theta_0$ vynásobené amplitudou S_{\max} nahradit konstantou a upravit vztah do tvaru:

$$s(t) = A \cdot \sin(2\pi f_0 t) + B \cdot \cos(2\pi f_0 t)$$

K obdobnému vztahu bychom došli úpravou rovnice (3.2.1b)

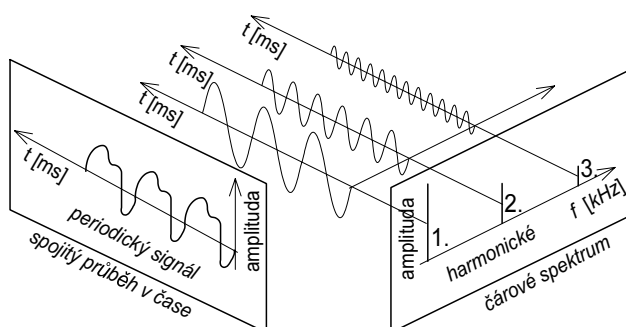
3.2.2 Spektrální analýza periodického signálu

Víme, že zvukový, případně obrazový, signál se mění nejen s časem, ale skládá se z velkého množství signálů o různých kmitočtech. Obsah jednotlivých kmitočtů v signálu určuje vlastnosti zvuku nebo obrazu. Obecně tyto signály nejsou periodické a obsahují prakticky spojitě kmitočtové spektrum v daném kmitočtovém rozsahu.

Z praktického důvodu je užitečné zabývat se sledováním periodických signálů, které je možné matematicky vyjádřit ve formě řady harmonických kmitočtů o různých amplitudách a případně i fázích.

Rozklad periodického signálu na harmonické složky

Princip rozkladu neharmonického periodického signálu na harmonické složky je znázorněn na obr. 3.2.2. Při rozkladu na harmonické složky nezískáme souvislé kmitočtové spektrum, ale tzv. čárové spektrum kmitočtů, ve kterém první čára vyjadřuje amplitudu 1. harmonické, druhá čára druhé harmonické atd., na časové ose mají jednotlivé harmonické spojitý harmonický průběh.



Obr. 3.2.2
Princip rozkladu signálu na harmonické složky

3.3 URČENÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK PERIODICKÉHO SIGNÁLU

3.3.1 Fourierovy řady

Fourierova transformace je matematický postup, který umožňuje vyjádřit spojitou periodickou funkci pomocí funkcí sinus a kosinus. Periodický signál libovolného tvaru můžeme rozložit na jednotlivé harmonické složky pomocí Fourierovy řady. Kmitočty harmonických složek jsou celistvými násobky kmitočtu periodického signálu. Harmonickou složku, která má kmitočet signálu, nazýváme 1. harmonická.

Periodický signál $s(t)$, který má periodu T můžeme rozložit na stejnosměrnou složku a_0 a na řadu sinusových a kosinusových složek pomocí vztahu (3.3.1). Stejnoseměrná složka a_0 vyjadřuje střední hodnotu signálu a u symetrických signálů vůči nule má nulovou hodnotu.



Jean Baptiste Joseph Fourier
(1768 ...1830)

$$s(t) = a_0 + a_1 \cdot \cos(\omega_1 t) + a_2 \cdot \cos(2\omega_1 t) + \dots + a_n \cdot \cos(n\omega_1 t) + b_1 \cdot \sin(\omega_1 t) + b_2 \cdot \sin(2\omega_1 t) + \dots + b_n \cdot \sin[n\omega_1 t], \quad (3.3.1)$$

kde

$\omega_1 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_1$ [rad], je kmitočet první harmonické signálu.

n je počet členů použitých k vyjádření funkce s požadovanou přesností;

a_0 je stejnosměrná složka signálu;

a_k, b_k jsou koeficienty určující amplitudy kosinových a sinusových složek.

Obecně má Fourierova řada nekonečné množství členů, výraz pro její výpočet potom je:

$$s(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cdot \cos(k \cdot \omega_1 t) + b_k \cdot \sin(k \cdot \omega_1 t)) \quad (3.3.2)$$

Koeficienty a_0, a_k a b_k určíme pomocí vztahů:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt \quad (\text{vztah pro výpočet střední hodnoty signálu}) \quad (3.3.3a)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cdot \cos(k \cdot \omega_1 t) dt \quad (3.3.3b)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cdot \sin(k \cdot \omega_1 t) dt \quad (3.3.3c)$$

Signál $s(t)$ můžeme rozložit přímo do jednotlivých harmonických složek obsahujících kromě násobku kmitočtu 1. harmonické také amplitudu a fázi.

Protože, $a_k = A_k \cdot \cos \theta_k$ a $b_k = A_k \cdot \sin \theta_k$,

kde

A_k je amplituda k -té harmonické složky a

θ_k je její fáze, můžeme vztahy (2.3.3) upravit na tvar:

$$s(t) = a_0 + 2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(k \cdot \omega_1 t + \theta_k) \quad (3.3.4)$$

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \theta_k = \arctg \frac{b_k}{a_k} \quad (3.3.4a)$$

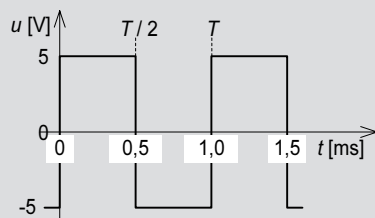
Použití Fourierovy řady si objasníme na příkladu 3.3.1:

Mějme periodický impulzní signál o kmitočtu 1 kHz ($T = 1$ ms), který je symetrický vzhledem k nulovému napětí, amplituda signálu je ± 5 V (obr. 3.3.1).

■ Odvodte a nakreslete průběhy uvedeného signálu, je-li jeho kmitočtové pásmo omezeno:

- do 25. harmonické kmitočtu impulzů
- do 5. harmonické kmitočtu impulzů.

- Nakreslete jeho spektrální charakteristiku do 25. harmonické základního kmitočtu.



$$\text{pro } 0 \leq t \leq T/2, U = 5 \text{ V}, \quad \text{pro } T/2 \leq t \leq T, U = -5 \text{ V}$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} 5 \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t) dt + \int_{T/2}^T (-5) \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t) dt$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} 5 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t) dt + \int_{T/2}^T (-5) \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t) dt$$

Obr. 3.3.1

Princip výpočtu koeficientů a_k a b_k pro impulzní průběh podle obrázku

Řešení:

a) Výpočet koeficientu a_0

Impulzní signál má v intervalu od $t = 0$ do $t = T/2$ hodnotu $s(t) = +5 \text{ V}$, v intervalu od $T/2$ do T hodnotu $s(t) = -5 \text{ V}$. Pro výpočet koeficientu a_0 použijeme vztah:

$$a_0 = \frac{1}{T} \left(\int_0^{T/2} 5 dt + \int_{T/2}^T (-5) dt \right) = \frac{1}{T} [5t]_0^{T/2} + \frac{1}{T} [-5t]_{T/2}^T = \frac{1}{T} \cdot 5 \cdot \frac{T}{2} + \frac{1}{T} \left[(-5) \cdot \left(T - \frac{T}{2} \right) \right] = 0$$

Tento výsledek odpovídá předpokladu, protože zadaná funkce je symetrická kolem nuly a proto má stejnosměrná složka nulovou hodnotu.

b) Výpočet koeficientů a_1, a_2, \dots

$$a_1 = \frac{2}{T} \left(\int_0^{T/2} 5 \cdot \text{cRs}(\omega_1 t) dt + \int_{T/2}^T (-5) \cdot \text{cRs}(\omega_1 t) dt \right) = \frac{2}{T} \cdot \left[\frac{5}{\omega_1} \cdot \text{sln}(\omega_1 t) \right]_0^{T/2} +$$

$$+ \frac{2}{T} \cdot \left[\left(\frac{-5}{\omega_1} \right) \cdot \text{sln}(\omega_1 t) \right]_{T/2}^T = \frac{5}{\pi} \cdot 0 + \frac{-5}{\pi} \cdot 0 = 0$$

$$a_2 = \frac{2}{T} \cdot \left(\int_0^{T/2} 5 \cdot \text{cRs}(2\omega_1 t) dt + \int_{T/2}^T (-5) \cdot \text{cRs}(2\omega_1 t) dt \right) = \frac{2}{T} \cdot \left[\frac{5}{2\omega_1} \cdot \text{sln}(2\omega_1 t) \right]_0^{T/2} +$$

$$+ \frac{2}{T} \cdot \left[\frac{-5}{2\omega_1} \cdot \text{sln}(2\omega_1 t) \right]_{T/2}^T = \frac{2}{T} \cdot \left(\frac{5}{2\omega_1} \cdot 0 \right) + \frac{2}{T} \cdot \left(\frac{-5}{2\omega_1} \cdot 0 \right) = 0$$

Kdybychom ve výpočtu koeficientů a_k , pokračovali, zjistili bychom, že jsou všechny nulové. Podíváme-li se na zadaný impulzní průběh, zjistíme, že **se jedná o lichou funkci**, to znamená, že se ve zvoleném okamžiku $t = 0$ mění funkce ze záporné do kladné hodnoty. Dalším příkladem liché funkce je např. funkce sinus.

Funkce kosinus je sudá funkce. Všechny koeficienty u sudé funkce (u kosinu) jsou v daném příkladu rovny nule. Nenulové budou koeficienty b_k u liché funkce sinus.

c) Výpočet koeficientů b_1, b_2, b_3, \dots

$$b_1 = \frac{2}{T} \cdot \left(\int_0^{T/2} 5 \cdot \sin(\omega_1 t) dt + \int_{T/2}^T (-5) \cdot \cos(\omega_1 t) dt \right) = \frac{2}{T} \cdot \left[-\frac{5}{\omega_1} \cdot \cos(\omega_1 t) \right]_0^{T/2} + \frac{2}{T} \cdot \left[-\frac{5}{\omega_1} \cdot \cos(\omega_1 t) \right]_{T/2}^T = \frac{4 \cdot 5}{\pi} \cong 6,37 \text{ V}$$

Koeficient b_1 má hodnotu $b_1 \cong 6,37 \text{ V}$, $b_1 = \frac{4}{\pi} \cdot 5 \text{ V}$

$$b_2 = \frac{2}{T} \cdot \left(\int_0^{T/2} 5 \cdot \sin(2\omega_1 t) dt + \int_{T/2}^T (-5) \cdot \cos(2\omega_1 t) dt \right) = \frac{2}{T} \cdot \left[-\frac{5}{2\omega_1} \cdot \cos(2\omega_1 t) \right]_0^{T/2} + \frac{2}{T} \cdot \left[-\frac{5}{2\omega_1} \cdot \cos(2\omega_1 t) \right]_{T/2}^T = 0$$

Koeficient $b_2 = 0$.

$$b_3 = \frac{2}{T} \cdot \left(\int_0^{T/2} 5 \cdot \sin(3\omega_1 t) dt + \int_{T/2}^T (-5) \cdot \cos(3\omega_1 t) dt \right) = \frac{2}{T} \cdot \left[-\frac{5}{3\omega_1} \cdot \cos(3\omega_1 t) \right]_0^{T/2} + \frac{2}{T} \cdot \left[-\frac{5}{3\omega_1} \cdot \cos(3\omega_1 t) \right]_{T/2}^T = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{5}{3} \cong 2,12 \text{ V}$$

Koeficient b_3 má hodnotu $b_3 \cong 2,12 \text{ V}$, $b_3 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{5}{3}$

Dalším výpočtem bychom zjistili, že všechny koeficienty b_k se sudým indexem k mají nulovou hodnotu, nenulové budou pouze liché koeficienty $b_{(2k-1)}$. Vztah pro funkci $s(t)$ popisující impulzní signál podle obr. 2.3.1 bude mít tvar:

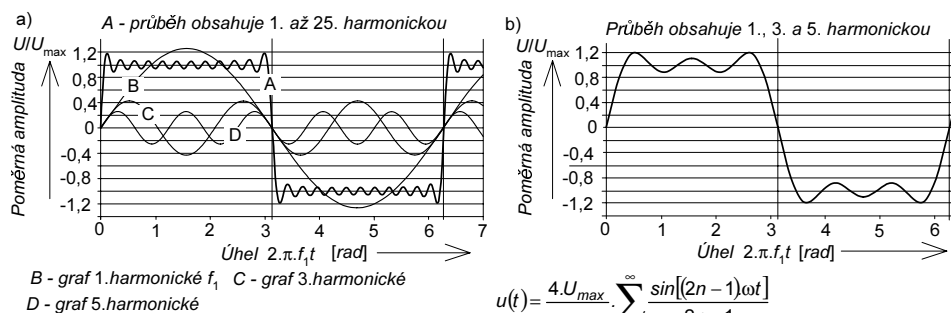
$$s(t) = \frac{4 \cdot 5}{\pi} \cdot \left(\sin(\omega_1 t) + \frac{\sin(3\omega_1 t)}{3} + \frac{\sin(5\omega_1 t)}{5} + \frac{\sin(7\omega_1 t)}{7} + \dots \right)$$

Uvedenou řadu můžeme zjednodušeně zapsat ve tvaru

$$s(t) = \frac{4 \cdot 5}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(2k-1)}{2k-1} \quad (3.3.5)$$

Obr. 3.3.2a znázorňuje tvar signálu vytvořeného z 1. až 25. harmonické podle vztahu (3.3.5). Na obr. 3.3.2b je průběh signálu složeného z 1., 3. a 5. harmonické. Je zřejmé, že se zvyšováním počtu harmonických se tvar signálu přibližuje k průběhu pravouhlého impulzu.

Obr. 3.3.3 znázorňuje část čárového kmitočtového spektra znázorňujícího velikosti amplitud harmonických od první do třicáté první harmonické. Na obrázku jsou také uvedeny vypočítané hodnoty amplitud znázorněných harmonických.

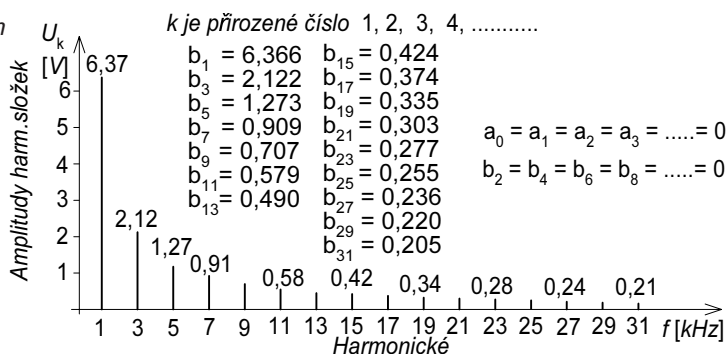


Obr. 3.3.2

Signál tvořený součtem harmonických podle vztahu pro impulzní signál

Obr. 3.3.3

Čárové spektrum harmonických kmitočtů pravoúhlého impulsu podle příkladu



Obecně můžeme konstatovat, že každý periodický signál lze vytvořit superpozicí (součtem) harmonických (sinusových a kosinusových) signálů o odpovídajících amplitudách.

V tab. 3.3.1 jsou uvedeny vztahy pro složení uvedených průběhů z harmonických signálů. Všimněme si, že signály symetrické klem nulové úrovně nemají stejnosměrnou složku, zatímco nesymetrické signály tuto složku obsahují. Signály, které mají průběh lichých funkcí, jsou složeny z harmonických vyjádřených násobkem funkce sinus, signály, které mají průběh sudých funkcí jsou vyjádřeny pomocí násobků funkcí kosinus.

3.3.2 Diskrétní Fourierova transformace a rychlá Fourierova transformace

Číslicové zpracování signálů proniká do všech oblastí techniky. To je umožněno významnými pokroky v teorii číslicového zpracování signálů a ve vysokém stupni rozvoje mikroelektroniky.

Diskrétní Fourierova transformace (DFT)

Při vzorkování analogového signálu pro jeho převod na číslicový signál získáme reálnou konečnou vstupní posloupnost vzorků x_i délky N . Jestliže považujeme takto definovanou funkci času za periodický průběh s periodou T , je možné z diskretních vzorků vypočítat diskretní vzorky kmitočtového spektra signálu a naopak je možné ze vzorků spektra určit odpovídající vzorky časového průběhu. V tom případě nahradíme vztahy (3.3.3a) až (3.3.3c) výrazy:

$$a_0 = \frac{1}{\rho} \cdot \sum_{m=1}^{\rho} x_m, \quad (3.3.5a)$$

$$a_k = \frac{2}{\rho} \cdot \sum_{m=1}^{\rho} x_m \cdot \cos(k \cdot \omega t), \quad (3.3.5b)$$

$$b_k = \frac{2}{\rho} \cdot \sum_{m=1}^{\rho} x_m \cdot \sin(k \cdot \omega t), \quad (3.3.5c)$$

kde

ρ je počet vzorků odebraných během periody signálu T,

x_m je velikost m-tého vzorku.

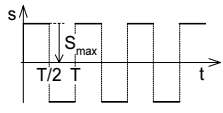
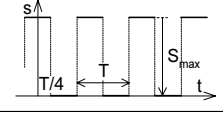
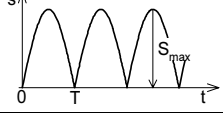
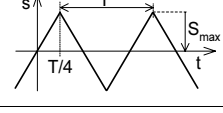
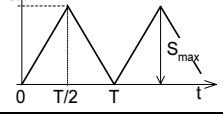
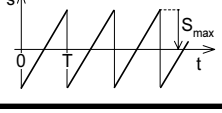
Rychlá Fourierova transformace (FFT – Fast Fourier Transform)

Rychlá Fourierova transformace je postup (algoritmus) pro zkrácený výpočet koeficientů DFT. Toto zkrácení je podstatné a umožňuje, že speciální mikroprocesory umožňují provádět u pomalejších signálů (např. řečových) spektrální analýzu v reálném čase.

Zkrácení je realizováno vhodným uspořádáním, které umožňuje, že výpočet vyžaduje podstatně méně aritmetických operací než u DFT a tedy i času k jejich provedení.

Výklad rychlé Fourierovy transformace přesahuje rozsah této učebnice.

Tab. 3.1
Příklady
signálů
a jejich
realizace
složením
harmonických

Tvar signálu	Vztah pro složení signálu z harmonických
	$s(t) = S_{max} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin[(2k-1) \cdot \omega t]}{k-1}$
	$s(t) = \frac{S_{max}}{2} + S_{max} \cdot \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \cdot \frac{\cos[(2k-1) \cdot \omega t]}{2k-1}$
	$s(t) = \frac{2S_{max}}{\pi} - S_{max} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k \cdot \omega t)}{(2k-1) \cdot (2k+1)}$
	$s(t) = S_{max} \cdot \frac{4}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin[(2k-1) \cdot \omega t]}{(2k-1)^2}$
	$s(t) = \frac{S_{max}}{2} - S_{max} \cdot \frac{4}{\pi^2} \cdot \sum_{k=1}^n \frac{\cos[(2k-1) \cdot \omega t]}{(2k-1)^2}$
	$s(t) = S_{max} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \cdot \frac{\sin(k \cdot \omega t)}{k}$

Kontrolní otázky

- a) *Vyjmenujte a definujte hlavní typy elektrických signálů.*
- b) *Napište a vysvětlete základní vztah pro vyjádření periodického signálu.*
- c) *Vysvětlete rozdíl mezi znázorněním harmonických signálů v časové a v kmitočtové oblasti.*
- d) *Vysvětlete pojmy první harmonická signálu, druhá a další harmonické.*
- e) *Vysvětlete princip rozkladu periodického neharmonického signálu na harmonické složky.*
- f) *Vysvětlete, co je to Fourierova řada, k čemu ji používáme, a napište vztahy pro výpočet koeficientů Fourierovy řady.*
- g) *Vysvětlete, co je to čárové spektrum, nakreslete čárové spektrum pro prvních 15 složek trojúhelníkového signálu symetrického vzhledem k nulové úrovni, signál má amplitudu $S_{max} = 3 \text{ V}$ a perioda $T = 1 \text{ ms}$. K výpočtu použijte vztah z tab. 3.1.*
- h) *Pomocí Fourierovy řady vypočítejte amplitudy harmonických složek jednocestně usměrněného sinusového signálu, je-li jeho kmitočet $f = 1 \text{ kHz}$, amplituda $U_m = 5 \text{ V}$ (u jednocestně usměrněného signálu je přenášena pouze kladná půlvlna signálu, při záporné půlperiodě je přenášen signál o nulové úrovni).*