

# Měření harmonických do 9 kHz analyzátozem BK-ELCOM

Ing. Petr Bilík, Ph.D., Elcom, a. s.,  
Ing. Gustav Hrudka, Ph.D., Elcom, a. s.

## Úvod

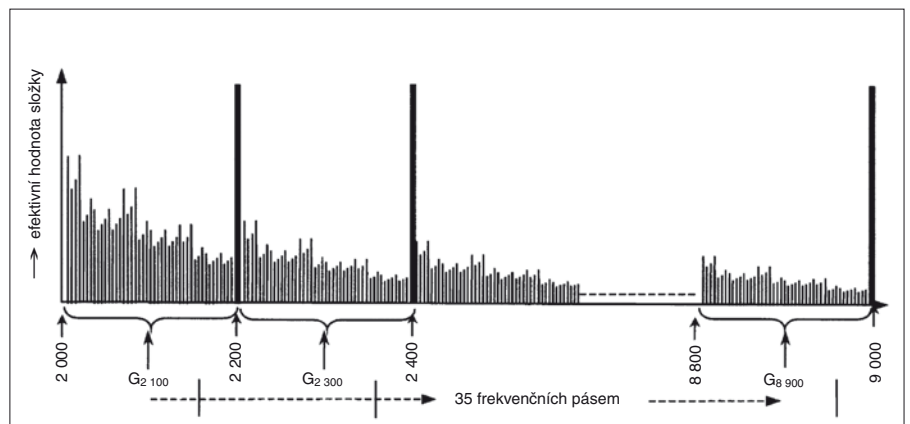
Ve srovnání s běžnými jednoúčelovými analyzátozem kvality napětí poskytují analyzátozem BK-ELCOM uživatelům výrazně větší možnosti a širší rozsah funkcí pro komplexní analýzu napájecích sítí. Analyzátozem kvality napětí BK-ELCOM používají techniku měřících přístrojů na bázi osobního počítače. Velká flexibilita tohoto řešení, používaného všemi významnými výrobci měřící techniky, umožňuje v případě potřeby snadno a rychle modifikovat pouze část přístroje, jako je např. A/D převodník nebo firmware, tak, aby se vlastnosti původního řešení upravily přesně podle potřeb uživatele přístroje a zbytek přístroje zůstal beze změn. Snadnou změnou firmwaru je možné u analyzátozem napájecích sítí BK-ELCOM dosáhnout odlišné funkčnosti přístroje. Změnou modulárního hardwaru, např. A/D převodníku, lze analyzovat signály s větší frekvencí nebo nízkou amplitudou. V případě potřeby lze modifikovat hardware i firmware současně. V každém případě je však modifikace neporovnatelně snazší, a tedy i levnější ve srovnání s jednoúčelovými analyzátozem kvality napětí. V dalším textu je popsán příklad snadné modifikace analyzátozem pro měření harmonických napětí, proudů a výkonů do frekvence 9 kHz.

## Obecný popis problematiky

Zatímco běžné analyzátozem kvality napětí vyhodnocují harmonické do 1 250 Hz (25. harmonická), a to často pouze pro napěťové signály, analyzátozem BK-ELCOM vyhodnocují harmonické i mezharmnické do 2 500 Hz (50. harmonická) pro napětí, proud, činný výkon a jalový výkon. Vydání ČSN EN 61000-4-7 ed. 2:2003 (Elektromagnetická kompatibilita – Část 4-7: Zkušební a měřící technika – Všeobecná směrnice o měření a měřících přístrojích harmonických a mezharmnických pro rozvodné sítě a zařízení připojovaná do nich) přineslo řadu změn ve vyhodnocování harmonických složek a další změny přinesl doplněk A1, který byl nově vydán v červnu 2008 jako IEC 61000-4-7 A1 ed. 2 [1]. Pouhou úpravou firmwaru analyzátozem BK-ELCOM byl rozšířen frekvenční rozsah pro všechny uvedené veličiny do 9 kHz, jak je popsáno v [1]. V dalším textu jsou uváděny informace z nejaktuálnějšího vydání IEC 61000-4-7 A1 ed. 2 z roku 2008 [1], které bude později vydáno jako ČSN.

V příloze B [1] je uvedena řada informací k měření nad rozsahem frekvencí harmonických až do 9 kHz. V příloze B [1] se frekvencí harmonických rozumí frekvence do 40. harmonické základní harmonické, tedy do 2 000 Hz pro napájecí síť 50 Hz. Příloha B [1] se zabývá složkami v signá-

Střední frekvence první možné skupiny je 2,1 kHz, další střední frekvence skupin jsou 2,3 a 2,5 kHz a poslední střední frekvence skupiny je 8,9 kHz (obr. 1). První frekvenční pásmo se středem na 2,1 kHz zahrnuje spektrální čáry o frekvencích 2 005 Hz, 2 010 až 2 200 Hz.



Obr. 1. Frekvenční pásma pro měření v rozsahu 2 až 9 kHz pro základní harmonickou 50 Hz

lech napětí a proudů s frekvencí nad 2 kHz, ale současně pod horní mezní frekvenci nízkofrekvenčního rozsahu, tedy do 9 kHz. Tyto složky jsou způsobeny různými jevy, jako jsou např. výkonová napájení s pulzně šířkovou modulací, signály v síti, výkonové měniče apod.

Požadované základní vyhodnocovací okno má šířku 200 ms. Výsledkem aplikace DFT (*Discrete Fourier Transformation*, diskretní Fourierova transformace) je frekvenční spektrum s krokem 5 Hz, což znamená celkem 1 800 spektrálních čar pro frekvenční rozsah do 9 kHz. Protože však není vyžadováno vysoké rozlišení ve frekvenční oblasti, je podobně jako pro harmonické složky potřeba seskupit energii analyzovaného signálu ve frekvenční oblasti do definovaných frekvenčních pásem. Pro frekvence do 2 kHz (nazývané harmonické) je šířka pásma 50 Hz, a tedy z výstupu DFT s krokem 5 Hz je seskupováním vytvořeno spektrum s krokem 50 Hz. Pro frekvence 2 až 9 kHz se požaduje šířka pásma 200 Hz, která se z původního spektra s krokem 5 Hz vytvoří opět seskupováním podle vztahu:

$$Y_{B,b} = \sqrt{\sum_{f=b-95\text{ Hz}}^{b+100\text{ Hz}} Y_{CF}^2}$$

## Nároky na měřící přístroj

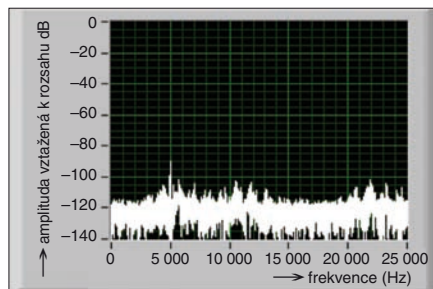
Vzorkovací frekvence analyzátozem musí být taková, aby mohly být měřeny frekvenční složky až do 9 kHz včetně. Rovněž frekvenční rozsah vnějších čidel napětí a proudů musí být vhodný pro měření až do 9 kHz. Podle přílohy B [1] se pro tento typ analýzy nemusí adaptovat vzorkovací frekvence vzhledem k frekvenci napájecí sítě. Důvodem je, že frekvenční složky pro frekvence 2 až 9 kHz nejsou svázány s frekvencí sítě, ale jsou obvykle způsobeny polovodičovými spínači s vlastní spínací frekvencí.

Má-li přístroj správně vyhodnocovat složky až do 9 kHz, je pro stanovení vzorkovací frekvence nutné nejen vyjít ze vzorkovací věty (Shannonova-Kotělnikova věta), ale i brát v úvahu vlastnosti reálného antialiasing (vyhlazovacího) filtru. Antialiasing filtr je analogový filtr typu dolní propust, který musí zeslabit frekvenční složky nad polovinou vzorkovací frekvence tak, aby jejich amplituda byla menší než LSB (*Least Significant Bit*, nejméně významný bit) A/D převodníku. Současně frekvence řezu antialiasing filtru musí být zvolena tak, aby amplituda nejvyšší měřené složky, v tomto případě 9 kHz, nebyla ovlivněna. Z uvedeného je zřejmé, že minimální vzorkovací frekvence je ovlivně-

na šířkou slova A/D převodníku (ovlivňuje váhu LSB) a typem a řádem antialiasing filtru (ovlivňuje strmost útlumu). Aby byl na konci tohoto odstavce učiněn alespoň velmi obecný závěr, je nutné konstatovat, že vzorkovací frekvence pro účely měření harmonických složek do 9 kHz musí být alespoň 25 kS/s (*Samples per Second*, vzorků za sekundu).

V příloze B [1] se uvádí, že očekávaná amplituda měřených složek v pásmu 2 až 9 kHz je od  $2 \cdot 10^{-5}$  relativně vztažena k amplitudě základní harmonické – to odpovídá 0,002 % amplitudy základní harmonické nebo, jinak vyjádřeno, úrovni -94 dB. V souvislosti s potřebou správně měřit složky s velmi nízkou amplitudou příloha B [1] zmiňuje použití pásmové zádrže, která by zeslabilu amplitudu základní harmonické 50 Hz. Zeslabení amplitudy základní harmonické by však znemožnilo současnou analýzu harmonických (frekvence 50 Hz až 2 kHz) současně se složkami s frekvencí v pásmu 2 až 9 kHz. Důležitým faktorem pro rozhodování o použití pásmové propusti je šířka slova A/D převodníku, která ovlivňuje dynamický rozsah měřených signálů, a tedy amplitudu nejmenší-největší měřitelné složky periodického signálu.

Amplituda nejmenší měřitelné složky periodického signálu je ovlivněna řadou faktorů,



Obr. 2. Frekvenční spektrum signálu naměřeného převodníkovou kartou s rozlišením A/D převodníku 16 bitů

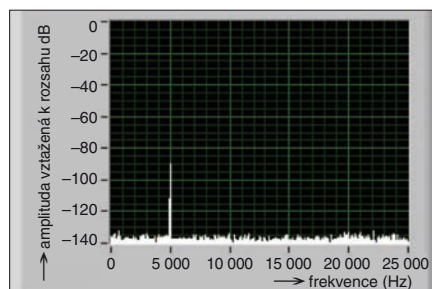
kde mezi nejznámější patří kvantizační šum A/D převodníku. Náplní tohoto příspěvku však není podrobný rozbor této problematiky. Pro ilustraci je na obr. 2 zobrazeno vyhodnocené spektrum sinusového signálu s efektivní hodnotou 178  $\mu$ V o frekvenci 5 kHz, který je připojen přímo na vstup 16bitové převodníkové karty PCI6220 se vstupním rozsahem  $\pm 10$  V a vzorkovací frekvencí 50 kHz. Úroveň signálu 5 kHz vztažená k rozsahu karty je -92 dB FS (*Full Scale*, plný rozsah).

Ve skutečném přístroji je mezi A/D převodníkem a vstupními svorkami přístroje mnoho elektronických obvodů (zesilovače, filtry atd.), které mají negativní vliv na úroveň šumu. Digitální obvody, spínané zdroje a další elektronika, která přímo nesouvisí se vstupními obvody, avšak nachází se v blízkosti A/D převodníku, přispívá rovněž k nárůstu šumu. Lze tedy konstatovat, že na obr. 2, kde je úroveň šumu až -100 dB, je uveden „mělý“ ideální stav a skutečnost bude vždy jen horší,

a to až o desítky dB v závislosti na konkrétní konstrukci přístroje. Nevhodná konstrukce přístroje může naprosto znehodnotit vlastnosti A/D převodníku.

### Realizace analyzátoru frekvenčních složek do 9 kHz

Vzhledem k očekávané nízké amplitudě (-94 dB) měřených složek v pásmu 2 až 9 kHz, podle přílohy B [1], je zapotřebí nejen použít A/D převodník s dostatečnou šířkou slova, ale současně i zabezpečit velmi nízkou úroveň systémového šumu vhodnou konstrukcí celého přístroje. Technika použitá pro konstrukci analyzátoru BK-ELCOM, model ENA450, využívá 24bitové A/D převodníky v modulech pro přímé měření napětí do  $\pm 424$  V a ta-



Obr. 3. Frekvenční spektrum signálu naměřeného napětovým vstupním modulem analyzátoru ENA450 s integrovaným A/D převodníkem s rozlišením 24 bitů

ké v modulech pro nepřímé měření proudů prostřednictvím proudových kleští.

Podobným způsobem, jako byla otestována samotná převodníková karta, byl otestován napětový vstupní modul s rozsahem  $\pm 424$  V při vzorkovací frekvenci 50 kHz. Test zahrnoval veškeré analogové obvody od vstupních svorek po A/D převodník. Na vstup modulu byl přiveden sinusový signál s efektivní hodnotou 10 mV o frekvenci 5 kHz, což vztaženo k plnému rozsahu modulu představuje opět -92 dB FS. Z výsledku testu (obr. 3) je zřejmé, že úroveň šumu celého vstupního obvodu se nachází pod -130 dB, a lze tedy s velkou rezervou korektně analyzovat měřené složky s velmi nízkou amplitudou. Pro přiblížení velikosti dynamického rozsahu vstupního modulu analyzátoru ENA450 – jde o schopnost korektně analyzovat frekvenční složky o amplitudě od 0,2 mV při vstupním rozsahu  $\pm 424$  V v celém pásmu DC až 9 kHz.

Firmware analyzátoru BK-ELCOM, model ENA450, byl modifikován tak, aby harmonické do 2 kHz byly seskupovány do podskupiny harmonických jako na běžném analyzátoru kvality napětí podle [2] (vzdálenost mezi spektrálními čarami 50 Hz) a aby harmonické v pásmu 2 až 9 kHz byly seskupovány podle přílohy B [1] (vzdálenost mezi spektrálními čarami 200 Hz). ENA450 tak současně poskytuje spektrum pro veličiny  $U$ ,  $I$ ,  $P$  a  $Q$  v pásmu 50 Hz až 9 kHz. Vzhle-

dem ke vzorkovací frekvenci 50 kS/s na každém kanále není problém v případě potřeby poskytnout spektra do více než dvojnásobku frekvence požadované v příloze B [1]. Pro korektní vyhodnocení proudů a výkonů je nutné znát a firmwarem korigovat amplitudově-frekvenční a fázově-frekvenční cha-



Obr. 4. Vzhled analyzátoru BK-ELCOM, model ENA450

rakteristiky použitých kleští v celém rozsahu měřených harmonických složek.

### Praktické výsledky

Pro měření na fotovoltaické elektrárně byl použit analyzátor BK-ELCOM, model ENA450, s firmwarem pro analýzu frekvenčních složek do 9 kHz.

Technická specifikace ENA450:

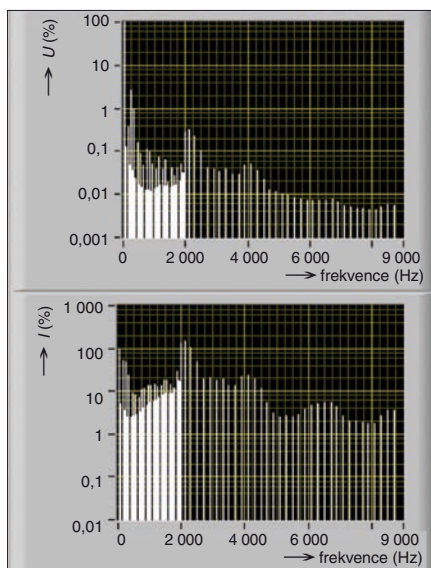
- 3x galvanicky oddělené napětové vstupy  $\pm 424$  V,
- 4x proudové vstupy prostřednictvím proudových kleští,
- simultánní vzorkování (každý  $U$  a  $I$  vstup má vlastní A/D převodník),
- rozlišení A/D převodníku 24 bitů,
- maximální vzorkovací frekvence každého vstupu 50 kHz,
- žádné točivé části,
- příkon 8 V·A,
- pracovní teplota 40 až +70 °C,
- rozměry 88 x 180 x 90 mm (v x š x h),
- hmotnost 1,3 kg.

Měřená fotovoltaická elektrárna používá inventory s dále uvedenými parametry:

- napětí 220 až 240 V,
- frekvence 50 nebo 60 Hz,
- jmenovitý výkon 2,3 kW,
- THDi (*Total Harmonic Distortion – current*, celkové harmonické zkreslení proudu) <4 %.

Měření probíhalo kontinuálně po dobu deseti dnů v srpnu 2008. Analyzátor ENA450 byl připojen na třífázovou síť v rozváděči s elektroměrem příslušejícím fotovoltaické elektrárně. Po dobu měření byl použit desetiminutový agregační interval a byly vyhodnocovány a ukládány tyto veličiny: efektivní hodnoty  $U$  a  $I$ , výkony  $P$ ,  $Q$  a  $S$ , THDu, THDi, spektrum do 9 kHz pro  $U$ ,  $I$ ,  $P$  a  $Q$ .

Tento příspěvek se nezabývá problematikou fotovoltaických elektráren, a proto zde není uveden výkon elektrárny v závislosti na



Obr. 5. Nejméně příznivé frekvenční spektrum  $U$  a  $I$ , čas 7.00 h,  $P = -8$  W,  $S = 205$  V·A,  $I = 0,9$  A

intenzitě slunečního svitu, ale cílem měření bylo zjistit obsah harmonických na napětí a prouděch v souvislosti s přílohou B [1]. Na obr. 5 jsou uvedeny nehorší a nejpříznivější desetiminutová spektra  $U$  (obr. 5a) a  $I$  (obr. 5b) vždy pro jedinou fázi, která se vyskytla během desetidenního měření.

Obr. 5 zobrazuje stav v 7.00 h ráno, kdy fotovoltaická elektrárna ještě nedodávala výkon do sítě. Spektrum proudu vykazuje vysoký obsah vyšších harmonických, a i přes nízkou efektivní hodnotu proudu došlo k výraznému zvýšení obsahu harmonických i pro napětí.

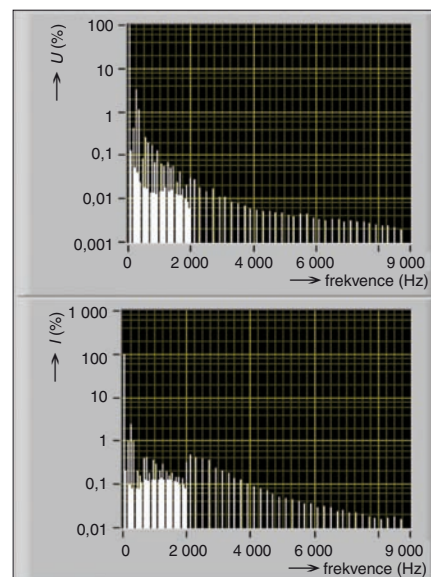
Na obr. 6 je znázorněn stav ve 14.00 h odpoledne, kdy fotovoltaická elektrárna dodávala na jedné fázi výkon přibližně 2 kW do

sítě. Spektrum proudu (obr. 6b) má ve srovnání s obr. 5 výrazně menší obsah vyšších harmonických a rovněž napěťové spektrum (obr. 6a) má menší obsah harmonických. Při srovnání THD vyhodnoceného podle [1] do 40. harmonické a THD vyhodnoceného z celého vyhodnocovaného frekvenčního pásma do 9 kHz lze zjistit značné rozdíly, které jsou závislé na charakteru signálu.

Například pro frekvenční spektrum proudu na obr. 5 je THDi do 40. harmonické 98 % a THDi do 9 kHz 254 %.

### Závěr

Tento článek se zabýval dosud poměrně opomíjenou problematikou měření frekvenčních složek v pásmu 2 až 9 kHz. Měření frekvenčního pásma 2 až 9 kHz začíná nabývat na významu s přibývajícím počtem elektronicky řízených spotřebičů a s rostoucím instalovaným výkonem distribuovaných zdrojů energie, ve kterých se nacházejí invertory. Co se měřicí techniky týká, lze konstatovat, že běžné jednoúčelové analyzátoři kvality toto frekvenční pásmo ignorují. Z uvedeného technického rozboru je patrné, že nároky na přístroj měřící frekvenční složky v pásmu 2 až 9 kHz s velmi nízkou amplitudou jsou větší, než je obvyklé pro běžné analyzátoři kvality napětí, a že samotná informace o šířce slova A/D převodníku bez uvedení informací o systémovém šumu celého přístroje je naprosto nedostačující. V článku bylo uvedeno, jak lze pouhou modifikací firmwaru upravit analyzátor kvality napětí ENA450 pro měření harmonických v pásmu 50 Hz až 9 kHz. S modifikovaným analyzátořem ENA450 bylo provedeno měření v praxi.



Obr. 6. Nejlepší frekvenční spektrum  $U$  a  $I$ , čas 14.00 h,  $P = 2,19$  kW,  $S = 2,20$  kV·A,  $I = 9,4$  A

### Literatura:

- [1] IEC 61000-4-7 A1 ed. 2:2008 *Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.*
- [2] ČSN EN 61000-4-30:2003 *Zkušební a měřicí technika – Metody měření kvality energie.*

Další informace mohou zájemci získat na adrese:

**ELCOM, a. s.**  
 Na Větrově 34  
 142 00 Praha 4  
<http://www.elcom.cz>



Odborná sekce Energetické rušení pořádá

## VIII. ODBORNOU KONFERENCI ERU 2008



**Termín:** 27. až 28. listopadu 2008

**Místo:** Hotel Santon, Brno

**Téma:** Harmonické, kolísání napětí, nesymetrie a impulsní rušení

**Odborný garant:** Ing. Ctibor Petřů, CSc. ([ctibor.petru@elcom.cz](mailto:ctibor.petru@elcom.cz))

**Tajemník konference:** Ing. Vladimír Korenc ([vladimir.korenc@elcom.cz](mailto:vladimir.korenc@elcom.cz))

### Program:

Na konferenci bude šest tematických bloků. Sborníky s jednotlivými příspěvky, včetně dalších zajímavých informací, budou součástí CD-ROM ERU 2008. Tento CD-ROM bude účastníkům konference rozeslán s předstihem před termínem konání konference. Vlastní příspěvky budou prezentovány pouze ve svodném referátu, který přednese garant bloku. Autorům příspěvku budou předloženy pouze otázky do diskuse. Většina času bude určena zajímavostem, diskusím a odpovědím na otázky z praxe.

Konference bude provázena odbornou výstavou renomovaných firem pracujících v oblasti výroby kompenzačních rozváděčů, výkonových kondenzátorů, regulátorů jalového výkonu, aktivních filtrů, odrušovacích prvků, měřicí techniky atd.

Další informace mohou zájemci získat na adrese organizačního garanta konference:

**ELCOM, a. s., Hudcova 76, 612 48 Brno**

**Eva Špačková**

**mobil: 602 889 041, tel.: +420 544 500 310**

**e-mail: [eva.spackova@elcom.cz](mailto:eva.spackova@elcom.cz), <http://www.eru-konference.cz>**