

## ROZRUCH SILNIKA INDUKCYJNEGO ZASILANEGO Z FALOWNIKA ŚREDNIEGO NAPIĘCIA Z UWZGLĘDNIENIEM SYNCHRONICZNEGO PRZEŁĄCZENIA NA SIEĆ

### START OF THE CAGE INDUCTION MOTOR SUPPLIED FROM INVERTER AND TRANSIENT CONDITIONS RELATED TO TRANSFER TO SUPPLY GRID

**Abstract:** The paper present method of start of a large cage induction motor. The starting process consists of two main states. In the first state a power electronic converter is used to control the speed and current of the accelerating motor. Therefore the grid current is fully controlled and adjusted to references. In the second state the power electronic converter is off and the motor is connected directly to grid. A method of synchronization of the induced emf. of the motor to the grid voltage reduces transient current and starting time. However, relatively long time of the mechanical transfer switch operation results in displacement of the emf. and then adequate increase of the stator current.

#### 1. Wstęp

Artykuł prezentuje badania symulacyjne układu sterowania silnikiem indukcyjnym klatkowym dużej mocy, w danym przypadku jest to 6,3MW. Analiza dotyczy procesu rozruchu oraz synchronicznego przełączenia silnika z falownika rozruchowego na sieć zasilającą po ukończonym procesie. Dzięki kontrolowaniu procesu rozruchu i odpowiedniemu sterowaniu, prąd rozruchowy ograniczono do wartości nominalnej prądu silnika, zaproponowano też metodę ograniczenia udaru prądu w momencie przełączenia zasilania na sieć energetyczną.

#### 2. Podstawy teoretyczne

Do przeprowadzenia kontrolowanego procesu rozruchu silnika, zaproponowano sterowanie oparte na topologii układu z orientacją wektora pola (ang. Indirect Field Oriented Control). W sterowaniu tego typu, wykorzystuje się dwie składowe prądu stojana  $I_{sd}$  i  $I_{sq}$  wyrażone w prostokątnym, wirującym współbieżnie z wektorem strumienia, układzie współrzędnych d-q. Układ współrzędnych zorientowano tak, aby oś rzeczywista pokrywała się z wektorem strumienia wirnika. Wymuszeniem jest prąd stojana silnika, a sam silnik opisany jest wówczas poniższymi równaniami:

$$T_r \frac{d}{dt} \Psi_r + \Psi_r = L_m I_{sd} \quad (1)$$

$$T_r \Omega_r = \frac{1}{\Psi_r} L_m I_{sq} \quad (2)$$

$$M = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \Psi_r I_{sq} \quad (3)$$

Wielkościami wejściowymi, sterującymi są składowe prądu stojana:  $I_{sd}$  wywołująca strumień wzbudzenia silnika oraz odpowiedzialna za moment składowa  $I_{sq}$ . Wynika z tego, że jeśli strumień wirnika silnika  $\Psi_r$  jest stały, to moment maszyny rozwijany na wale jest proporcjonalny do składowej  $I_{sq}$  prądu stojana.

Zakładając  $\frac{d}{dt} \Psi_r = 0$ , otrzymujemy:

$$\Psi_r = L_m I_{sd} \quad (4)$$

podstawiając (4) do (2) otrzymujemy:

$$\Omega_r = \frac{1}{T_r} \frac{I_{sq}}{I_{sd}} \quad (5)$$

ponadto:

$$\Omega_\theta = \Omega_r + \Omega \quad (6)$$

przy czym:

$\Omega_\theta$  - prędkość kątowna układu współrzędnych,

$\Omega$  - elektryczna prędkość kątowna wirnika,

$\Omega_r$  - pulsacja poślizgu,

$\Psi_r$  - strumień wirnika,

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$  - stała czasowa wirnika,

$L_r$  - indukcyjność wirnika,

$L_m$  - indukcyjność magnesująca silnika,

$R_r$  - rezystancja wirnika,

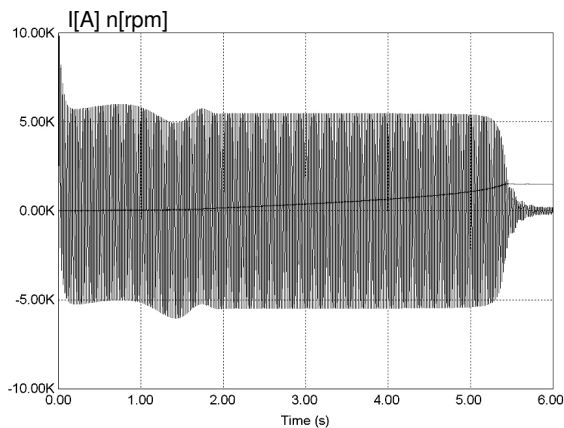
$p$  - liczba par biegunów.

### 3. Badania symulacyjne

W celu sprawdzenia przebiegu procesu rozruchu silnika, przy zaproponowanej metodzie sterowania, przeprowadzone zostały badania symulacyjne układu napędowego. Do symulacji użyto pakietu oprogramowania PSIM w wersji 6.0. Parametry modelu silnika obliczono na podstawie danych znamionowych silnika SYJe-154t o mocy 6300kW, znamionowa wartość skuteczna prądu stojana wynosi 693A prąd rozruchowy to 3,8kA a prędkość obrotowa synchroniczna jest równa 1500 obr/min.

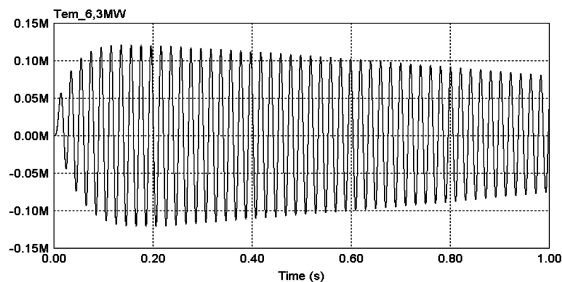
#### 3.1. Rozruch bezpośredni

Wyniki symulacyjne rozruchu silnika przy bezpośrednim podłączeniu do sieci, przedstawione zostały celem możliwości porównania efektywności i korzyści płynących z zastosowania do rozruchu falownika. Przebiegi prądu jednej z faz stojana i prędkości obrotowej wału maszyny przy rozruchu bezpośrednim prezentuje rys. 1.



Rys.1. Przebiegi czasowe prądu fazy stojana ( $I_s$ ) oraz prędkości obrotowej ( $n$ ) podczas rozruchu bezpośredniego silnika indukcyjnego (symulacja komputerowa).

Jak widać na rysunku 1, wynikiem bezpośredniego rozruchu silnika z sieci zasilającej jest pobór prądu o bardzo dużej wartości, w analizowanym przypadku amplituda prądu rozruchowego sięga 5,5kA. Bardzo negatywnym skutkiem takiego rozruchu jest oddziaływanie na sieć powodujące znaczne odkształcenie napięcia jak również przeciążenie linii zasilającej. Dużą wadą jest tu też kształt przebiegu momentu elektromagnetycznego silnika pokazany na rysunku 2.



Rys.2. Przebieg czasowy momentu elektromagnetycznego rozwijanego przez silnik podczas początkowej fazy rozruchu (symulacja komputerowa).

Silnie oscylujący przebieg momentu silnika utrzymuje się przez około 1/3 czasu trwania rozruchu i stanowi duży stres mechaniczny dla układu zawieszenia wirnika a także negatywnie wpływa na napędzane urządzenia. Proponowanym rozwiązaniem poruszanych problemów jest zastosowanie do rozruchu układu sterowania silnikiem.

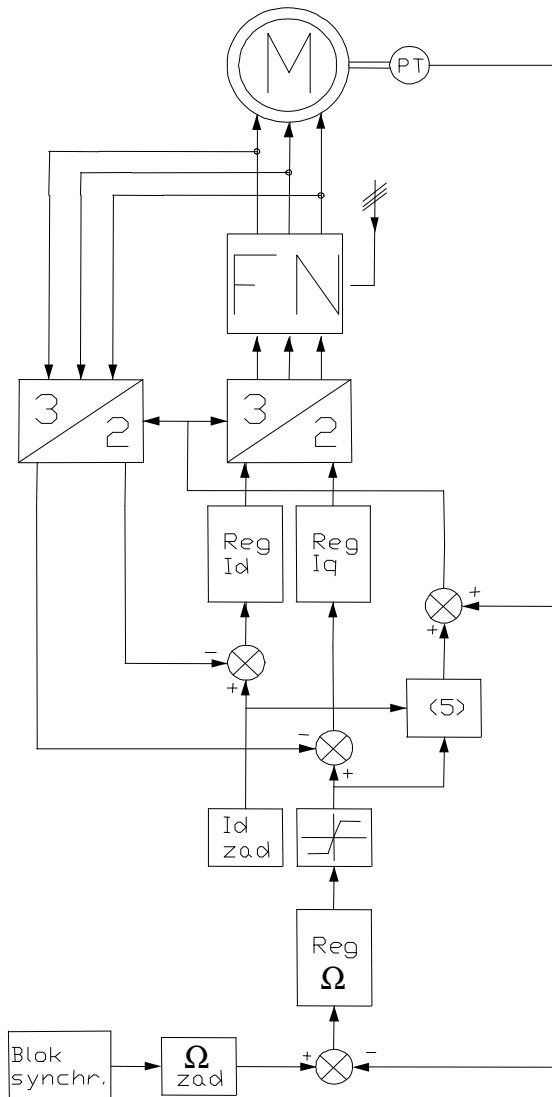
#### 3.2. Rozruch w układzie z orientacją wektora pola

W oparciu o opis i założenia zawarte w rozdziale 2, schemat blokowy proponowanego układu napędowego może wyglądać w sposób zobrazowany na rysunku 3.

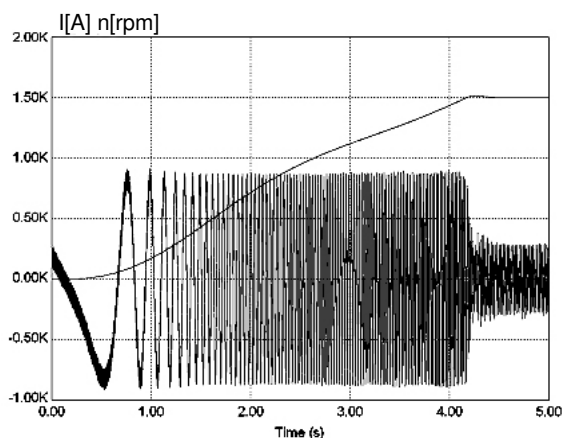
Wyniki symulacyjne rozruchu silnika w układzie z orientacją wektora pola zostały pokazane na rysunku 4. W przedstawionym rozwiązaniu zastosowano ograniczenie prądu rozruchowego silnika do wartości nominalnej.

Jak można zauważyć na rysunku 4, rozruch silnika w układzie z orientacją wektora pola przebiega o wiele korzystniej z punktu widzenia sieci zasilającej. Prąd fazowy stojana przez cały proces rozruchu utrzymywany jest na poziomie wartości nominalnej cechującej silnik. Uległ także skróceniu czas potrzebny na rozruch. Jak można się spodziewać, znacznemu polepszeniu uległ też przebieg rozruchowego momentu elektromagnetycznego silnika, zobrazowany na rysunku 5.

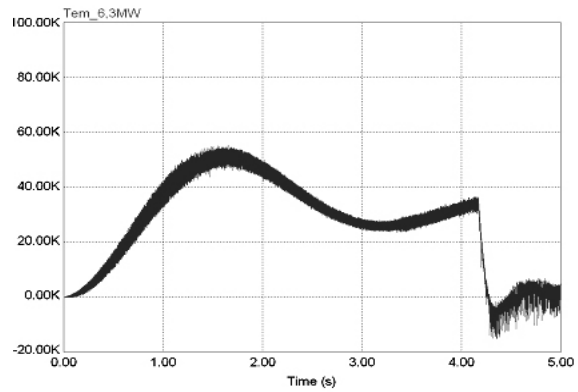
Przedstawiony napęd przekształtnikowy o sterowaniu polowo zorientowanym, przewidziany jest jedynie jako urządzenie rozruchowe stosowane do ciężkich rozruchów silników o dużych mocach. Po zakończonym procesie rozruchu powinno nastąpić przełączenie silnika na sieć zasilającą, co umożliwi dokonanie rozruchów kolejnych silników tym samym falownikiem.



Rys.3. Schemat blokowy układu napędowego z orientacją wektora pola.

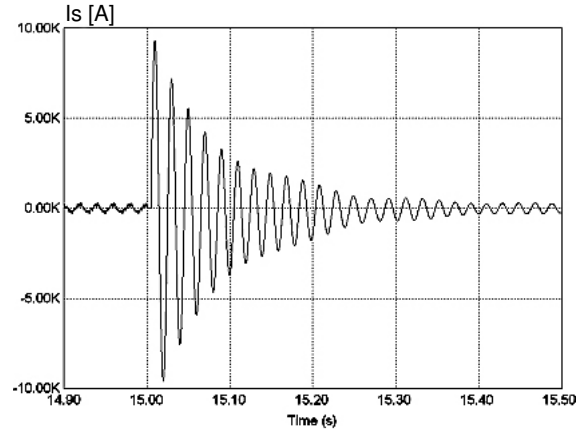


Rys.4. Przebiegi czasowe prądu fazy stojana ( $I_s$ ) oraz prędkości obrotowej ( $n$ ) podczas rozruchu silnika z falownikiem (symulacja komputerowa).



Rys.5. Przebieg czasowy momentu elektromagnetycznego rozwijanego przez silnik podczas rozruchu (symulacja komputerowa).

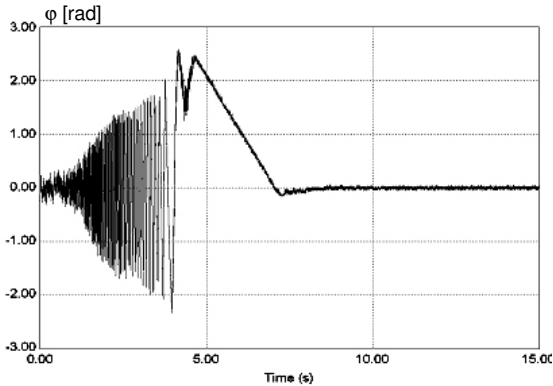
Prąd stojana silnika w sytuacji zmiany źródła zasilania pokazany jest na rysunku 6. Do momentu przełączenia, prąd silnika jest prądem wyjściowym falownika; od chwili przełączenia (na rysunku 6, w chwili czasowej  $t=15s.$ ) prąd stojana jest prądem sieci zasilającej.



Rys.6. Przebieg czasowy prądu fazy stojana silnika w momencie przełączenia na sieć zasilającą (symulacja komputerowa).

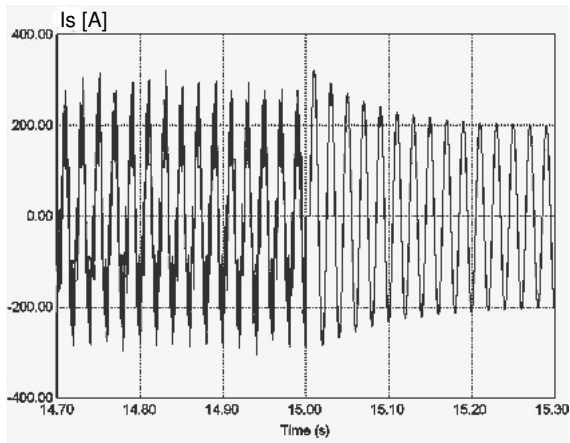
Występujący w chwili przełączenia udar prądowy, spowodowany jest różnicą wartości kątów fazowych napięcia wyjściowego falownika i napięcia sieci zasilającej. Minimalizacja przesunięcia fazowego pomiędzy napięciami falownika i sieci, pozwala na redukcję wspomnianego udaru prądowego towarzyszącego przełączeniu. Rolę regulatora przesunięcia fazowego, pełni w układzie blok synchronizacji, umieszczony na schemacie blokowym (rys.3) za blokiem zadajnika prędkości kątowej „ $\Omega$  zad”. Blok ma za zadanie tak wpływać na prędkość obrotową, aby przesunięcie fazowe pomiędzy napięciami w czasie przełączenia było bliskie zero. Sygnałami wejściowymi bloku synchroni-

zacji są: wartości chwilowe zadanego napięcia wyjściowego falownika i napięcia sieci zasilającej, w obu przypadkach obliczane są wektory przestrzenne synchronizowanych napięć, następnie minimalizowany kąt między nimi. Proces synchronizacji napięcia wyjściowego falownika, inicjowany jest w momencie, gdy prędkość obrotowa wału silnika przekroczy wartość nominalną. Przykładowy przebieg sygnału wyjściowego bloku synchronizacji przedstawia rysunek 7. Obrazuje on wartość przesunięcia fazowego ( $\varphi$ ) napięć, podczas rozruchu silnika i synchronizacji.



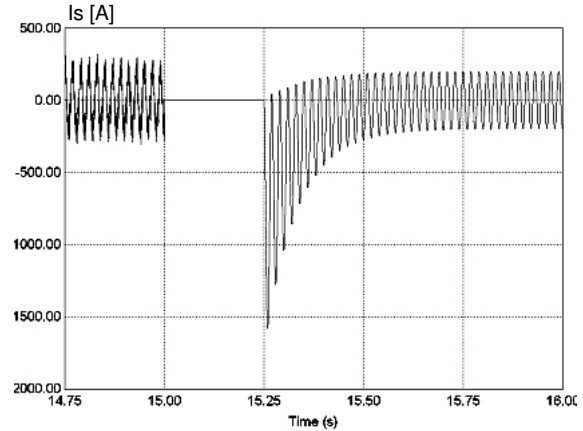
Rys.7. Przebieg wartości przesunięcia kątowego wektorów przestrzennych napięcia sieci i napięcia falownika (symulacja komputerowa).

Przebieg prądu fazowego stojana silnika, w chwili przełączenia na sieć zasilającą z wykorzystaniem synchronizacji napięć został pokazany na rysunku 8. Synchronizując przebiegi napięć, wyeliminowano przetężenie towarzyszące przełączeniu. Tak dobre rezultaty uzyskano jednak, jedynie w przypadku prawie natychmiastowego przełączenia silnika z falownika na sieć.



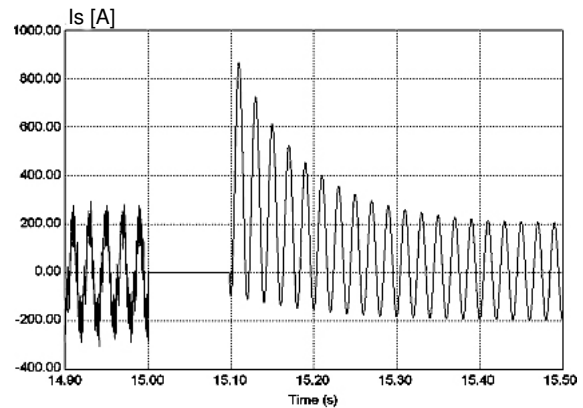
Rys.8. Przebieg czasowy prądu fazy stojana silnika w czasie przełączenia na sieć zasilającą (symulacja komputerowa).

Aby spełnić taki warunek posłużono się łącznikiem tyrystorowym. Jest to jednak rozwiązanie o wiele mniej opłacalne niż zastosowanie łącznika elektromechanicznego. Czas zadziałania takiego łącznika jest jednak o wiele dłuższy. Przykładowy przebieg prądu fazowego silnika przełączanego z pomocą łącznika elektromechanicznego obrazuje rysunek 9.



Rys.9. Przebieg czasowy prądu fazowego stojana silnika w czasie przełączenia na sieć zasilającą, z uwzględnieniem czasu martwego 200ms (symulacja komputerowa).

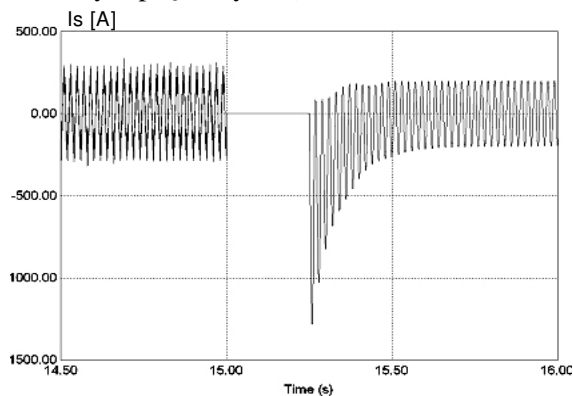
Czas martwy działania łącznika elektromechanicznego na rysunku 9, przykładowo wynosi 200ms. Dla krótszych czasów zadziałania udar prądowy przełączania jest bez zmian. Przykładowo na rysunku 10 wynosi 100ms. Przetężenie w tym wypadku wynosi około 800A, jest mniejsze od prądu nominalnego silnika i uznane za bezpieczne.



Rys.10. Przebieg czasowy prądu fazowego stojana silnika w czasie przełączenia na sieć zasilającą, z uwzględnieniem czasu martwego 100ms (symulacja komputerowa).

Powyższy problem wynika z różnicy wartości napięcia indukowanego w stojanie a napięciem sieci zasilającej. Po odłączeniu falownika od

stojana silnika, zaczyna zanikać strumień wirnika, pod wpływem, którego w uzwojeniu stojana indukuje się siła elektromotoryczna. Znikanie siły elektromotorycznej indukowanej w stojanie odbywa się, zatem ze stałą czasową wirnika. Celem zmniejszenia różnicy napięć indukowanego i sieci w chwili przełączenia, należy przed planowanym załączeniem do sieci zwiększyć strumień wirnika w silniku. Znając czas potrzebny na zadziałanie łącznika elektromechanicznego i stałą czasową obwodu wirnika w silniku, można obliczyć wymagany poziom przewzbudzenia silnika. Należy przy tym uważać, aby nie doszło do przejścia prądu poza założenie krzywej magnesowania i nasycenia obwodu magnetycznego silnika. Ograniczenie prądu przełączenia dzięki niewielkiemu (5%) przewzbudzeniu pokazane jest na przebiegu czasowym prądu (rys.11)



Rys.11. Przebieg czasowy prądu stojana silnika przy przełączaniu na sieć zasilającą z przewzbudzeniem (symulacja komputerowa).

Przedstawiona powyżej metoda redukcji prądu przy przełączeniu, polegająca na zwiększeniu strumienia wirnika ponad jego wartość nominalną, jest jedynie propozycją rozwiązania problemu. Prace nad badaniem słuszności i bezpiecznego stosowania zaproponowanej metody trwają.

#### 4. Wnioski

Przeprowadzone analizy i badania symulacyjne, wstępnie potwierdziły poprawność sposobów ograniczenia udaru prądowego, przy przełączeniu z falownika na sieć zasilającą. Atrakcyjne wydaje się również zastosowanie falownika do przeprowadzenia procesu rozruchu. Elementy energoelektroniczne, pozwalają już na dzień dzisiejszy, zrealizować proponowany falownik napięcia do rozruchu silników dużej mocy. Jedynym ograniczeniem jest tu częstotliwość

przełączania zaworów półprzewodnikowych, która dla takich mocy nie jest większa niż 1kHz.

#### 5. Literatura

- [1]. Kaźmierkowski M.P. „Sterowanie polowo-zorientowane czy regulacja bezpośrednia momentu silnika klatkowego”, Elektronizacja 2, 1998.
- [2]. Tunia H. Kaźmierkowski M.P. „Automatyka napędu przekształtnikowego”, PWN, Warszawa 1987.
- [3]. Krzemiński Z. „Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi”, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2001.
- [4]. Tae-Won C. Meong-Kyu C. Bose B. K. „A novel startup scheme of stator-flux-oriented vector-controlled induction motor drive without torque jerk”, IEEE Trans. Ind. Electron. vol.39, no.3 may/june 2003.
- [5]. „Implementation of a speed field orientated control of three phase AC induction motor using TMS320F240”, Texas Instruments Europe March 1998.
- [6]. Hazzab A. Bousserhane I. K. Kamli M. ” Design of a fuzzy sliding mode controller by genetic algorithms for induction machine speed control”, International Journal of Emerging Electric Power Systems, Volume 1, Issue 2 2004 Article 1008

#### Autorzy

mgr inż. Marcin Grzeczkowicz, prof. dr hab. Włodzimierz Koczara, dr inż. Zbigniew Szulcz, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel. 660 79 45, fax. 622 69 56  
 email: [grzeczkm@isep.pw.edu.pl](mailto:grzeczkm@isep.pw.edu.pl)  
 email: [koczara@isep.pw.edu.pl](mailto:koczara@isep.pw.edu.pl)  
 email: [szulcz@isep.pw.edu.pl](mailto:szulcz@isep.pw.edu.pl)