Техничко решење: Метода одређивања хармоника из псеудохармоника

Руководилац пројекта: Владимир Вујичић
Одговорно лице: Владимир Вујичић
Аутори: Борис Антић, Сенка Бајчета, Драган Пејић, Небојша Пјевалица, Зоран Митровић, Иван Жупунски
Развијено: у оквиру пројекта технолошког развоја ТР-32019 и покрајинског пројекта 114-451-2723.
Година: 2011.
Примена: 10.12.2011.

Кратак опис

Извршено је унапређење методе за мерење великог броја хармоника у току једне периоде које омогућава да се опсег фреквенција мереног сигнала прошири и ван уског опсега који је дефинисан локалним осцилатором мерног инструмента.
Проблем мерења хармонијског садржаја мрежног напона постаје све важнији како се користи све већи број уређаја који уносе више хармонике и увођења норме EN50160 која дефинише границе дозвољеног хармонијског изобличења.
Конструкција мерних уређаја значајно се упрошћава користећи претпоставку да је фреквенција мрежне учестаности веома стабилна и да мало одступа од прописане. У таквим случајевима може да се користи локални осцилатор у мерном уређају и да се избегне синхронизација са мрежном учестаношћу. Пошто генерисана фреквенција из локалног осцилатора одступа од мрежне фреквенције, хармоници сигнала који су добијени таквим мерним инструментом су уствари псеудохармоници, тј. хармоници сигнала претпостављене фреквенције која је изведена из локалног осцилатора.
Метода одређивања хармоника из псеудохармоника која је предмет овог техничког решења даје поступак којим се из добијених псеудохармоника добијају стварни хармоници мереног сигнала.

Реализатори:
Факултет техничких наука у Новом Саду

Корисници:
ФТН као произвођач. Могућ је пренос технологије према свим заинтересованим фирмама.

Подтип решења:
Нова метода (М 85)

Стање у свету

Постоје два могућа приступа проблему мерења амплитуда хармоника мрежног напона. Први приступ базиран је на претпоставци да је основна учестаност мрежног напона познат параметар који је увек у уским границама око своје номиналне вредности. Овај приступ омогућава коришћење простог, брзог, јефтиног и поузданог хардвера за мерење параметара мреже. Ово је случај у скоро свим применама које се базирају на дискретној или брзој Фуријеовој трансформацији код којих се претпоставља да је фреквенција првог хармоника мрежне учестаности непроменљива. Кад се фреквенција првог хармоника мрежне учестаности разликује од номиналне вредности, уколико инструмент не може да се прилагоди промењеној учестаности, јавља се грешка.

Резултат таквог мерења нису више хармоници улазног сигнала, већ псеудохармоници који садрже грешку и по амплитуди и по позицији на оси фреквенције. Обрадом оваквих сигнала (псеудохармоника), уз релативно сложене алгоритме који захтевају значајно време обраде и сложен хардвер може се добити спектар стварног сигнала.

Други приступ мерењу подразумева налажење коефицијената развоја у тригонометријски полином континуалног сигнала над мерним интервалом коришћењем технике дитеровања која омогућава релативно прост хардвер и обезбеђује корекцију грешке квантизације А/Д конвертора.

Основна претпоставка за мерење хармонијског садржаја овом методом је да су услови у мрежи стабилни током мерног интервала, што је у већини случајева тако. Може се такође претпоставити да мрежна учестаност одступа од номиналне. За овај случај развијена је метода која из псеудохармоника одређује хармонике. Ова метода је знатно простија, поузданија и бржа од било које познате методе која је базирана на претпоставци о непознатој фреквенцији.

Метода одређивања хармоника

Метода се базира на новом резултату који је откривен током развоја уређаја за мерење мрежних параметара: матрица која пресликава векторе стварних хармоника у векторе псеудохармоника који су добијени мерењем има тенденцију да се њени елементи групишу око главне дијагонале. Ова особина омогућава примену веома ефикасног алгоритма за брзо решавање великог система линеарних једначина. Овом методом може се потпуно елиминисати грешка услед варијација фреквенције, а цео прорачун може да се изврши током једне периоде мереног сигнала. Опсег примене је широк и обухвата скоро све случајеве мерења хармонијског садржаја у пракси. Пошто захтева изузетно прост хардвер, лако може да се имплементира у постојеће инструменте.

Приликом конструкције уређаја за мерење хармонијског садржаја обично се претпоставља да су напон и струја периодични сигнали основне учестаности f_0 и одговарајуће периоде T_0. У стварности основна фреквенција се мења са променом струје (мада остаје близу основне учестаности). Због овога реални сигнали нису периодични, већ „скоро“ периодични и због тога за њих не постоји стандардна Фуријеова репрезентација. На срећу, ове промене фреквенције су веома споре, па због тога можемо да сматрамо да се током мерног интервала фреквенција сигнала не мења и да износи $f = f_0 + \Delta f$. Користећи развој у тригонометријски ред:

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{M} \left(a_k \cos 2\pi fkt + b_k \sin 2\pi fkt \right)$$

где су an и bn коефицијенти полинома и M је ред највишег хармоника који одговара изабраном ε.

Под претпоставком да не постоји једносмерна компонента, фактор изобличења THD може се израчунати коришћењем:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{M} \left(a_k^2 + b_k^2 \right)}}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}$$

Да бисмо урачунали и проблем промене фреквенције, нека је

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{f_0 + \Delta f_0} \neq T_0$$

најмања периода који одговара стварној основној учестаности f. Коефицијенти an и bn се поклапају са Фуријеовим коефицијентима сигнала y(t) и могу да се представе у интегралној форми

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T y(t)\cos\frac{2\pi nt}{T}\,dt \quad , \; n = 0, \ldots, M$$

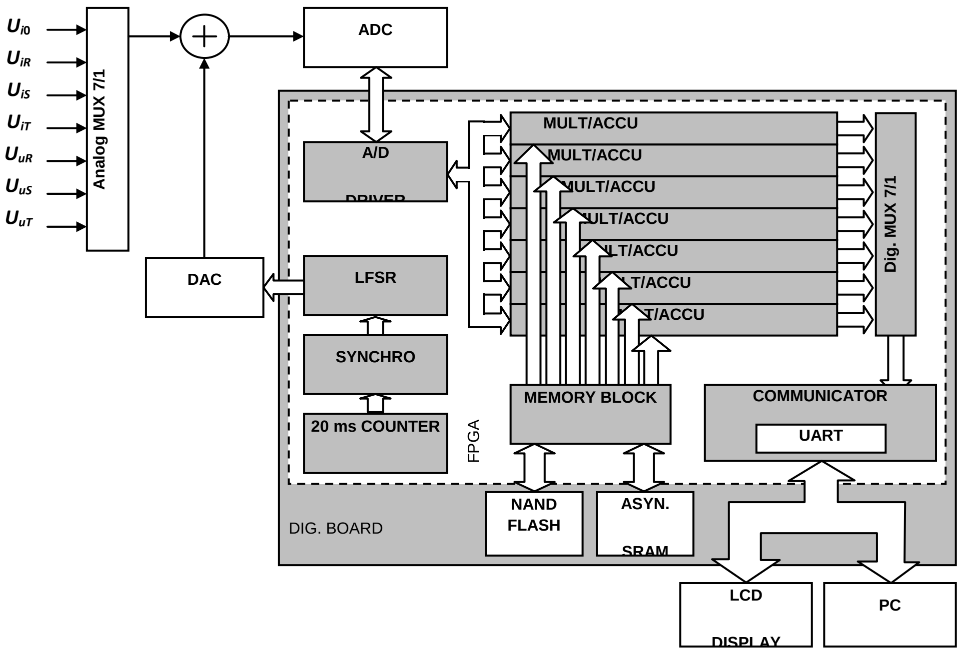
$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T y(t)\sin\frac{2\pi nt}{T}\,dt \quad , \; n = 0, ..., M$$

Неадаптивни инструмент који мери сигнал y(t) са периодом T уз претпоставку да је T једнак T0 ће генерисати псеудохармонике:

$$\hat{a}_n = \frac{2}{T_0}\int_0^{T_0} y(t)\cos\frac{2\pi nt}{T_0}\,dt \quad , \; n = 0, ..., M$$

$$\hat{b}_n = \frac{2}{T_0}\int_0^{T_0} y(t)\sin\frac{2\pi nt}{T_0}\,dt \quad , \; n = 0, ..., M$$

Упрошћена блок шема инструмента који мери 3 напона и 4 струје приказана је на слици:



Претходне две једнакости можемо да напишемо као:

$$\hat{a}_0 = a_0 + \sum_{k=1}^{M} a_k \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} \cos \frac{2\pi kt}{T} dt + \\ + \sum_{k=1}^{M} b_k \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} \sin \frac{2\pi kt}{T} dt$$

$$\hat{a}_n = \sum_{k=1}^{M} a_k \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} \cos \frac{2\pi kt}{T} \cos \frac{2\pi nt}{T_0} dt + \\ + \sum_{k=1}^{M} b_k \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} \sin \frac{2\pi kt}{T} \cos \frac{2\pi nt}{T_0} dt \quad , n = 1, ..., M$$

$$\hat{b}_n = \sum_{k=1}^{M} a_k \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} \cos \frac{2\pi kt}{T} \sin \frac{2\pi nt}{T_0} dt + \\ + \sum_{k=1}^{M} b_k \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} \sin \frac{2\pi kt}{T} \sin \frac{2\pi nt}{T_0} dt \quad , n = 1, ..., M$$

Уколико због упрошћења користимо ξ да означимо релативну промену основне фреквенције:

$$\xi = \frac{\Delta f_0}{f_0} \neq 0$$

једначине можемо да напишемо као:

$$\hat{a}_0 = a_0 + \sum_{k=0}^{M} \left(a_k C_k^{(a_0)} + b_k S_k^{(a_0)} \right)$$

$$\hat{a}_n = \sum_{k=1}^{M} a_k C_k^{(a_n)} + b_k S_k^{(a_n)}, \quad n = 1, ..., M$$

$$\hat{b}_n = \sum_{k=1}^{M} a_k C_k^{(b_n)} + b_k S_k^{(b_n)}, \quad n = 1, ..., M$$

где су коефицијенти $C_k^{(a_n)}$, $S_k^{(a_n)}$, $C_k^{(b_n)}$ и $S_k^{(b_n)}$ дати са:

$$C_k^{(a_n)} = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} \cos \frac{2\pi kt}{T} \cos \frac{2\pi nt}{T_0} dt = \\ = \frac{\sin(2\pi k\xi)}{\pi} \cdot \frac{k(1+\xi)}{k^2(1+\xi)^2 - n^2} \quad , \quad \begin{matrix} k = 1, \ldots, M \\ n = 0, \ldots, M \end{matrix}$$

$$
\begin{aligned}
S_k^{(a_n)} &= \frac{2}{T_0}\int_0^{T_0} \sin\frac{2\pi kt}{T}\cos\frac{2\pi nt}{T_0}\,dt = \\
&= \frac{1-\cos(2\pi k\xi)}{\pi}\cdot\frac{k(1+\xi)}{k^2(1+\xi)^2 - n^2}
\end{aligned}
\quad , \quad
\begin{aligned}
k &= 1,\ldots,M \\
n &= 0,\ldots,M
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
C_k^{(b_n)} &= \frac{2}{T_0}\int_0^{T_0} \cos\frac{2\pi kt}{T}\sin\frac{2\pi nt}{T_0}\,dt = \\
&= -\frac{1-\cos(2\pi k\xi)}{\pi}\cdot\frac{n}{k^2(1+\xi)^2 - n^2}
\end{aligned}
\quad , \quad
\begin{aligned}
k &= 1,\ldots,M \\
n &= 1,\ldots,M
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
S_k^{(b_n)} &= \frac{2}{T_0}\int_0^{T_0} \sin\frac{2\pi kt}{T}\sin\frac{2\pi nt}{T_0}\,dt = \\
&= \frac{\sin(2\pi k\xi)}{\pi}\cdot\frac{n}{k^2(1+\xi)^2 - n^2}
\end{aligned}
\quad , \quad
\begin{aligned}
k &= 1,\ldots,M \\
n &= 1,\ldots,M
\end{aligned}
$$

Горње једнакости могу да се посматрају као систем једначина у коме су $\hat{a}_n$ и $\hat{b}_n$ псеудохармоници који су добијени неправилним мерењем, а a_n и b_n су исправне вредности коефицијената који треба да се. Треба приметити да a_0 не фигурише у овим једнакостима и да се вредност за a_0 може добити након што се израчунају вредности a_n и b_n.

На овај начин редуковали смо проблем елиминације грешке мерења хармонијског садржаја који је проузрокован променом фреквенције на проблем решавања система линеарних једначина које могу да се представе у матричној форми

$$
\begin{bmatrix} \hat{a}_n \\ \hat{b}_n \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix}
$$

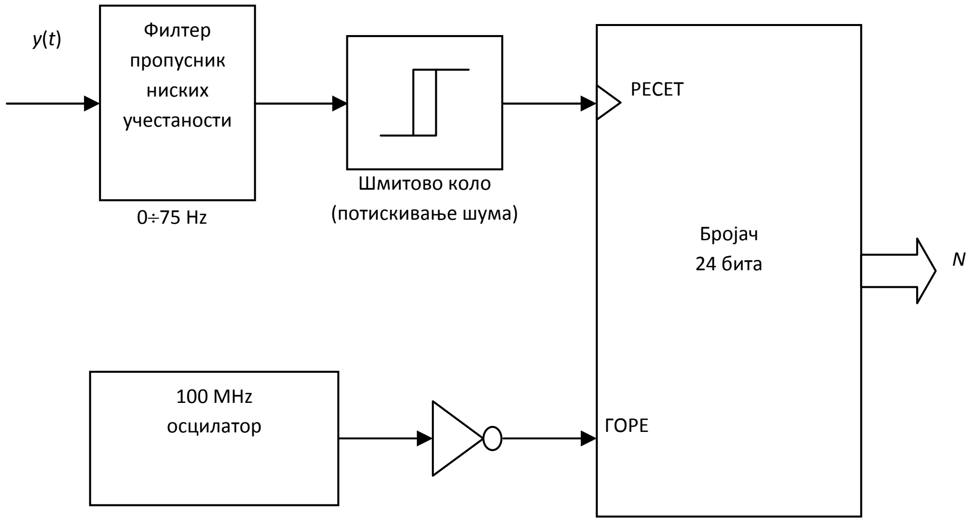
где је A матрица реда $2M$, дата са:

$$
A = \left[\begin{array}{cccc:cccc}
C_1^{(a_1)} & C_2^{(a_1)} & \cdots & C_M^{(a_1)} & S_1^{(a_1)} & S_2^{(a_1)} & \cdots & S_1^{(a_1)} \\
C_1^{(a_2)} & C_2^{(a_2)} & \cdots & C_M^{(a_2)} & S_1^{(a_2)} & S_2^{(a_2)} & \cdots & S_1^{(a_2)} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
C_1^{(a_M)} & C_2^{(a_M)} & \cdots & C_M^{(a_M)} & S_1^{(a_M)} & S_2^{(a_M)} & \cdots & S_M^{(a_M)} \\
\hdashline
C_1^{(b_1)} & C_2^{(b_1)} & \cdots & C_M^{(b_1)} & S_1^{(b_1)} & S_2^{(b_1)} & \cdots & S_M^{(b_1)} \\
C_1^{(b_2)} & C_2^{(b_2)} & \cdots & C_M^{(b_2)} & S_1^{(b_2)} & S_2^{(b_2)} & \cdots & S_M^{(b_2)} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
C_1^{(b_M)} & C_2^{(b_M)} & \cdots & C_M^{(b_M)} & S_1^{(b_M)} & S_2^{(b_M)} & \cdots & S_M^{(b_M)}
\end{array}\right]
$$

Кад матрица A није сингуларна, систем једначина има једниствено решење за вектор $\begin{bmatrix} a_n & b_n \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$.

Да би се решио систем једначина, мора бити познато ξ. Нажалост, ξ не можемо да знамо унапред, пре мерног интервала, јер се стварна фреквенција мерног сигнала f мења за непознат износ од номиналне f_0 и инструмент не прилагођава фреквенцију интерног осцилатора овој промени фреквенције мерног сигнала.

Применом простог кола које је приказано на следећој слици паралелно са мерењем псеудохармоника може се утврдити и промена фреквенције на крају сваког мерног интервала:

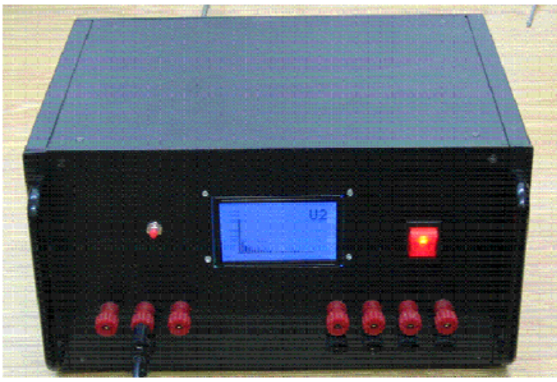


Коришћењем оваквог кола ξ може да се добије као

$$\hat{\xi} = \frac{100\ \text{MHz}}{N \cdot f_0} - 1$$

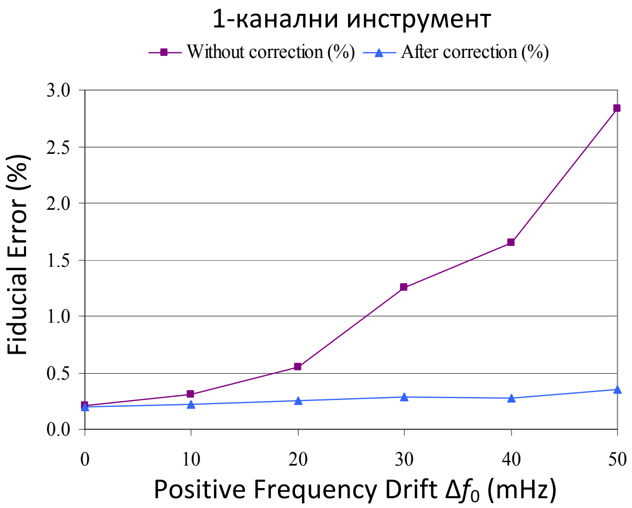
Резултати

Метода је примењена у прототипу инструмента за мерење хармонијског садржаја мрежних сигнала који је приказан на следећој слици. Овај инструмент мери 3 напона и 4 струје и за сваки од њих даје коефицијенте тригонометријског полинома реда 50 са 16-битном резолуцијом током једне периоде основне учестаности. На тај начин инструмент даје 2 бајта x 100 коефицијената x 7 канала x 50 периода сигнала = 70 kB мерних података у секунди. Намењен је за мерења параметара мреже као што су активна, реактивна и привидна снага. али може да се користи и за мерење других параметара.

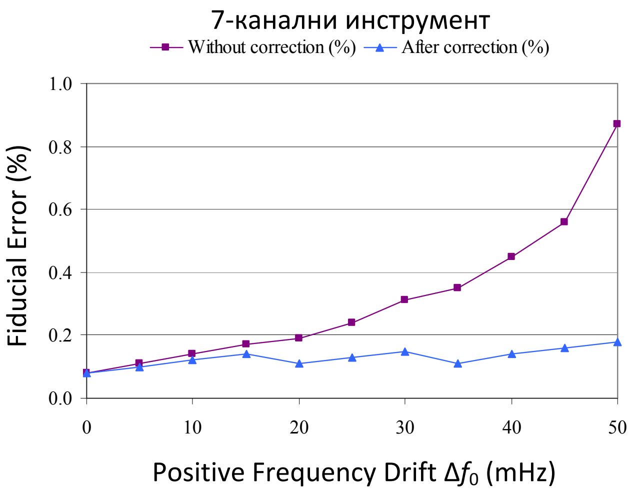


У инструменту је примењена претпоставка да је основна учестаност мреже увек номинална.

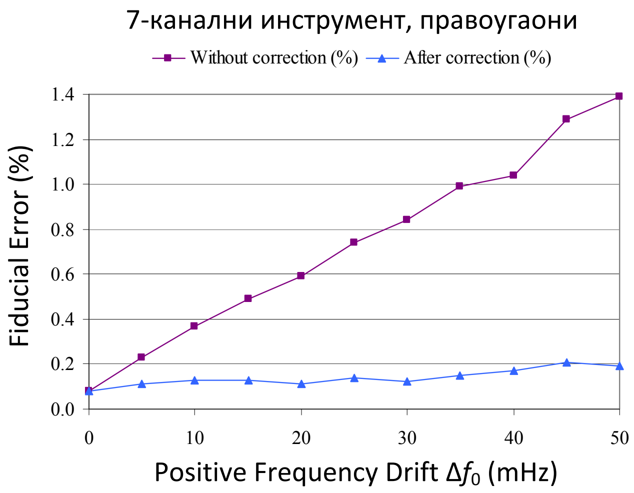
Применом методе за одређивање хармоника из псеудохармоника у овом и у једноканалном стохастичком инструменту који мери до 16 хармоника добијени су следећи резултати, приказани графички:



Грешка мерења једноканалног инструмента са и без корекције применом методе налажења хармоника из псеудохармоника



Грешка мерења седмоканалног инструмента са и без корекције применом методе налажења хармоника из псеудохармоника



Грешка мерења једноканалног инструмента са и без корекције применом методе налажења хармоника из псеудохармоника за правоугаони улазни сигнал

Метода одређивања хармоника из псеудохармоника развијена је на Факултету техничких наука у Новом Саду, у оквиру текућег пројекта бр. ТР-32019 код Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије и текућег пројекта бр. 114-451-2723 код Покрајинског секретаријата за науку и технолошки развој АП Војводине.

Штампано – Децембар 2011.