

# VYUŽITÍ MATLABu PRO HODNOCENÍ METOD MĚŘENÍ NESTACIONÁRNÍCH VELIČIN

*Jan Blaška, Miloš Sedláček*

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická, katedra měření

## 1. Úvod

Jednou z oblastí výzkumu katedry měření ČVUT FEL je v poslední době měření nestacionárních elektrických veličin. Jde o veličiny, jejichž některý parametr (případně několik parametrů) se mění s časem. Veličiny tohoto typu se v průmyslu vyskytují stále častěji. Příkladem mohou být průběhy napětí a proudů v obvodech pro elektronickou regulaci výkonu zátěže, např. v tramvajích a trolejbusích s tyristorovou výstrojí nebo v pohonech využívajících pulsně-šifkovou modulaci.

Důležitou veličinou, která by v ideálním případě měla být na čase nezávislá, je frekvence elektrické sítě. Její jmenovitá hodnota (50 Hz resp. 60 Hz) se ale ve skutečnosti mění v závislosti na nerovnováze množství do sítě dodávané energie a množství energie odebírané. Je-li množství odebírané energie (práce) vyšší než množství vyráběné a do sítě dodávané energie, okamžitá frekvence klesá a to může vést k závažným důsledkům (v extrémních případech i k rezonanci lopatek turbíny turbogenerátoru a následné možnosti havárie [1]). Proto je nutno změny frekvence detekovat a operativně měnit množství dodávané energie. Rychlost změny frekvence a velikost těchto změn závisí na rozsáhlosti sítě. Nerovnováha globální sítě se projevuje v pomalých změnách, protože mohutné elektromechanické generátory mají velkou mechanickou setrvačnost. Rychlost změny bývá v řádu 0,1 Hz/s, v případě havarijních stavů řádu Hz/s. V lokálních sítích zásobovaných z autonomních motorgenerátorů mohou být ovšem změny rychlejší.

Frekvence  $f$  je počet opakování periodického děje za jednu sekundu. Často se měří nepřímým měřením doby periody  $T$  a určí se ze vztahu  $f=1/T$ . Doba periody se určuje nejčastěji jako čas mezi dvěma následnými průchody napětí nulovou úrovní s kladnou derivací.

Pokud se frekvence signálu mění s časem, nejde o periodický signál. Okamžitá frekvence nestacionárního harmonického signálu  $u(t)=U_m(t)\cdot\sin(\omega(t)t+\varphi(t))$  je pak definována jako  $f_i=(1/(2\pi))(\omega(t)+d\varphi(t)/dt)$ . V trojfázových soustavách je okamžitá kruhová frekvence  $\omega_i$  definována jako okamžitá úhlová rychlost prostorového fázoru systému. Doplňme-li reálný (změřený) signál  $x(t)$  imaginární částí  $y(t)$  nalezenou jako Hilbertův obraz signálu  $x(t)$ , vytvoříme tak tzv. analytický signál  $z(t)=x(t)+j\cdot y(t)=z(t)e^{j\varphi(t)}$ . Pak je možno definovat okamžitou frekvenci jako  $\omega_i(t)=d[\varphi(t)]/dt$  (v rad/s), resp.  $f_i(t)=(1/(2\pi)) d[\varphi(t)]/dt$  (v Hz).

Naše analýza je zaměřena na porovnání řady metod určování okamžité frekvence sítě popsanych v literatuře. Změny této frekvence jsou pomalé (pod 1 Hz/s v normálním provozu a pod 5 Hz/s při havarijních stavech). Z toho důvodu je pro měření okamžité frekvence možné použít i některé metody pro měření stacionárních signálů (např. FFT s použitím datového okna a interpolace ve frekvenční oblasti).

Nástrojem, který jsme použili jak pro simulace, tak pro některá měření  $f_i$  byl MATLAB [2] a spolupracující toolboxy Signal Processing [3] a Data Acquisition [4].

## 2. Způsob využití programu MATLAB a toolboxů pro simulaci a měření

Prostředím MATLAB [2] a toolboxů Signal Processing [3] a Data Acquisition [4] jsme použili pro simulaci osmi metod určování okamžité frekvence sítě. Výsledky simulací i odkazy na prameny popisující jednotlivé ověřované metody jsme publikovali na XVI. světovém kongresu IMEKO [5]. Simulace byla provedena pro sinusový signál smíchaný s aditivním šumem pro hodnoty SNR v rozsahu 30 dB až 70 dB a pro frekvenční rozsah 49

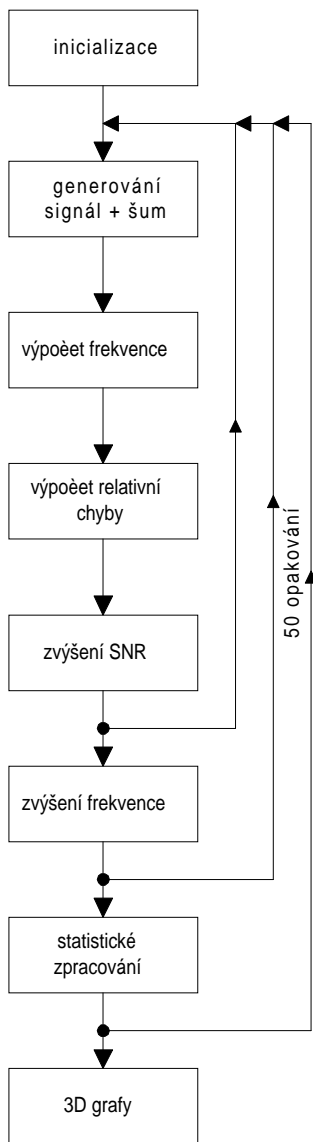
Hz až 51 Hz. Byl použit šum s normálním rozložením. Ze zadané hodnoty SNR byl vypočítán koeficient sigma

$$\sigma = 1 / (\sqrt{2} * 10^{(SNR/20)})$$

a tímto koeficientem pak byl vynásoben vygenerovaný šum s rovnoměrným rozdělením, tak abychom dostali úroveň šumu odpovídající požadovanému SRN:

$$vn = \text{randn}(1, N) * \sigma.$$

Aby mohla být simulace statisticky zpracována bylo zapotřebí provést několikanásobné generování šumu a signálu (signál jsme generovali padesátkrát).



Obr.1 Blokové schéma první části simulačního programu

Výsledky těchto simulací jsou presentovány formou 3D grafů funkcí

$$3\sigma = f(f_I, SNR),$$

kde

$$\sigma = \text{std}((f_M - f_I) / f_I * 100) \quad (\%).$$

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 jsme vytvořili funkci `pl3d`. Tato funkce vykreslí grafy středních chyb  $\varepsilon$  (zde nejsou reprodukovány) a nejistoty měření  $3\sigma$ . Pro generování vlastního grafu je použita funkce MATLABu `surf`.

```
pl3d(1,mean(erMZCR,3),fvec,SNRvec,3*std(erMZCRs,0,3));
```

```
function pl3d(k,errMat,fvec,SNRvec,errMats)
    figure(2*k-1);
    surf(SNRvec,fvec,errMat);
    axis([SNRvec(1) SNRvec(length(SNRvec)) fvec(1)
    fvec(length(fvec))]);
    colormap('hsv');
    view(34,14);
    set(gca,'FontSize',14);
    xlabel('SNR[dB]','FontSize',14);
    ylabel('f[Hz]','FontSize',14);
    zlabel('\epsilon[%]','FontSize',14);
    title('a','FontSize',16);

    figure(2*k);
    surf(SNRvec,fvec,errMats);
    axis([SNRvec(1) SNRvec(length(SNRvec)) fvec(1)
    fvec(length(fvec))]);
    colormap('hsv');
    view(34,14);
    set(gca,'FontSize',14);
    xlabel('SNR[dB]','FontSize',14);
    ylabel('f[Hz]','FontSize',14);
    zlabel('3\sigma[%]','FontSize',14);
    title('b','FontSize',16);
```

Vedle uvedených simulací vlivu aditivního šumu jsme simulovali také vliv vyšších harmonických složek ve spektru signálu na chybu jednotlivých metod. Aby byla simulace odrazem reálného stavu, použili jsme pro simulaci průměry hodnot naměřených na několika rozvodných stanicích energetické sítě na Moravě [6]. Nezanedbatelné byly pouze liché harmonické složky a jejich řád a velikost byly následující: 3. : 0.5%, 5. : 2%, 7. : 1%, 9.: 0.25% a 11. : 0.25%. Tato simulace byla provedena pro rozmítaný signál (obdobně jako základní harmonická byly rozmítány i všechny uvedené harmonické složky); pro generování rozmítaného signálu byla využita funkce `chirp`. Výsledky této simulace byly prezentovány formou 2D grafů funkce

$$\varepsilon = f(f_i)$$

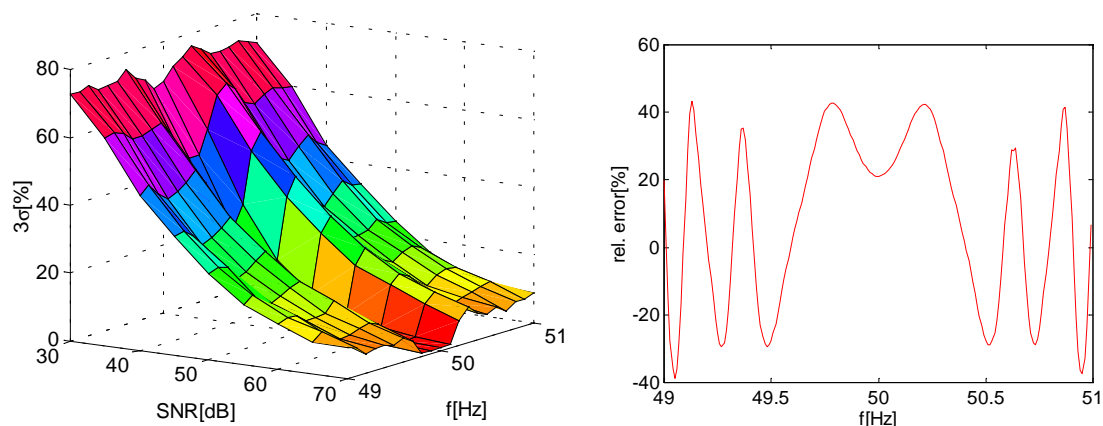
V části 3 jsou hodnoty  $\varepsilon$  na svislé ose označeny “rel. error”.

### 3. Příklady výsledků

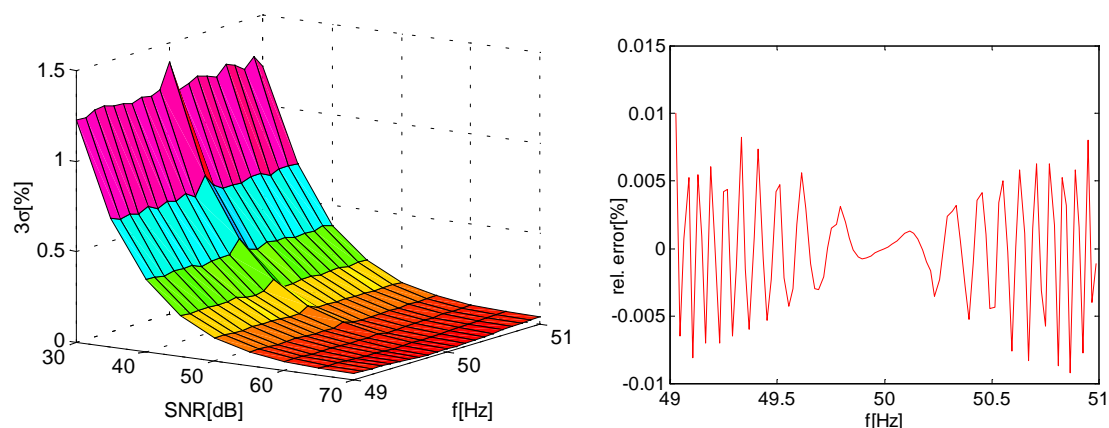
Úplný přehled výsledků popsaných simulací osmi různých metod uvádí práce [5]. V práci [7] jsou uvedeny výsledky měření okamžité frekvence metodou dle [8] a pomocí STFT [9].

Signál byl ovzorkována zásuvnou kartou do PC s dvanáctibitovým AD převodníkem (karta PCI-6023E firmy Analog Devices). Výpočet byl proveden jednak signálovým procesorem ADSP-2181 firmy Analog Devices, jednak v MATLABu s využitím Data Acquisition Systems.

Zde uvedeme jako příklady simulací výsledky pro metodu tří následujících vzorků [8], klasickou metodu nepřímého měření pomocí průchodů nulou (metoda ZCR) a metodu IZC (integrated zero-crossing, [10]).



Obr. 2 Výsledky simulace metody [8] (počet zpracovaných vzorků: 1000, vzorkovací frekvence: 1 kHz, 3D graf: 50 opakování měření).

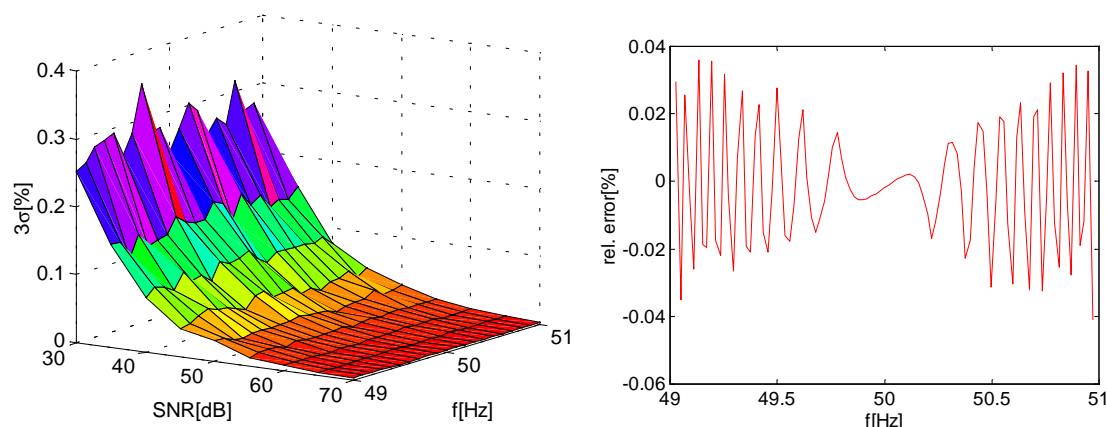


Obr. 3 Výsledky simulace metody nepřímého měření frekvence z doby mezi sousedními průchody nulovou úrovní signálu se stejným znaménkem derivace (metoda ZCR, počet zpracovaných vzorků: 1000, vzorkovací frekvence: 1 kHz, 3D graf: 50 měření).

#### 4. Závěr

MATLAB a s ním spolupracující toolboxy představují mimořádně vhodný nástroj pro simulace různých měřicích metod využívajících algoritmy číslicového zpracování signálu. Umožňuje simulovat jak vstupní signály, tak použité algoritmy. Rozsáhlé možnosti grafického výstupu umožňují prezentovat výsledky simulací formou 2D a 3D grafů nejen černobíle, ale i s volitelnou barevnou stupnicí. Uživatel tak získá velmi dobrou představu o možnostech zkoumaných metod a citlivosti těchto metod na vyšetřované vlivy.

MATLAB navíc umožňuje jednoduše změřit i dobu výpočtu jednotlivých kroků i celého algoritmu. I když jsme tato měření také provedli, jejich výsledky jsme neuváděli v [5] a neuvádíme je ani zde. Důvodem je skutečnost, že doba výpočtu závisí podstatně na zkušenosti programátora a na použité hardwarové platformě. Zpracovává-li se signál i při reálném měření



Obr. 4 Výsledky simulace metody nepřímého měření frekvence z doby mezi sousedními průchody nulovou úrovní signálu se stejným znaménkem derivace po předchozí integraci signálu (metoda IZC, počet zpracovaných vzorků: 1024, vzorkovací frekvence: 20 kHz a 50 měření (3D graf), vzorkovací frekvence 1kHz(2D graf)).

v MATLABu, je velmi důležité napsat program tak, aby byla většina operací prováděna s maticemi (případně vektory). Proti algoritmu počítanému s využitím klasických cyklů ("if...then" resp. „while“) pracujících s jednotlivými hodnotami se tak dá dosáhnout velmi podstatného zrychlení výpočtu (např. o jeden až dva řády). Doba výpočtu většiny námi ověřovaných algoritmů pro 1000 zpracovávaných vzorků byla přibližně 1 ms.

### Poděkování

Tato práce byla prováděna v rámci výzkumného záměru číslo J04/98:210000015 na ČVUT v Praze, podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

### Literatura

- [1] T. S. Sidhu: Accurate Measurement of Power System Frequency Using a Digital Signal Processing Technique, *IEEE Trans. on Inst. and Meas.* 1 (48), 1999, p193.75-81
- [2] MATLAB The Language of Technical Computing, Using MATLAB, Version 5, MathWorks, Inc., Natick, MA, USA, 1998
- [3] Signal Processing Toolbox For Use with MATLAB, User's Guide, MathWorks, Inc., Natick, MA, USA, 1998
- [4] Data Acquisition Toolbox For Use with MATLAB, User's Guide, MathWorks, Inc., Natick, MA, USA, 1999
- [5] V. Bacmutsky, J. Blaška, M. Sedláček: Methods of Finding Actual Signal Period Time, Proc. of IMEKO 2000, XVI IMEKO World Congress, Sept. 2000, Vienna, Austria, vol. IX, str. 243-248
- [6] Doc. Ing. J. Tlustý, CSc., ČVUT FEL, katedra elektroenergetiky. Ústní sdělení.
- [7] J. Blaška, M. Sedláček: Use of Digital Signal Processor for Measurement of the Instantaneous Signal Frequency, In: Proc. of the Conference Applied Electronics 2000, str.23-26, ZČU Plzeň, září 2000 (ISBN: 80-7082-650-9).
- [8] M. K. Mahmood, J. E. Allons, M. A. H. Abdul-Karim, Microprocessor Implementation of a Fast and Simultaneous Amplitude and Frequency Detector for Sinusoidal Signals, *IEEE Trans. on Inst. and Meas.* 3 (34), 1985, p.413-417
- [9] J. Blaška, M. Sedláček, M. Titěra, A Simple DSP/PC System for Nonstationary Signal Analysis, in *Proc. of IMEKO XV World Congress*, June 1999, Osaka, Japan, vol. IV, p.167-174
- [10] V. Backmutsky, V. Zmuzdikov, A. Agizim, G. Vaisman, A new DSP method for precise dynamic measurement of the actual power-line frequency and its data acquisition applications, *Measurement*, 18, (1996), p.169-176

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](mailto:xblaska@feld.cvut.cz), [sedlaceM@feld.cvut.cz](mailto:sedlaceM@feld.cvut.cz)