

## ALGORYTMY WYODRĘBNIANIA SKŁADOWYCH SYMETRYCZNYCH SYGNAŁU POMIAROWEGO NAPIĘCIA W PRZYPADKU ASYMETRII SIECI TRÓJFAZOWEJ

Krzysztof BLECHARZ

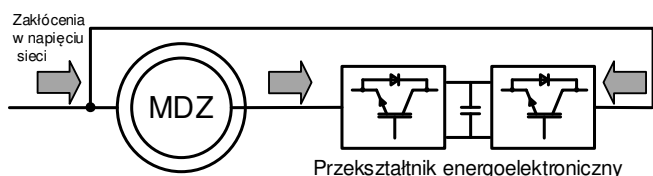
Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel: 583486075 e-mail: krzysztof.blecharz@pg.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano działanie wybranych algorytmów wykorzystywanych do wyodrębniania składowych symetrycznych z sygnałów pomiarowych napięcia lub prądu w przypadku wystąpienia asymetrii trójfazowej sieci elektroenergetycznej. Weryfikacji działania algorytmów dokonano na podstawie badań symulacyjnych i laboratoryjnych w układzie w którym jako odbiornik zastosowano stojan maszyny asynchronicznej pierścieniowej. Określono wpływ szumów pomiarowych oraz asymetrii wewnętrznej odbiornika na działanie algorytmów.

**Słowa kluczowe:** asymetria sieci, algorytm SOGI, algorytm DSC, maszyna dwustronnie zasilana

### 1. WSTĘP

Układy generatorowe z maszyną dwustronnie zasilaną (MDZ) są stosowane w energetyce wiatrowej. Z uwagi na sposób działania tych układów są one wrażliwe na zakłócenia napięcia pochodzące od sieci zasilającej. Na rysunku 1 pokazano strukturę układu generatorowego z MDZ. Charakter zakłócenia ma istotny wpływ na prawidłową pracę układu.



Rys.1. Struktura układu generatorowego z maszyną dwustronnie zasilaną przepływ zakłóceń

W obwodzie wirnika występuje dwukierunkowy przekształtnik energoelektroniczny. W przekształtniku wyodrębnić można dwie zasadnicze części. Falownik sieciowy, którego zadaniem jest regulacja napięcia stałego w obwodzie pośredniczącym i wartości współczynnika mocy na zaciskach przekształtnika oraz falownik maszynowy, odpowiedzialny za regulację mocy czynnej i biernej przekazywanej do sieci przez generator. Reakcja całego układu generatorowego uzależniona jest od rodzaju zakłócenia. Do najbardziej niebezpiecznych w swoich skutkach zakłóceń można zaliczyć zapad napięcia, który może doprowadzić do uszkodzenia przekształtnika w obwodzie wirnika. W przypadku wystąpienia asymetrii lub odkształcenia napięć zasilających układ generatorowy mamy do czynienia z efektami związanymi z pojawieniem się oscylacji w przebiegach

mocy oddawanych do sieci oraz oscylacjami momentu na wale generatora prowadzącymi do szybszego zużycia przekładni mechanicznych. W artykule uwagę skupiono na asymetrii sieci zasilającej, którą można zdefiniować jako zmianę wartości skutecznej napięcia w jednej lub wielu fazach lub brak równości pomiędzy kątami fazowymi poszczególnych napięć. Występowanie asymetrii w sieci zasilającej jest stanem często spotykanymi w wielu przypadkach dopuszczalnym, jednakże mającym negatywny wpływ na pracę urządzeń nieprzystosowanych do takich stanów. Szczegółowe wytyczne dotyczące dopuszczalnych wartości odchylenia poszczególnych parametrów napięcia sieci zostały zdefiniowane w normie EN50160. Najczęstszą przyczyną asymetrii napięć jest niesymetryczny pobór mocy w poszczególnych fazach. Pojawienie się asymetrii zasilania powoduje pojawienie się obok składowej zgodnej, wirującej z częstotliwością podstawową, składowej przeciwnej o częstotliwości dwukrotnie większej. W klasycznych rozwiązaniach układów sterowania MDZ [1] nie uwzględnia się asymetrii i ich syntezę przeprowadza się tylko dla składowej zgodnej napięcia. W układach generatorowych z MDZ składowa zerowa nie występuje ze względu na trójprzewodowy układ połączeń bez przewodu neutralnego.

Do prawidłowego działania układów sterowania mocą w przypadku pojawienia się asymetrii zasilania po stronie sieci konieczne staje się uwzględnienie tego zjawiska w projektowanym układzie sterowania. Niezbędnym więc jest wyodrębnienie z mierzonych wielkości napięć i prądów stojana poszczególnych składowych w dowolnym układzie odniesienia.

### 2. WYBRANE ALGORYTMY

W literaturze odnaleźć można szereg algorytmów [2] estymacji składowych symetrycznych wykorzystujących właściwości filtrów dolnoprzepustowych, pasmowo przepustowych lub cyfrowe opóźnienie sygnału. Algorytmy te różnią się szybkością działania, dokładnością oraz łatwością implementacji. W artykule zaprezentowano dwa najbardziej popularne łatwe w implementacji i funkcjonalne algorytmy.

#### 2.1. Algorytm DSC

Algorytm DSC (Ang. Delayed Signal Cancellation) umożliwia wyznaczenie wartości poszczególnych składowych symetrycznych z sygnału mierzonego poprzez zastosowanie bufora zapamiętującego próbki sygnału okresowego

z przedziału czasowego równego jednej czwartej okresu podstawowego [3]. W ujęciu matematycznym algorytm dla dyskretnej dziedziny czasu można zapisać w postaci ogólnej w ortogonalnym układzie współrzędnych alfa-beta następująco [3]:

$$\vec{V}_p(kT_s) = \frac{1}{2} [\vec{V}(kT_s) + j\vec{V}(kT_s - nT_s)] \quad (1)$$

$$\vec{V}_n(kT_s) = \frac{1}{2} [\vec{V}(kT_s) - j\vec{V}(kT_s - nT_s)] \quad (2)$$

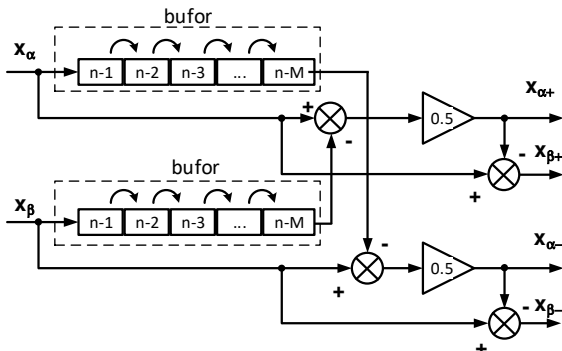
gdzie:  $\vec{V}$  - wektor wielkości mierzonej,  $\vec{V}_p, \vec{V}_n$  - wektory estymowane składowych zgodnej i przeciwnej,  $k$  - kolejne takty układu impulsowania,  $T_s$  - okres impulsowania układu,  $n$  - opóźnienie (liczba okresów impulsowania).

Zasada działania bufora polega na zapisywaniu do tablicy pamięci  $M$  kolejnych próbek sygnału wejściowego  $x_\alpha(t)$  i  $x_\beta(t)$  z uwzględnieniem przesunięcia każdej próbki do następnego komórki pamięci w każdym kolejnym głównym przerwaniu procesora. Rozmiar tablicy w której zapamiętywane są próbki sygnału wejściowego jest równy liczbie całkującej  $M$ . Wartość liczby uzależniony jest od częstotliwości próbkowania sygnału wejściowego oraz częstotliwości podstawowej harmonicznej zgodnie z zależnością:

$$M = \text{round}\left(\frac{T}{4T_s}\right) \quad (3)$$

gdzie  $T$  - okres sygnału podstawowego,  $T_s$  - okres próbkowania układu pomiarowego.

Rolą buforów jest realizacja opóźnienia sygnału o  $\frac{1}{4}$  okresu sygnału pierwszej harmonicznej. Schemat blokowy działania algorytmu opisanego równaniami (1)-(2) pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Struktura wewnętrzna algorytmu DSC

W tabelicy 1 zamieszczono rzeczywiste i zaokrąglone wartości  $M$  dla różnych czasów impulsowania układu pomiarowego. Wartości pogrubione przyjęto w badaniach laboratoryjnych.

Tabela 1. Zestawienie danych

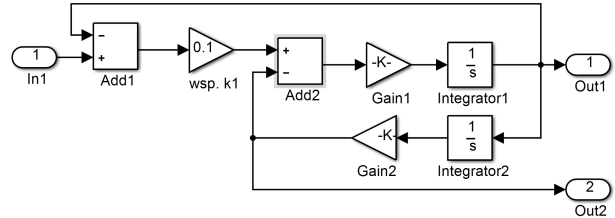
Lp.	$f_{imp}$ [kHz]	$T_{imp}$ [us]	$M$	$M(\text{round})$
1	<b>6,66</b>	<b>150</b>	<b>33,33</b>	<b>33</b>
2	10	100	50	50
3	16	62,5	80	80

Szczegółowa analiza wpływu błędu zaokrąglania wartości opóźnienia została przeprowadzona w [3].

## 2.2. Uogólniony układ całkujący II rzędu

Do estymacji składowych symetrycznych sygnału okresowego można wykorzystać uogólniony układ całkujący

II rzędu w literaturze funkcjonujący pod nazwą SOGI (ang. Second Order Generalized Integrator). Algorytm SOGI może być również wykorzystywany jako filtr pasmowo przepustowy, filtr dolnoprzepustowy, układ estymacji parametrów sygnałów harmoniczych. Opis przykładowych form zastosowania algorytmu opisano szczegółowo [4]. Dokładna analiza działania algorytmu została zaprezentowana w [5].



Rys. 3. Struktura wewnętrzna uogólnionego układu całkującego II rzędu (struktura SOGI)

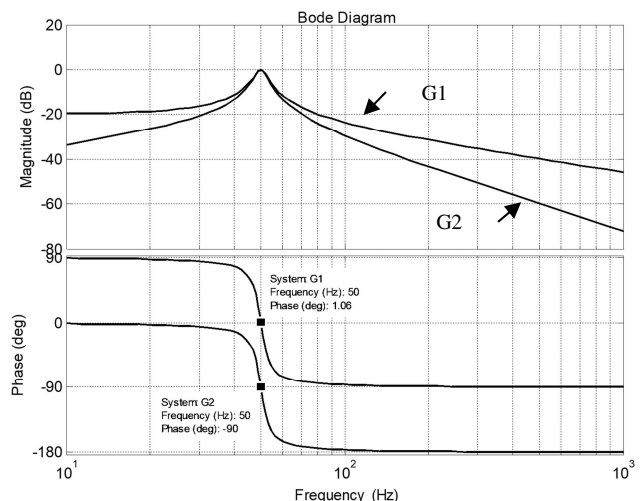
Prezentowana na rysunku 3 struktura dynamiczna posiada jedno wejście sygnałowe In1 oraz dwa wyjścia Out1 i Out2. Na pierwszym wyjściu otrzymuje się sygnał wejściowy odfiltrowany natomiast na drugim wyjściu sygnał odfiltrowany jest przesunięty względem wyjścia pierwszego o kąt  $+\pi/2$ . Dynamikę działania algorytmu w ciągłej dziedzinie czasu opisują dwie transmitancje operatorowe w postaci:

$$G_1(s) = \frac{Out1}{In1} = \frac{k\omega_0 s}{s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (4)$$

$$G_2(s) = \frac{Out2}{In2} = \frac{k\omega_0^2}{s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (5)$$

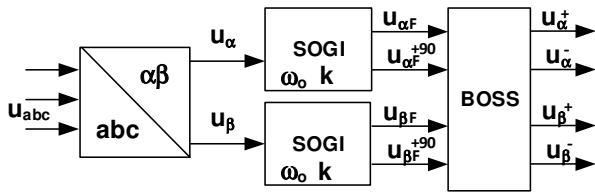
gdzie:  $\omega_0$  - pulsacja naturalna,  $k$  - współczynnik strojenia odpowiedzialny za dynamikę działania filtra oraz wielkość tłumienia.

Na rysunku 4 zaprezentowano charakterystyki Bode'go dla członu dynamicznego opisanego równaniami (4) i (5).



Rys. 4. Charakterystyka Bodego odpowiednio dla transmitancji  $G_1(s)$  i  $G_2(s)$ , przyjęto  $k=0.5$ ,  $\omega_0=314,15$  [Rad/s]

Zastosowanie dwóch członów dynamicznych oraz transformaty Parka umożliwia estymowanie składowych symetrycznych dla wybranej pulsacji podstawowej  $\omega_0$ . Struktura wewnętrzna całego algorytmu została pokazana na rysunku 5.



Rys. 5. Całościowa struktura wewnętrzna metody estymacji składowych symetrycznych z zastosowaniem algorytmu SOGI

Blok obliczania składowych symetrycznych napięcia (BOSS) w stacjonarnym układzie współrzędnych  $\alpha\beta$  można zdefiniować w następujący sposób:

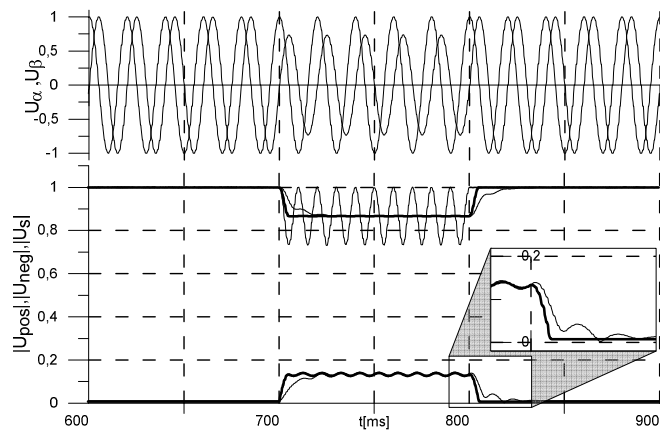
$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}^+ \\ u_{\beta}^+ \\ u_{\alpha}^- \\ u_{\beta}^- \end{bmatrix} = 0.5 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha F} \\ u_{\alpha F}^{+90} \\ u_{\beta F} \\ u_{\beta F}^{+90} \end{bmatrix} \quad (6)$$

gdzie:  $u_{\alpha F}, u_{\beta F}, u_{\alpha F}^{+90}, u_{\beta F}^{+90}$  odpowiednio filtrowane składowe ortogonalne sygnału napięcia mierzonego oraz filtrowane składowe przesunięte w fazie o kąt  $+\pi/2$ .

### 3. ANALIZA DZIAŁANIA

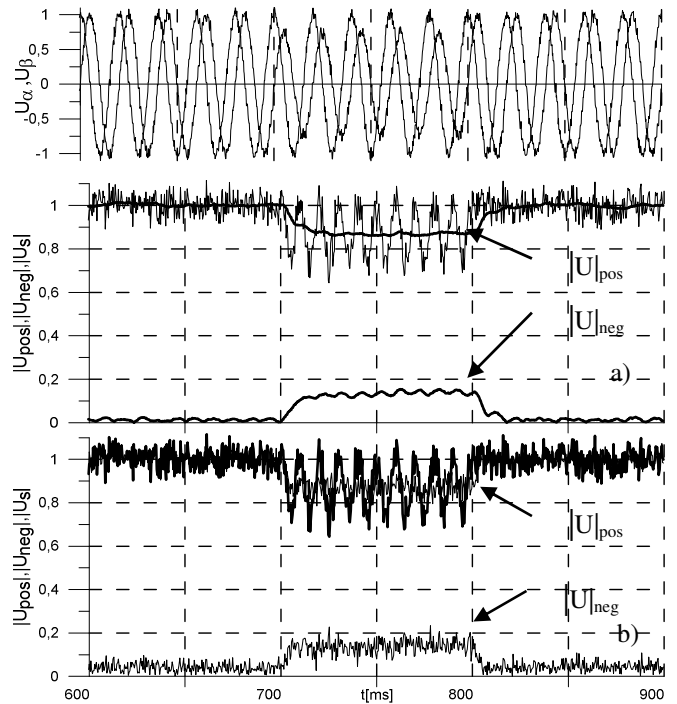
#### 3.1. Badania symulacyjne

W celu analizy działania obu algorytmów przeprowadzono badania symulacyjne. Zakres badań obejmował dokładność estymacji poszczególnych składowych dla wystąpienia asymetrii napięcia w jednej fazie układu trójfazowego w czasie 100ms. Badania symulacyjne przeprowadzono dla dwóch przypadków. W pierwszym napięcie sieci zawierało tylko pierwszą harmoniczną (rys.6), natomiast w drugim przypadku na napięcie sieci nałożono szum pomiarowy o dużej częstotliwości i amplitudzie 0.1 [j.w], (rys.7). Poniżej pokazano symulacyjne przebiegi czasowe dla składowych napięcia sieci oraz wyodrębnionych składowych symetrycznych.

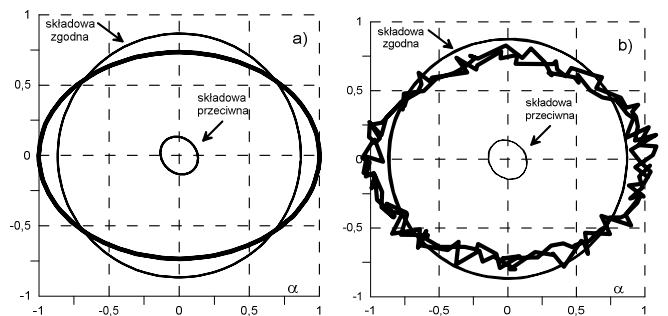


Rys. 6. Przebieg czasowy modułu napięcia sieci  $|U_s|$ , modułów składowych symetrycznych zgodnej  $|U_{pos}|$ , przeciwnej  $|U_{neg}|$ : algorytm SOGI, algorytm DSC (pogrubiona)

Na rysunku 8 pokazano kształt hodografów poszczególnych wektorów składowych symetrycznych wygenerowane na podstawie symulacji komputerowej dla dwóch rodzajów algorytmów.



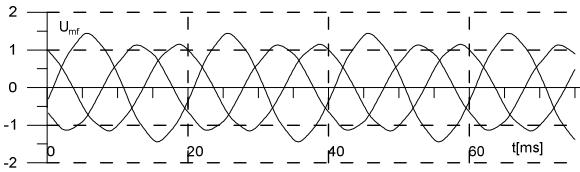
Rys. 7. Przebieg czasowy modułu napięcia sieci  $|U_s|$  (pogrubiona), modułów składowej symetrycznej zgodnej  $|U_{pos}|$ , przeciwnej  $|U_{neg}|$  z uwzględnieniem szumów pomiarowych: SOGI a.) DSC b.)



Rys. 8. Hodografy wektorów, wektor napięcia mierzonego  $U_s$  (pogrubiona), wektor składowej zgodnej, przeciwnej (symulacja): SOGI a.) DSC b.)

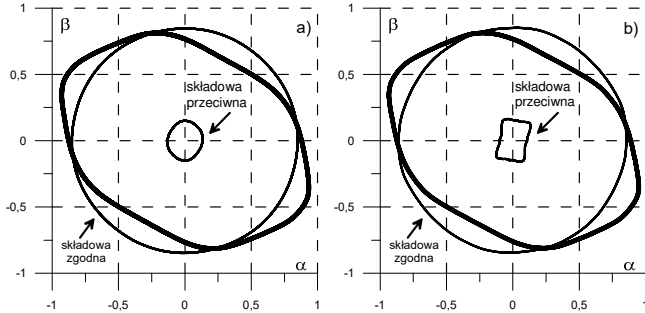
#### 3.2. Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne przeprowadzono z wykorzystaniem wbudowanych torów pomiarowych w dwukierunkowym przekształtniku energoelektronicznym typ MMB010 sterowanym przez kartę sterownika SH363v3 z procesorem sygnałowym SHARC ADSP 21363 oraz układem logiki programowalnej Altera Cyclone II. Częstotliwość impulsowania układu regulacji oraz torów pomiarowych wynosiła 6,66 kHz. Napięcia trójfazowe po stronie sieci mierzone za pomocą przetworników napięcia typu LV 25-P firmy LEM. Pomiary wykonano w układzie z transformatorem trójfazowym mocy połączonym w grupie YNyn0 który zasiliał obwód odbiornika będącego stojanem MDZ o mocy 2 kW. Asymetrię zasilania wymuszono poprzez beznapięciową zmianę odczepu na jednej z faz transformatora, uzyskując tym samym asymetrię napięcia zasilającego stojan na poziomie 317 V, 317 V, 400 V wartości skutecznej międzyfazowej, (rys. 9). Zastosowanie stojana jako odbiornika umożliwiło przetestowanie algorytmów z uwzględnieniem odkształcenia napięcia wywołanego asymetrią wewnętrzną maszyny.

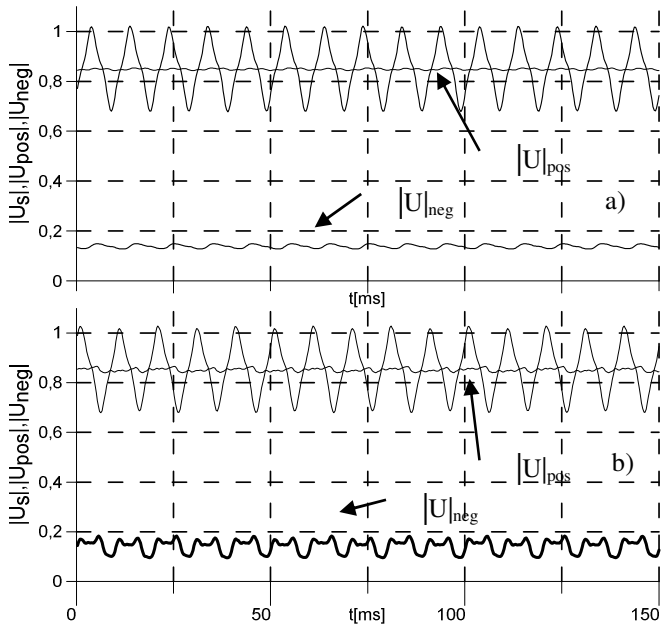


Rys. 9. Przebiegi napięć międzyfazowych przy asymetrii sieci w jednostkach względnych (pomiar)

Na rysunku 10 pokazano kształt hodografów poszczególnych wektorów składowych symetrycznych zarejestrowanych dla dwóch rodzajów algorytmów.



Rys.10. Porównanie hodografów wektorów, wektor napięcia mierzonego  $U_s$  (pogrubiona), wektor składowej zgodnej, wektor przeciwnej (pomiar): a) SOGI, b) DSC



Rys. 11. Przebiegi czasowe modułu napięcia sieci  $|U_s|$  oraz modułów składowych symetrycznych zgodnej  $|U_{pos}|$ , przeciwnej  $|U_{neg}|$ : algorytm SOGI a), algorytm DSC b.) (pomiar)

## 4. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule zaprezentowano dwa algorytmy wyodrębniania składowych symetrycznych napięcia w przypadku asymetrii sieci zasilającej. Prezentowane algorytmy umożliwiały szybką estymację składowych symetrycznych napięcia. Algorytm DSC jest łatwy do implementacji w systemach cyfrowych, jednakże wymaga operowania dużymi tablicami próbek pomiarowych oraz nie eliminuje szumów pomiarowych (rys.7b). Zastosowanie algorytm SOGI umożliwia filtrację szumu sygnału pomiarowego (rys.7a) kosztem konieczności szybkiego przeliczania dynamiki członu oraz wymaga prawidłowego doboru współczynnika wzmocnienia  $K$ , który w eksperymencie wynosił 0,7. W wyniku wystąpienia asymetrii zasilania w przebiegach mierzonego napięcia pojawiają się oscylacje o częstotliwości 100 Hz oraz odkształcenia wynikające z asymetrii wewnętrznej odbiornika. Zastosowanie algorytmu z uogólnionym członem całkującym II rzędu do estymacji napięcia daje lepsze rezultaty (rys. 11a) z względu na mniejsze oscylacje w przebiegach czasowych estymowanych składowych w stosunku do algorytmu DSC (rys.11b). Ma to istotne znaczenie z uwagi na potencjalne wykorzystanie estymowanych sygnałów składowych symetrycznych w układzie sterowania.

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. Poddar G., Ranganathan V.T., Sensorless Field-Oriented Control for Double-Inverter-Fed Wound-Rotor Induction Motor Drive, IEEE Trans. Ind. Electron. 51 (2004) 1089–1096. doi:10.1109/TIE.2004.834970.
2. Saccomando G., Svensson J.: Transient operation of grid-connected voltage source converter under unbalanced voltage conditions, Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting, Chicago, USA, 2001, pp. 2419-2424 vol.4. (doi: 10.1109/IAS.2001.955960)
3. Svensson J., Bongiorno M., Sannino A.: Practical implementation of delayed signal cancellation method for phase-sequence separation, IEEE Trans. Power Deliv. 22 (2007) 18–26. (doi:10.1109/TPWRD.2006.881469).
4. Bobrowska-Rafał M., Rafał K., Jasiński M., Kaźmierkowski M.P.: Grid synchronization and symmetrical components extraction with PLL algorithm for grid connected power electronic converters - A review, Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci. 59 (2011) 485–497.
5. Mozdzyński K., Rafał K., Bobrowska-Rafał M.: Application of the second order generalized integrator in digital control systems, Arch. Electr. Eng. 63 (2014) 423–437.

## ALGORITHMS OF EXTRACTION OF A SYMMETRICAL COMPONENTS FROM VOLTAGE MEASUREMENT SIGNAL IN A CASE OF A THREE PHASE NETWORK ASYMMETRY

The article presents the operation of selected algorithms used to extract symmetrical components from voltage or current measurement signals in case of three-phase power grid asymmetry. Verification of the algorithms' operation was made on the basis of simulation and laboratory tests in the system in which the stator of the slip-ring asynchronous machine was used as the load. The influence of measuring noise and internal load asymmetry on the operation of algorithms was determined.

**Keywords:** Second Order Generalized Integrator, Delayed Signal Cancellation, Symmetrical Components.