

VYUŽITÍ MATLABU PRO ČÍSLICOVÉ ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU PŘI ZJIŠŤOVÁNÍ OKAMŽITÉ FREKVENCE SÍTĚ

Jan Blaška, Miloš Sedláček

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická, katedra měření

1. Úvod

Jak je všeobecně známo, frekvence elektrické sítě v České republice a v Evropě obecně je 50 Hz, v některých dalších významných oblastech světa (USA, Japonsko) je 60 Hz. To jsou ale jmenovité hodnoty této frekvence. Skutečná hodnota frekvence sítě závisí na nerovnováze množství do sítě dodávané energie a množství energie ze sítě odebírané a je tedy ve skutečnosti nepravidelně proměnná s časem, čili jde o tzv. nestacionární veličinu. Je-li množství odebírané energie výrazně vyšší než množství vyráběné a do sítě dodávané energie, okamžitá frekvence klesá a to může vést k závažným důsledkům. Výrobce energie, resp. její distributor proto musí sledovat okamžitou hodnotu frekvence a přizpůsobovat výrobu energie resp. spotřebu energie tak, aby kolísání frekvence bylo v předepsaných mezích.

Z hlediska měření je výhodné, že se v rozsáhlých sítích mění okamžitá frekvence pomalu (změny jsou v řádu 0,1 Hz/s, výjimečně 1 Hz/s), takže v řadě případů je možno považovat tuto frekvenci za veličinu kvazistacionární, čili nevýrazně se měnící během vzorkování části průběhu napětí (nebo proudu) potřebné pro další zpracování. To je způsobeno tím, že i při skokové změně spotřeby reaguje síť v důsledku velkých setrvačných hmot generátorů pomalu.

Frekvence f je definována jako počet opakování periodického děje za jednu sekundu a v soustavě SI je její jednotkou 1 Hz. Nepřímé měření frekvence spočívá ve změření doby periody T uvažovaného periodického děje a užití vztahu $f=1/T$.

Pokud se frekvence signálu mění s časem, nejde ale o periodický děj, takže nelze přímo použít uvedenou definici. Okamžitá frekvence nestacionárního harmonického signálu se pak definuje obvykle s využitím tzv. Hilbertovy transformace (viz např. [1]). Doplníme-li reálný (změřený) signál $x(t)$ imaginární částí $y(t)$ nalezenou jako Hilbertův obraz signálu $x(t)$, vytvoříme tak komplexní, tzv. analytický signál $z(t)$

$$z(t) = x(t) + j \cdot y(t) = z(t) e^{j\varphi(t)} \quad (1)$$

Pak je možno definovat okamžitou frekvenci (v Hz) vztahem

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d[\varphi(t)]}{dt} \quad (2)$$

O použití Hilbertovy transformaci a dalšího aparátu náročnějšího zpracování signálů jsme referovali v práci [2]. Je-li ale během odebírání vzorků potřebných k určení okamžité frekvence frekvence signálu prakticky konstantní, není nutné Hilbertovu transformaci používat a lze používat metody pro určování frekvence signálů periodických.

V loňském příspěvku na této konferenci [3] jsme popsali princip použití MATLABu a vybraných toolboxů pro měření nestacionárních veličin z obecného pohledu a uvedli jsme příklady výsledků pro některé vybrané metody. Tento příspěvek na loňskou práci navazuje a ukazuje příznivý vliv předběžné číslicové filtrace signálu před jeho dalším numerickým zpracováním u některých metod zjišťování okamžité frekvence. Analýza je zde navíc zaměřena na signály s vysokým zkreslením vyššími harmonickými složkami. Hodnoty tohoto zkreslení jsme převzali z mezinárodní normy [4]. Pro simulace byl použit základní MATLAB [5] a spolupracující toolbox Signal Processing [6]. Podrobná informace o výsledcích simulací je uvedena v příspěvku autorů na 11. Symposiumu IMEKO TC-4 (Trends in Electrical Measurement and Instrumentation) [7].

2. Způsob využití programu MATLAB a toolboxů pro simulace zkoumaných metod a předběžnou číslicovou filtraci signálu

Prostředí MATLAB [5] a Signal Processing Toolbox [6] jsme použili pro simulaci tří metod určování okamžité frekvence sítě, které na základě předchozích experimentů patří pro danou aplikaci k nejpřesnějším. Jde o klasickou metodu “zero-crossing” (ZCR), čili nepřímé měření frekvence pomocí určení doby periody signálu z časového odstupu dvou následujících průchodů nulou ve stejném směru, ale doplněnou předběžnou filtrací signálu (a označovanou dále ZCRF). Dále jde o metodu “integrated zero – crossing” (nepřímé měření frekvence s integrací signálu před určením jeho doby periody z průchodů nulou, označovanou dále IZC). Poslední ze zkoumaných přesných metod je metoda FFT s použitím okna Hann a interpolací ve frekvenční oblasti (označovaná dále IFFT), kde je frekvence signálu určena jako frekvence základní harmonické složky spektra, která v důsledku použití interpolace nemusí ležet na některé z hodnot mřížky FFT. Pro srovnání s některou z metod poskytujících odhad okamžité frekvence za dobu kratší než je perioda signálu jsme simulovali také metodu dynamického odhadu parametrů [8], označovanou dále DPE. Tato metoda používá jako model signálu sinusovku charakterizovanou amplitudou, frekvencí a fázovým posuvem, vyjádřenou jako součet sinusovky a kosinusovky s různými amplitudami, stejnou frekvencí a nulovými fázovými posuvy. Amplitudy obou složek a frekvence jsou iterativně zpřesňovány opakovaným řešením trojice lineárních rovnic, dokud se nedosáhne požadované přesnosti. Při vhodné volbě výchozí trojice parametrů je konvergence dosaženo už po třech iteracích. Z popsání principu je zřejmé, že tato metoda je velmi citlivá na zkreslení signálu.

Simulace byla provedena pro sinusový signál zkreslený vyššími harmonickými složkami až do padesáté s hodnotami amplitud danými výše zmíněnou normou [4], smíchaný s aditivním šumem pro hodnoty SNR v rozsahu 40 dB až 70 dB a pro frekvenční rozsah 48 Hz až 52 Hz. Ze zadané hodnoty SNR byl vypočítán koeficient, kterým je nutno vynásobit standardní normální šum generovaný MATLABem, abychom pro signál dané efektivní hodnoty získali požadovaný poměr signálu a šumu (v dB). Hodnoty některých vybraných harmonických složek podle [4] dosahují značných hodnot (v procentech základní harmonické je to např. 5 % pro 3. harmonickou, 6 % pro 5. harmonickou a 3,5 % pro 11. harmonickou), celkový činitel harmonického zkreslení je THD 8 %.

Aby mohla být simulace statisticky zpracována bylo nutno generovat signál opakovaně. Šum byl pro každé generování signálu přidáván k signálu s jinou počáteční podmínkou, ale se stejnými statistickými parametry (stejnou dispersí a nulovou střední hodnotou). Amplitudy harmonických složek byly dány normou [4]. Protože ale tato norma nezmiňuje fázový posuv jednotlivých harmonických složek, generovali jsme v souladu s doporučením směrnice pro určování nejistot měření [9] jednotlivé harmonické složky s rovnoměrně rozloženým fázovým posuvem v pásmu $\pm \pi$ (v měřítku příslušné harmonické). To se v MATLABu provede sekvencí příkazů (generovaná náhodná fáze je označena fihar)

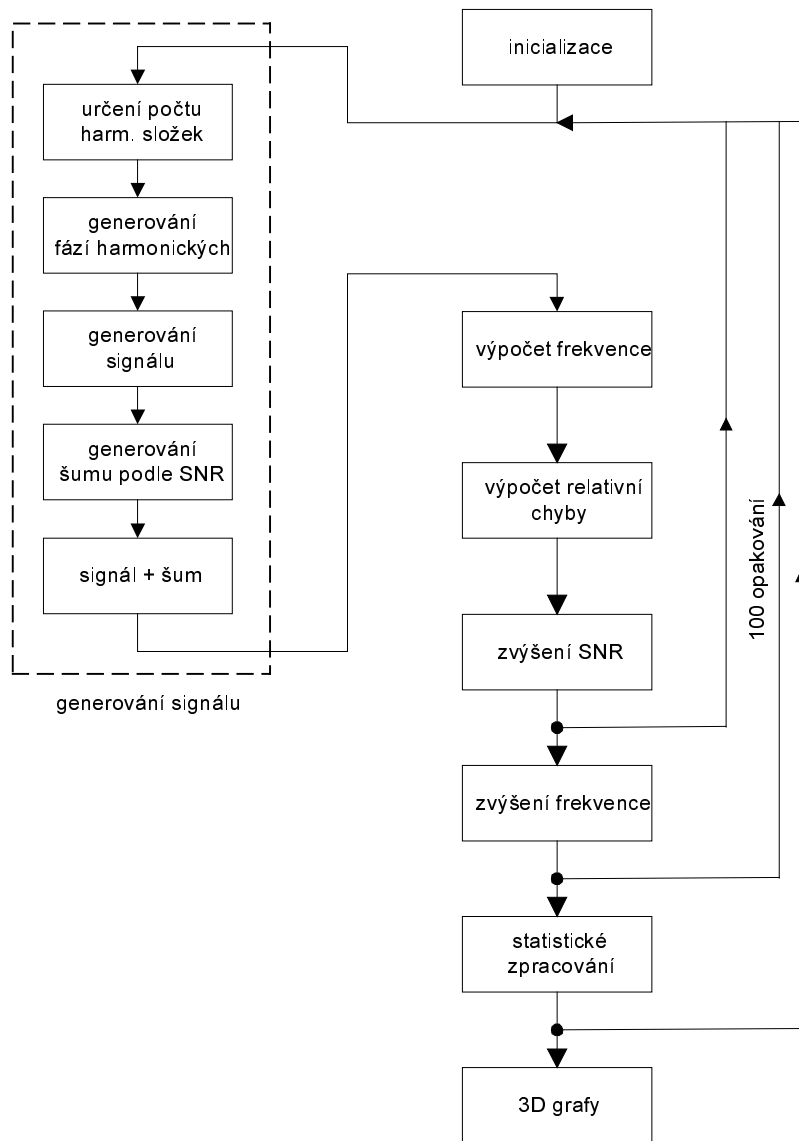
```
%rand('state',sum(100*clock));%nastaveny reprodukovatelně nahodne
faze
S=randn('state');
fihar=((rand(1,d_amphar)-.5)/.5)*pi;
fihar(1)=0;

vi=zeros(1,N);
for k=1:d_amphar,
    vi=vi+Amp*amphar(k)*sin(t*k*fb*2*pi+fihar(k)); %change of
fundamental frequency and harmonic
end
```

Protože jsme chtěli vyšetřit mj. vliv vzorkovací frekvence (počet vzorků na periodu signálu) na nejistotu měření, opakovali jsme simulace pro 16, 32, 64, 160 a 256 vzorků na periodu, což odpovídá při jmenovité frekvenci signálu 50 Hz vzorkovacím frekvencím 800 Hz, 1600 Hz, 3200 Hz, 8000 Hz a 12800 Hz.

Blokové schéma simulací je obdobné jako v předchozí práci [3], ale doplněné o předběžnou číslicovou filtraci digitalizovaného signálu a omezení počtu harmonických složek v signálu tak, aby nebyla porušena vzorkovací věta a nedošlo tak k aliasingu. Navíc byl k harmonickému signálu

přidáván nejen aditivní šum, ale také vyšší harmonické složky se zmíněným náhodným posuvem fáze, s omezeným počtem podle použité vzorkovací frekvence a amplitudami v procentech základní harmonické podle [4], přičemž celková efektivní hodnota signálu bez šumu a efektivní hodnota šumu byly určeny pro každou skupinu simulací tak, aby bylo dosaženo předepsaného poměru signál/šum v dB. Toto schéma uvádí obr.1



Obr.1 Blokové schéma simulačního programu

Výsledky těchto simulací jsou prezentovány obdobně jako ve [3] formou 3D grafů. Tentokrát jsme ale kreslili závislost rozšířené standardní nejistoty typu A (viz [9]) pro koeficient rozšíření rovný dvěma, čili v podstatě funkci 2 sigma:

$$2\sigma = f(f_I, \text{SNR}),$$

kde

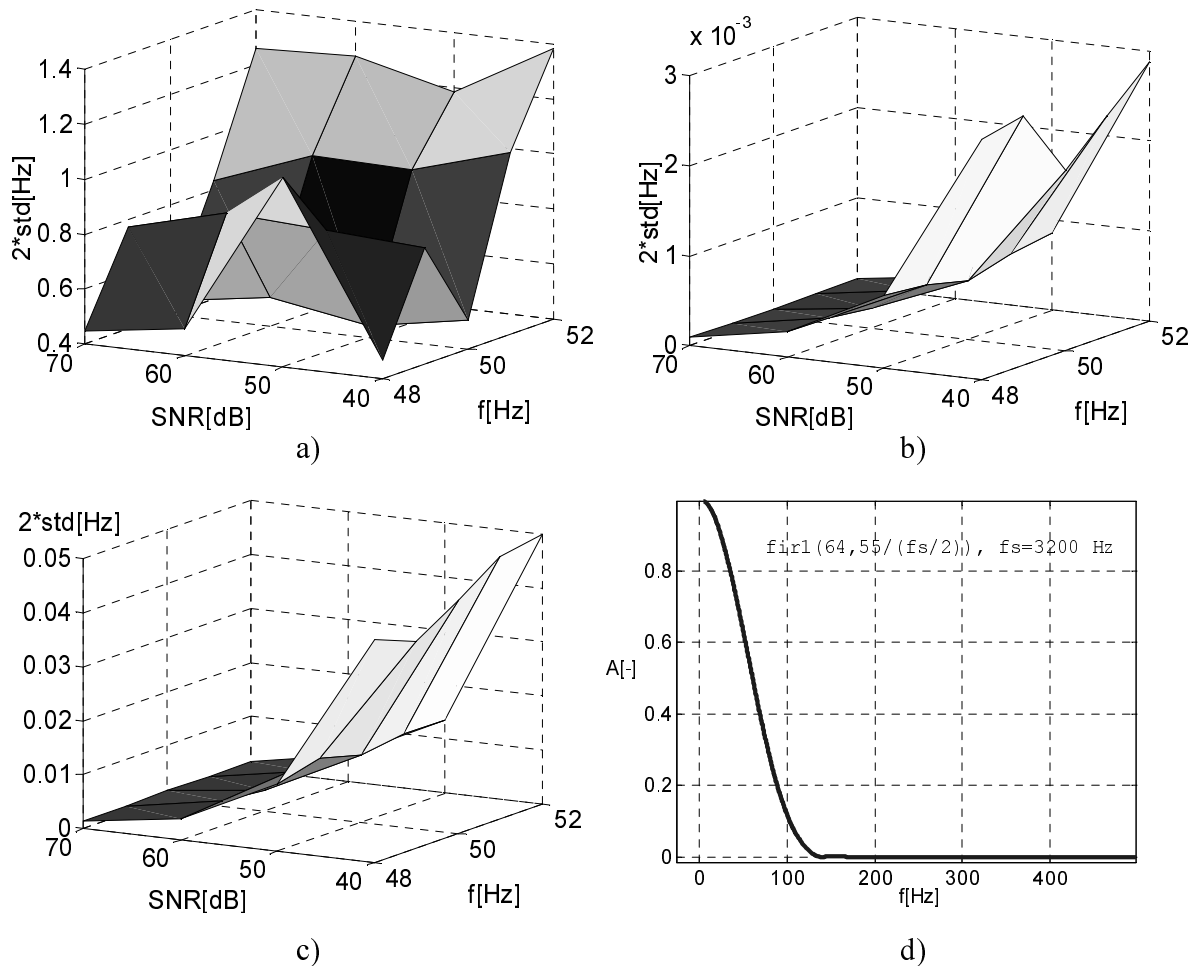
$$\sigma = \text{std}(f_M - f_I) \text{ (Hz)}.$$

Zde je f_M změřená okamžitá frekvence a f_I je skutečná hodnota okamžité frekvence. Funkce std (standardní odchylka) je funkcí MATLAB Signal Processing Toolbox.

Pro kreslení 3D grafů statistického zpracování byla použita funkce `pl3d` popsaná ve [3]. Pro generování vlastního grafu je použita funkce MATLABu `surf`.

3. Příklady výsledků simulace.

Výsledky simulací pro tři metody určování okamžité frekvence uvádí obr.2



Obr.2 Rozšířená standardní nejistota určování frekvence (a – metoda DPE, b – metoda IFFT, c – metoda ZCRF) a frekvenční charakteristika filtru použitého pro předběžnou filtraci signálu”

4. Závěr

Simulace popsané stručně v tomto příspěvku jsou další ukázkou toho, jak rozsáhlé jsou možnosti prostředí MATLAB a s ním spolupracujících toolboxů. I když naše aplikace využívá z toolboxů pouze velmi rozšířený Signal Processing Toolbox, v měření je možno výhodně používat i toolboxy další (např. Data Acquisition Toolbox, Wavelet Toolbox, Neural Network Toolbox, Image Processing Toolbox apod.).

V naší aplikaci byly simulovány vstupní signály včetně šumu a harmonických složek, číslicové filtry a jednotlivé měřicí algoritmy. K prezentaci byly využity 3D grafy s volitelnou barevnou stupnicí. Použitím poměrně velkého množství opakovaných měření (zde ve většině případů sto opakování) lze získat rozumný soubor hodnot pro statistické zpracování. Tímto způsobem je možno pohodlně vyšetřovat vliv různých ovlivňujících veličin jak pro jednotlivé ovlivňující veličiny se zvolenou hodnotou, tak pro současně působících více ovlivňujících veličin. V posledním případě je v numerickém výpočtu implicitně zahrnuta i případná korelovanost některých veličin, kterou je jinak velmi obtížné v obecném případě zpracovat explicitně matematicky.

Jak je zkušenějším uživatelům MATLABu známo, napsáním programu tak, aby byla většina operací prováděna s maticemi (případně vektory), lze proti algoritmu počítanému s využitím klasických cyklů ("if...then" resp. „while“) pracujících s jednotlivými hodnotami dosáhnout velmi podstatného zrychlení výpočtu (např. o jeden až dva řády).

Poděkování

Příspěvek byl zpracován v rámci výzkumného záměru číslo J04/98:210000015 na ČVUT v Praze, podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] J. Jan: Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálu. Vysoké učení technické, Brno, 1997
- [2] J. Blaška, M. Sedláček: Use of Integral Transforms for Estimation of Instantaneous Frequency, Proc. of MEASUREMENT 2001 (3rd Int. Conference, Smolenice Castle, Slovak Republic, May 14-17, 2001), pp.406-409
- [3] J. Blaška, M. Sedláček: Využití MATLABu pro hodnocení metod měření nestacionárních veličin, sb. Konference MATLAB 2000, str. 43 – 47, HUMUSOFT/Vydavatelství VŠCHT, Praha, listopad 2000
- [4] IEC 61000-2-2, Electromagnetic Compatibility, Part.2 – Environment, Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-frequency conducted disturbances. IEC, Switzerland, 1990
- [5] MATLAB The Language of Technical Computing, Using MATLAB, Version 5, MathWorks, Inc., Natick, MA, USA, 1998
- [6] Signal Processing Toolbox For Use with MATLAB, User's Guide, MathWorks, Inc., Natick, MA, USA, 1998
- [7] J. Blaška, M. Sedláček: Estimation of Power-Line Frequency with low Uncertainty for high harmonic Distortion of Signals, Proc. of 11th IMEKO TC-4 Symposium- Trends in Electrical Measurement and Instrumentation and 6th Euro Workshop on ADC Modelling and Testing, September 13-14, 2001, IST – Lisbon, Portugal, in press
- [8] R. Micheletti, "Real-Time Measurement of Power System Frequency", in *Proc. of IMEKO XVI World Congress*, Vienna, 2000, vol. III
- [9] Guide to Expression of Uncertainty in Measurements, International Organization for Standardization, Switzerland, 1993
- [10] J. Blaška, M. Sedláček: Measurement of the Instantaneous Signal Frequency using Zero-Crossing methods, In: Proc. of the Conference Applied Electronics 2001, str.27-30,, ZČU Plzeň, září 2001

Kontaktní adresa: Ing. Jan Blaška, Doc. Ing. Miloš Sedláček, CSc.

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra měření,
Technická 2, 166 27 Praha 6. Tel: (+420 2)2435 2177, fax: (+420 2) 311 9929
E-mail: xblaska@feld.cvut.cz, sedlaceM@feld.cvut.cz