

*generator indukcyjny, układ przekształtnikowy  
sterowanie polowo zorientowane,  
dobór nastaw regulatorów*

Błażej JAKUBOWSKI\*, Krzysztof PIENKOWSKI\*

## **SYNTEZA PRZEKSZTAŁTNIKOWEGO UKŁADU STEROWANIA AUTONOMICZNYM GENERATOREM INDUKCYJNYM. CZĘŚĆ I – ANALIZA**

W artykule przedstawiono model matematyczny przekształtnikowego układu autonomicznego generatora indukcyjnego z obciążeniem w obwodzie prądu przemiennego generatora. Układ sterowania obejmuje sterowanie amplitudą napięcia na zaciskach generatora oraz sterowanie napięciem stałym w obwodzie pośredniczącym przekształtnika AC/DC. Przedstawiono algorytm sterowania zmiennymi elektromagnetycznymi oraz schemat strukturalny układu sterowania. Przedstawiono metodę doboru nastaw regulatorów prądu przekształtnika AC/DC i amplitudy napięcia w obwodzie prądu stałego oraz przemiennego. Przeprowadzono syntezę pracy układu sterowania. Wyniki syntezy pozwalają na racjonalny dobór nastaw regulatorów w przekształtnikowym układzie sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym zapewniający dużą dokładność sterowania, nawet przy dużych zmianach obciążenia oraz prędkości kątowej generatora.

### 1. WSTĘP

Duże zainteresowanie wykorzystaniem maszyn indukcyjnych klatkowych do generacji energii elektrycznej związane jest głównie z niskimi kosztami wykonania oraz eksploatacji tych maszyn. Wadą generatorów indukcyjnych jest jednak duża zmienność wytwarzanego napięcia oraz częstotliwości przy zmiennym obciążeniu generatora. Wady te mogą zostać wyeliminowane przez zastosowanie przekształtnikowych układów wzbudzenia oraz odpowiednich algorytmów i metod sterowania tymi układami przekształtnikowymi [1, 4–7].

W artykule przedstawiono model matematyczny przekształtnikowego układu autonomicznego generatora indukcyjnego z obciążeniem w obwodzie prądu przemiennego

---

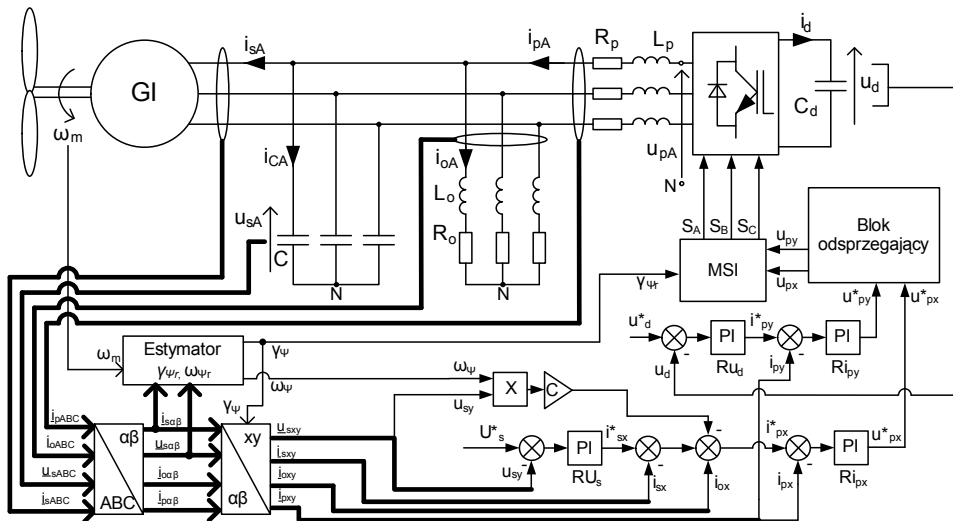
\* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, blazej.jakubowski@pwr.wroc.pl, krzysztof.pienkowski@pwr.wroc.pl.

generatora. W układzie sterowania rozpatrywany jest przekształtnik AC/DC o strukturze falownika napięcia. Dokonano syntezy układu regulacji napięcia generatora, układu regulacji napięcia w obwodzie prądu stałego przekształtnika oraz układu regulacji prądów po stronie prądu zmiennego przekształtnika. Podano metody doboru nastaw regulatorów stosowanych w układzie.

Na podstawie przedstawionych w artykule analiz układu sterowania wykonano badania symulacyjne. Wyniki wybranych badań symulacyjnych przedstawiono w drugiej części artykułu [3].

## 2. OPIS I MODEL PRZEKSZTAŁTNIKOWEGO UKŁADU STEROWANIA GENERATOREM INDUKCYJNYM

Przekształtnikowy układ sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat przekształtnikowego układu sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym  
Fig. 1. Scheme of converter system of control of autonomous induction generator

W układzie występuje 3-fazowy generator indukcyjny klatkowy GI zasilający 3-fazowy odbiornik rezystancyjno-indukcyjny (o parametrach  $R_o$ ,  $L_o$ ) lub grupę tego typu odbiorników. Rozpatrywany jest hybrydowy układ wzbudzenia generatora indukcyjnego złożony z 3-fazowej baterii kondensatorów  $C$  oraz z przekształtnika energoelektronicznego AC/DC przyłączonego do generatora przez dławiki sprzęgające. W obwodzie pośredniczącym DC przekształtnika występuje kondensator  $C_d$  o dużej pojemności.

Algorytm sterowania generatorem indukcyjnym jest oparty na pośredniej metodzie sterowania połowo-zorientowanego (IFOC) z zastosowaniem transformacji wielkości elektromagnetycznych do prostokątnego układu współrzędnych  $(x, y)$  o osi  $x$  współliniowej względem chwilowego położenia wektora strumienia sprzężonego wirnika [1]. W bloku estymacji na podstawie sygnałów pomiarowych, wartości zadanych i parametrów elektromagnetycznych generatora wyznaczana jest prędkość kątowna wirowania  $\omega_\psi$  i kąt położenia  $\gamma_\psi$  wektora strumienia sprzężonego wirnika [1, 4, 5]. W układzie zastosowano dwa podstawowe bloki regulacji: układ sterowania amplitudy napięcia fazowego stojana generatora oraz układ sterowania napięciem w obwodzie pośredniczącym przekształtnika AC/DC.

Do analizy przyjęto układ równań modelu matematycznego generatora indukcyjnego (1), wyrażony w układzie współrzędnych  $(x, y)$ , wirującym synchronicznie z wektorem przestrzennym strumienia wirnika z prędkością kątowną  $\omega_\psi$  [4, 5]:

$$\begin{cases} \underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d\underline{\Psi}_s}{dt} + j\omega_\psi \underline{\Psi}_s, \\ 0 = R_r \underline{i}_r + \frac{d\underline{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_\psi - \omega_e) \underline{\Psi}_r, \end{cases} \quad \begin{cases} \underline{\Psi}_s = L_s \underline{i}_s + L_M \underline{i}_r, \\ \underline{\Psi}_r = L_r \underline{i}_r + L_M \underline{i}_s, \end{cases} \quad \begin{cases} |\underline{\Psi}_m| = A_m \arctg(B_m |\underline{i}_m|), \\ L_M = |\underline{\Psi}_m| / |\underline{i}_m|, \\ \underline{i}_m = \underline{i}_s + \underline{i}_r. \end{cases} \quad (1)$$

W modelu uwzględniono nieliniowość charakterystyki magnesowania głównego obwodu magnetycznego generatora wyrażoną przez nieliniową zależność modułu wektora strumienia magnesowania  $\Psi_m$  od modułu wektora prądu magnesowania  $i_m$ .

Przedstawiony poniżej układ równań opisuje odpowiednio obwód obciążenia generatora (2), baterię kondensatorów (3), kondensator w obwodzie pośredniczącym przekształtnika (4), obwody łączące przekształtnik z generatorem indukcyjnym (5), bilans prądów w obwodach układu (6) oraz równania opisujące działanie przekształtnika AC/DC (7):

$$\begin{cases} \underline{u}_s = R_o \underline{i}_o + L_o \frac{d\underline{i}_o}{dt} + j\omega_\psi L_o \underline{i}_o, & (2) \\ \underline{i}_C = C \frac{d\underline{u}_s}{dt} + j\omega_\psi C \underline{u}_s, & (3) \\ C_d \frac{d\underline{u}_d}{dt} = \underline{i}_d, & (4) \end{cases} \quad \begin{cases} \underline{u}_p - \underline{u}_s = R_p \underline{i}_p + L_p \frac{d\underline{i}_p}{dt} + j\omega_\psi L_p \underline{i}_p, & (5) \\ \underline{i}_p = \underline{i}_o + \underline{i}_C + \underline{i}_s, & (6) \\ \underline{i}_d = -(S_A \underline{i}_{pA} + S_B \underline{i}_{pB} + S_C \underline{i}_{pC}), & (7a) \\ \underline{u}_{pk} = (1/3) \cdot \underline{u}_d [3S_k - (S_A + S_B + S_C)], & (7b) \\ k = A, B, C. \end{cases}$$

gdzie:  $\underline{u}_s, \underline{u}_p$  – wektor napięcia stojana generatora i przekształtnika,  $\underline{u}_{pk}, \underline{u}_d$  – wartości chwilowe napięć fazowych przekształtnika i napięcia w obwodzie DC,  $\underline{i}_s, \underline{i}_p, \underline{i}_o, \underline{i}_c$  – wektory prądów stojana generatora, przekształtnika AC/DC, obciążenia oraz baterii kondensatorów,  $S_k$  – wartości funkcji logicznych opisujących stany kluczy przekształtnika AC/DC.

Przedstawione w dalszej części analizy i badania symulacyjne zostały wykonane dla generatora indukcyjnego o następujących danych znamionowych:  $U_n = 220/380$  V,  $P_n = 1700$  W,  $f_n = 50$  Hz,  $p_b = 3$ . Wyznaczone na podstawie badań wartości parametrów elektromagnetycznych generatora wynoszą:  $R_s = 3,57$   $\Omega$ ,  $R_r = 3,68$   $\Omega$ ,  $L_{s\sigma} = 0,022$  H,  $L_{r\sigma} = 0,034$  H,  $A_m = 1.11$  Vs,  $B_m = 0,289$  1/A.

### 3. SYNTEZA UKŁADÓW STEROWANIA

#### 3.1. RÓWNANIA PRZYJĘTE DO SYNTEZY UKŁADÓW STEROWANIA

Jako równanie wyjściowe do syntezy układów sterowania przyjęto równanie wektorowe (5), przekształcone do postaci (8) z zastosowaniem składowych wielkości wektorowych. Równania (8) wyrażają związek między składowymi wektora prądu przekształtnika  $\underline{i}_p$ , a składowymi wektora napięcia przekształtnika  $\underline{u}_p$  po stronie obwodów AC przekształtnika w połowo-zorientowanym układzie współrzędnych  $(x, y)$ . W równaniach tych występują składniki napięć rotacji, wprowadzające sprzężenie między wielkościami składowymi w osiach  $x, y$  i utrudniające niezależne sterowanie poszczególnymi składowymi prądu przekształtnika. W celu wyeliminowania tej niedogodności w algorytmie sterowania wprowadzono człony odsprzęgające opisane przez równania (9). Po wprowadzeniu tych członów otrzymuje się równania (10) zapewniające niezależne sterowanie składowymi wektora prądu przekształtnika  $i_{px}$  i  $i_{py}$  odpowiednio przez składowe wektora napięcia  $u_{pxz}$  i  $u_{pyz}$ .

$$\begin{cases} u_{px} = R_p i_{px} + L_p \frac{di_{px}}{dt} - \omega_\psi L_p i_{py} + u_{sx}, \\ u_{py} = R_p i_{py} + L_p \frac{di_{py}}{dt} + \omega_\psi L_p i_{px} + u_{sy}, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} u_{px} = u_{pxz} + u_{pxo}, \\ u_{py} = u_{pyz} + u_{pyo}, \\ u_{pxo} = -\omega_\psi L_p i_{py} + u_{sx}, \\ u_{pyo} = \omega_\psi L_p i_{px} + u_{sy}, \end{cases} \quad (9)$$

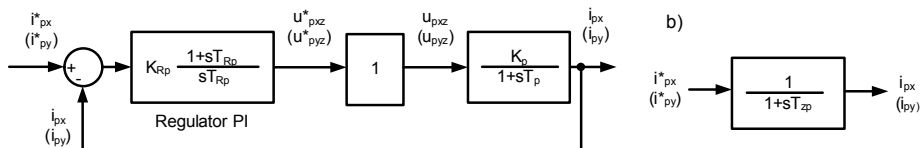
$$\begin{cases} u_{pxz} = R_p i_{px} + L_p \frac{di_{px}}{dt}, \\ u_{pyz} = R_p i_{py} + L_p \frac{di_{py}}{dt}. \end{cases} \quad (10)$$

### 3.2. SYNTEZA UKŁADÓW REGULACJI SKŁADOWYCH PRĄDU PRZEKSZTAŁNIKA AC/DC

Po pewnych przekształceniach upraszczających otrzymano przedstawiony na rys. 2a ogólny układ regulacji składowych  $i_{px}$ ,  $i_{py}$  wektora prądu przekształtnika, złożony z regulatora PI i obiektu regulacji (gdzie:  $K_p = 1/R_p$ ,  $T_p = L_p/R_p$ ). Kompensując stałą czasową  $T_p$  za pomocą stałej  $T_{Rp}$  regulatora PI [2] otrzymuje się układ przedstawiony na rys. 2b, gdzie:

$$T_{zp} = T_p / (K_{Rp} K_p). \quad (11)$$

Przy przyjęciu typowych parametrów dławika sprzęgającego:  $L_p = 50$  mH,  $R_p = 0,2$   $\Omega$  otrzymuje się następujące wartości stałych czasowych rozpatrywanego układu regulacji:  $T_{Rp} = T_p = 0,25$  s. Współczynnik wzmocnienia  $K_{Rp}$  powinien być dobrany oddzielnie dla składowych elektromagnetycznych w osiach  $x$  i  $y$  w zależności od struktury zewnętrznego układu regulacji.



Rys. 2. Schemat układu regulacji prądu przekształtnika  $i_p$  a) pełny, b) po kompensacji  
Fig. 2. Scheme of current control of inverter  $i_p$  a) complete, b) after compensation

### 3.3. SYNTEZA UKŁADU REGULACJI AMPLITUDE NAPIĘCIA GENERATORA $U_s$

Przyjmując, że w polowo-zorientowanym układzie współrzędnych ( $x$ ,  $y$ ) wektor napięcia stojana jest położony praktycznie na osi  $y$  ( $u_{sx} \approx 0$ ) oraz pomijając spadek napięcia na rezystancji stojana z przekształceń równań (1) otrzymuje się następujące zależności:

$$U_s = \sqrt{u_{sx}^2 + u_{sy}^2} \cong u_{sy}, \quad (12a)$$

$$\frac{u_{sy}}{i_{sx}} \cong K_r \frac{1}{1 + T_r s}, \quad (12b)$$

$$K_r = \omega_\Psi \frac{L_M^2}{L_r}, T_r = \frac{L_r}{R_r}, \quad (12c)$$

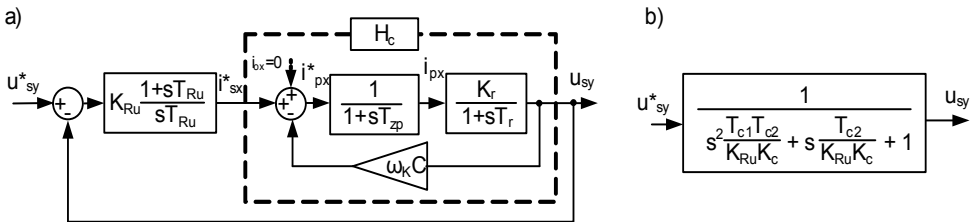
$$\omega_\Psi = \frac{R_r L_M}{L_r} \frac{i_{sy}}{\Psi_{rx}} + \omega_e. \quad (12d)$$

Na podstawie przekształceń zależności (12) wyznaczono ogólną postać struktury układu regulacji amplitudy napięcia stojana generatora oraz wartość prędkości kątowej wirowania wektora strumienia wirnika.

Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy układu regulacji modułu wektora napięcia fazowego stojana generatora. W układzie tym składowa  $i_{sx}$  wektora prądu stojana jest regulowana pośrednio przez wymuszanie składowej  $i_{px}$  wektora prądu

przekształtnika. Na podstawie równania (6) oraz uwzględnieniu możliwości pominięcia w rozpatrywanym układzie współrzędnych pochodnej składowej wektora napięcia  $du_{sx}/dt \approx 0$ , można przyjąć, że  $i_{px} = i_{ox} - \omega_K C u_{sy} + i_{sx}$ . Odejmowany od prądu zadanego  $i_{sx}^*$  składnik  $\omega_K C u_{sy}$  powoduje wprowadzenie dodatkowego sprzężenia zwrotnego wewnątrz układu regulacji napięcia  $u_{sy}$  – rys. 3. Aby wyeliminować możliwość powstania oscylacji napięcia  $u_{sy}$  spowodowanych występowaniem tego sprzężenia, należy dobrać odpowiednio dużą wartość stałej czasowej  $T_{zp}$ , a przez to odpowiednio małą wartość wzmocnienia regulatora prądu  $K_{Rp}$  – wzór (11).

Dla przyjętych danych:  $\omega_\psi = 314 \text{ rad/s}$ ,  $C = 1/(\omega_\psi^2 L_m) = 40 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $K_r = 69 \text{ V/A}$ ,  $T_r = 77 \text{ ms}$  minimalna wartość współczynnika wzmocnienia regulatora prądu, przy której odpowiedź skokowa układu opisanego transmitancją  $H_c(s)$  (rys. 3) będzie miała charakter aperiodyczny, wynosi  $K_{Rp} = 4,89 \text{ V/A}$ . Z analizy układu regulacji prądu wynika, że wartości tej nie należy już zwiększać, ponieważ może to spowodować utratę możliwości sterowania układem w wyniku szybkiego rozładowania kondensatora  $C_d$  w obwodzie pośredniczącym przekształtnika.



Rys. 3. Schemat układu regulacji prądu przekształtnika  $i_{px}$  oraz amplitudy napięcia  $U_s$

a) szczegółowy, b) transmitancja wypadkowa

Fig. 3. Scheme of current control of inverter  $i_{px}$  and voltage amplitude  $U_s$

a) detailed, b) resultant transmittance

Czas zdwojenia regulatora napięcia  $u_{sy}$  należy tak dobrać aby skompensować większą stałą czasową wypadkowej transmitancji  $H_c(s)$  [2]. Wzmocnienie  $K_{Ru}$  dobrano tak, aby układ regulacji nie posiadał biegunów zespolonych. Na podstawie obliczeń otrzymano następujące wartości parametrów regulatora napięcia:  $K_{Ru} = 0,0191 \text{ A/V}$ ,  $T_{Ru} = T_{c2} = 34,6 \text{ ms}$ . Mniejsza, nieskompensowana stała czasowa wynosi w tym przypadku  $T_{c1} = 12,2 \text{ ms}$ .

### 3.4. SYNTEZA UKŁADU REGULACJI NAPIĘCIA STAŁEGO W OBWODZIE DC

Przy pominięciu strat mocy w przekształtniku AC/DC oraz spadków napięć na rezystancji  $R_p$  dławików sprzęgających z bilansu przepływu mocy między obwodami prądu zmiennego, a obwodem prądu stałego przekształtnika otrzymuje się równanie (15). Przy uwzględnieniu, że dla wartości składowych wektora napięcia stojana gene-

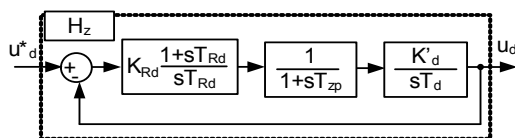
ratora spełniony jest warunek  $u_{sy} \gg u_{sx}$  oraz uwzględniając, że dynamika obwodów regulacji składowych wektora prądu przekształtnika  $i_{px}$ ,  $i_{py}$  jest dużo większa od dynamiki obwodu regulacji napięcia stałego, to równanie (13) można przekształcić do uproszczonej postaci (14):

$$i_d = \frac{p}{u_d} = \frac{3}{2} \frac{u_{px}i_{px} + u_{py}i_{py}}{u_d} \cong \frac{3}{2} \frac{u_{sx}i_{px} + u_{sy}i_{py}}{u_d}, \quad (13)$$

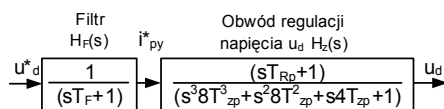
$$i_d \cong \frac{3}{2} \frac{u_{sy}i_{py}}{u_d} = \frac{3}{2} m i_{py}, \quad m = \frac{u_{sy}}{u_d}. \quad (14)$$

Równanie (14) wykorzystano do opracowania struktury układu regulacji napięcia stałego w obwodzie DC przekształtnika, przedstawionej na rys. 4. W układzie tym czas zdwojenia regulatora składowej wektora prądu  $i_{py}$  dobrano tak samo jak dla regulatora składowej wektora prądu  $i_{px}$ . Na tej podstawie dobrano następnie wartość wzmocnienia regulatora prądu  $i_{py}$ , tak, aby czas regulacji prądu do chwili osiągnięcia stanu ustalonego był równy  $t_r = 75$  ms. Na podstawie obliczeń otrzymano następujące wartości parametrów regulatora prądu  $i_{py}$ :  $K_{Rp} = 2,61$  V/A,  $T_{Rp} = 250$  ms.

Ponieważ w strukturze układu regulacji napięcia  $u_d$  występuje człon całkujący oraz człon inercyjny o małej stałej czasowej  $T_{zp}$ , to do doboru nastaw regulatora napięcia  $u_d$  można zastosować kryterium symetrii [2]. W wyniku obliczeń otrzymano następujące wartości parametrów regulatora napięcia  $u_d$ :  $K_{Rd} = 0,069$  A/V,  $T_{Rd} = 77$  ms. W celu kompensacji członu forsującego (licznika transmitancji  $H_z(s)$ ) za zadajnikiem napięcia zastosowano filtr dolnoprzepustowy [2] o stałej czasowej równej stałej  $T_{Rd}$  regulatora napięcia – rys. 5.



Rys. 4. Schemat układu regulacji prądu przekształtnika  $i_{py}$  oraz napięcia stałego  $u_d$   
Fig. 4. Scheme of inverter current control  $i_{py}$  and DC voltage  $u_d$  ( $K'_d = (3/2)mK_d$ ,  $K_d = 1/C_d$ ,  $T_d = 1s$ )



Rys. 5. Filtr kompensujący człon forsujący układu sterowania napięcia stałego  $u_d$   
Fig. 5. Compensating filter of control of DC voltage  $u_d$

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy rozpatrzono przekształtnikowy układ sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym z przekształtnikiem AC/DC o topologii falownika napięcia. Do

sterowania generatorem indukcyjnym zastosowano algorytm pośredniego sterowania polowo-zorientowanego z orientacją układu współrzędnych względem wektora strumienia sprzężonego wirnika. W układzie sterowania zastosowano nadrzędny układ regulacji amplitudy napięcia stojana generatora i napięcia stałego w obwodzie pośredniczącym przekształtnika oraz podporządkowane układy regulacji składowych wektora prądu przekształtnika. Wprowadzając pewne przekształcenia i uproszczenia równań modelu matematycznego układu otrzymano wyrażenia opisujące struktury poszczególnych układów regulacji. Na podstawie analizy tych struktur dokonano syntezy układów regulacji. Badania symulacyjne układu sterowania są przedmiotem drugiej części artykułu [3].

#### LITERATURA

- [1] AHMED T., NISHIDA K., NAKAOKA M., *Advanced Voltage Control of Induction Generator Using Rotor Field-Oriented Control*, Proc. of Industry Application Conference, 2005, Vol. 4, 2835–2842.
- [2] FROHR F., ORTENBURGER F., *Wprowadzenie do elektronicznej techniki regulacji*, WNT, Warszawa 1977.
- [3] JAKUBOWSKI B., PIEŃKOWSKI K., *Synteza przekształtnikowego układu sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym. Część II – Badania symulacyjne*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Wrocław 2012.
- [4] JAKUBOWSKI B., PIEŃKOWSKI K., *Sterowanie autonomicznym generatorem indukcyjnym ze wzbudzeniem przekształtnikowym*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Komel, 2010, Nr 88, 123–128.
- [5] JAKUBOWSKI B., PIEŃKOWSKI K., *Analiza układów polowo-zorientowanego sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2011, R. 87, Nr 11, 111–115.
- [6] SINGH B., KASAL G. K., *Solid State Voltage and Frequency Controller for a Stand Alone Wind Power Generating System*, IEEE Transactions on Energy Conversions, 2008, Vol. 23, No. 3, 1170–1177.
- [7] YOUSSEF K.H., WAHBA M.A., YOUSEF H.A., SEBAKHY O.A., *A New Method for Voltage and Frequency Control of Stand-Along Self-Excited Generator Using PWM Converter with Variable DC Link Voltage*, Proc. of American Control Conference, Washington 2008, 2486–2491.

#### SYNTHESIS OF THE CONVERTER CONTROL SYSTEM OF AUTONOMOUS INDUCTION GENERATOR. PART I – ANALYSIS

In the paper the algorithm and control method of converter system of autonomous induction generator are presented. The mathematical model of the system was given. The methods of tuning of inverter current controllers in the AC side circuits, the generator voltage controller and the voltage controller in DC link voltage of converter are described. The system enables dynamic control of voltage at the stator terminals of an induction generator with various types of loads of the generator. The simulation results of the studies are presented in the second part of this article.