

Robert Dziuba, Andrzej Kundera, Marek Niewiadomski

# Asynchroniczny napęd tramwaju z falownikami IGBT

**Rozwój energoelektroniki i zaawansowanych technologii, wykorzystywanych do sterowania układów przekształtnikowych, umożliwiły zbudowanie napędów trakcyjnych z silnikami prądu zmiennego. Zastąpienie napędu prądu stałego, przez napęd prądu zmiennego, pozwala zredukować koszty utrzymania w ruchu pojazdów napędzanych elektrycznie. Silniki klatkowe, stosowane w napędzie prądu zmiennego, charakteryzują się prostą i niezawodną konstrukcją, niskim kosztem wykonania, zwartą zabudową oraz łatwością obsługi i serwisu.**

W porównaniu z silnikami prądu stałego, silniki prądu zmiennego charakteryzują się również wielokrotnie większą trwałością, co

wpływa w istotny sposób na problemy eksploatacyjne układu napędowego. Silniki prądu stałego używane w napędach tramwajowych wymagają przeglądu przeciętnie raz w miesiącu, natomiast silniki prądu przemiennego – raz na 3 lata. Ścierające się elementy styków komutatorów, stosowanych w silnikach prądu stałego, muszą być okresowo wymieniane na nowe. Przeglądy silników prądu zmiennego polegają na sprawdzeniu stanu izolacji i uzwojeń. Pierwszy remont silnika prądu zmiennego wykonuje się z reguły po kilkunastu latach eksploatacji.

W 2003 r., w firmie Medcom został zbudowany prototyp układu napędowego prądu zmiennego, wykorzystany do modernizacji tramwajów typu 105N. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych technologii energoelektronicznych i najnowszych technologii inżynierii sterowania układów przekształtnikowych uzyskano doskonałe właściwości jezdne i użytkowe układu napędowego.

## Opis układu

Układ napędowy tramwaju 105N, złożonego z dwóch wagonów, składa się z czterech falowników i ośmiu silników klatkowych.

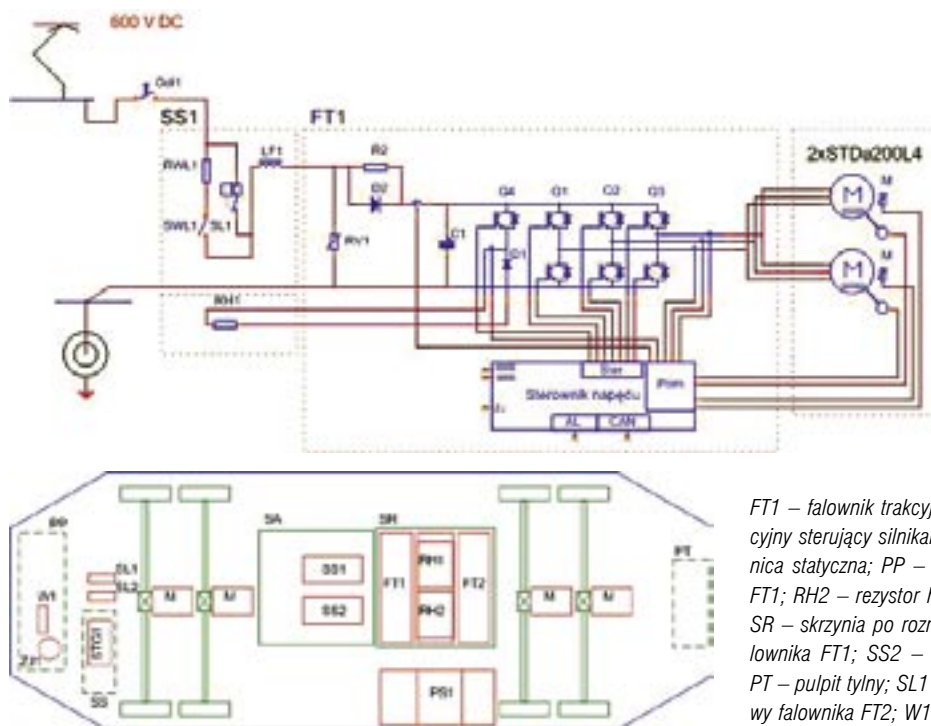
## Układ falownika

Falownik trakcyjny składa się z:

- trójfazowego mostka tranzystorowego – moduły IGBT Q1, Q2, Q3;
- układu hamowania elektromagnetycznego – moduł Q4, dioda D1 i rezystor hamowania RH;
- filtra – bateria kondensatorów C1, dławik LF1 (umieszczony w skrzyni aparatuwej), dioda D2 i rezystor R2;
- układu sterowania, w skład którego wchodzi: zasilacz pokładowy, obwody we/wy oraz modulator PWM, wytwarzający sygnały do sterowania kluczami tranzystorowymi; sterowanie przekształtnikiem jest realizowane w technologii DSP (Digital Signal Processor);
- zespołu czujników do pomiaru parametrów falownika.



Rys.1. Napęd trakcyjny ANT-100-600 produkcji MEDCOM



Rys. 2. Schemat ideowy falownika napędowego i rozmieszczenie urządzeń w wagonie

FT1 – falownik trakcyjny sterujący silnikami M1 i M2; FT2 – falownik trakcyjny sterujący silnikami M3 i M4; M – silniki napędowe; PS1 – przetwornica statyczna; PP – pulpit przedni; RH1 – rezystor hamowania falownika FT1; RH2 – rezystor hamowania falownika FT2; S.A. – skrzynia aparatuwa; SR – skrzynia po rozruszniku; SS – szafa sterownicza; SS1 – soft start falownika FT1; SS2 – soft start falownika FT2; STG1 – sterownik główny; PT – pulpit tylny; SL1 – stycznik liniowy falownika FT1; SL2 – stycznik liniowy falownika FT2; W1 – wyświetlacz; ZJ1 – zadajnik jazdy

Tablica 1

**Parametry falownika trakcyjnego**

Napięcie znamionowe wejściowe	600 V DC (+25% -30%)
Napięcie pomocnicze	40 V DC (+10% -40%)
Prąd znamionowy	180 A rms
Prąd maksymalny	360 A rms
Moc znamionowa	100 kW
Częstotliwość	0 ÷ 130 Hz
Wytrzymałość izolacji	2,8 kV
Chłodzenie	wymuszone, zewnętrzne

Tablica 2

**Parametry silnika trakcyjnego STDa200L4**

Moc znamionowa	50 kW
Prędkość znamionowa	1917 obr/min
Prędkość maksymalna	4875 obr/min
Częstotliwość znamionowa	65 Hz
Napięcie znamionowe	380 V
Prąd znamionowy	88 A
Współczynnik mocy	0,92
Sprawność	94%
Moment bezwładności J	0,4 kgm <sup>2</sup>
Czujnik prędkości	indukcyjny

**Układ sterujący**

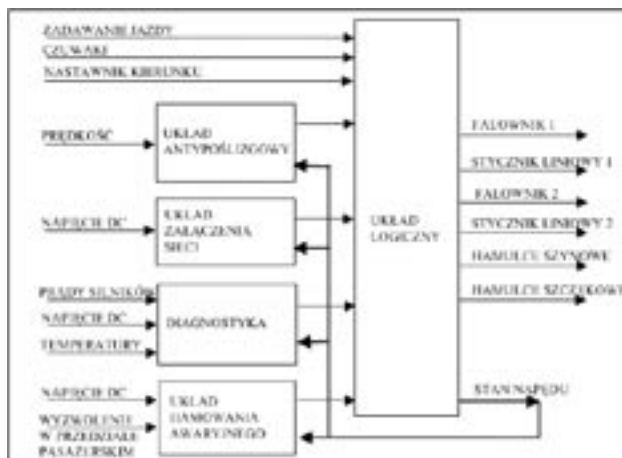
Każdy falownik jest wyposażony w sterownik cyfrowy z procesorem DSP. Sterownik falownika generuje sygnały sterujące dla kluczy energoelektronicznych falownika oraz układu rezystora hamowania. W każdym wagonie znajduje się także sterownik nadrzędny, który generuje sygnały zadające dla poszczególnych falowników i realizuje następujące funkcje:

- sterowanie antypoślizgowe, zapobiegające poślizgowi kół;
- sterowanie stycznikami załączającymi falowniki do sieci;
- odłączenie napędu od sieci przy zwarcjach w sieci;
- hamowanie awaryjne po zaniku napięcia sieci;
- hamowanie awaryjne po uruchomieniu hamulca w przedziałach pasażerskich;
- sterowanie hamulcami mechanicznymi, tj. hamulcami szczękowymi i hamulcami szynowymi;
- diagnostyka stanów awaryjnych i stanów szczególnych napędu.

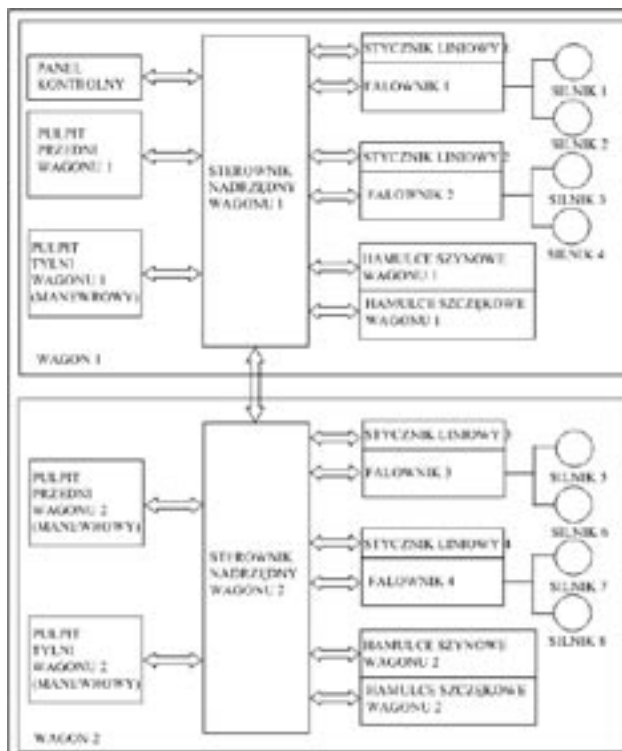
Wymiana informacji między urządzeniami jest dokonywana za pośrednictwem magistrali CAN. Istotne dla bezpieczeństwa sygnały są przesyłane za pomocą połączeń kablowych.

Bardzo istotną cechą nowoczesnych układów napędowych jest możliwość eliminowania szczególnych stanów napędu, takich jak poślizgi przy ruszaniu i hamowaniu. W szczególności poślizg przy ruszaniu, w warunkach oblodzenia lub zanieczyszczenia torów przez liście, może całkowicie uniemożliwić dalszą jazdę. Poślizg jest szczególnie niekorzystny w układach z silnikami prądu stałego, gdzie występuje bardzo niebezpieczne zjawisko tzw. okrężnego ognia komutatora, które w krótkim czasie powoduje nieodwracalne uszkodzenie wirnika. W układach z silnikami asynchronicznym zjawisko to nie występuje, ze względu na wyeliminowanie układu komutatora w konstrukcji silnika.

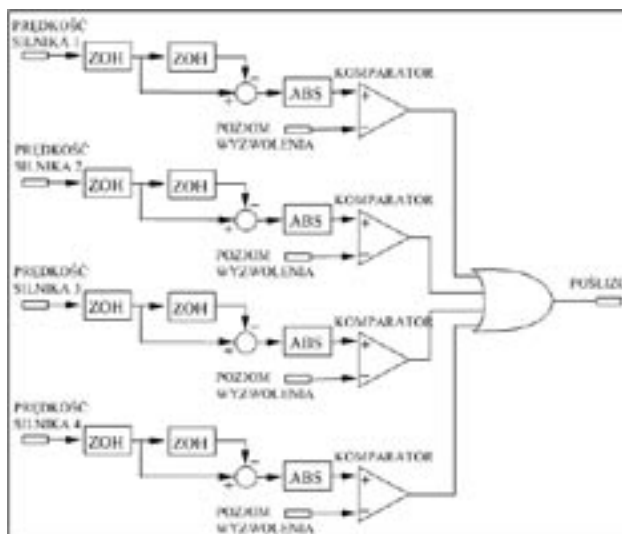
W układzie napędowym firmy Medcom funkcje antypoślizgowe są zrealizowane w programie mikroprocesorowego sterownika nadrzędnego. Układ antypoślizgowy identyfikuje stan poślizgu kół



Rys. 3. Funkcje realizowane przez sterownik nadrzędny



Rys. 4. Elementy układu sterującego



Rys. 5. Układ identyfikacji poślizgu

pojazdu poprzez pomiar przyspieszenia (opóźnienia) kół. W momencie poślizgu bezwzględna wartość przyspieszenia gwałtownie wzrasta powyżej poziomu wyzwalania. Po zidentyfikowaniu poślizgu następuje chwilowe „wycofanie” zadawania momentu napędowego tak, aby wartość współczynnika przyczepności kół do szyn mogła się zwiększyć. W ten sposób poślizg zostaje zlikwidowany w układzie sterowania, bez konieczności stosowania dołączanego sypania piasku pod koła.

W konstrukcjach pojazdów tramwajowych bardzo istotnym problemem, występującym już na etapie projektowania napędu, jest zapewnienie bezpieczeństwa dla pasażerów. Istotne znaczenie dla bezpieczeństwa ma efektywność hamowania w całym zakresie prędkości pojazdu. Dla zapewnienia bezpieczeństwa podróżujących tramwajem ludzi, jak i bezpieczeństwa innych uczestników ruchu, jest dedykowanych wiele rozwiązań – są to układy:

- hamowania awaryjnego po zaniku napięcia sieci,
- hamulca awaryjnego w przedziałach pasażerskich,
- czuwaków śledzących zachowania motorniczego (deadman system).

Wszystkie te układy mają za zadanie jak najszybsze zatrzymanie pojazdu w stanach zagrażających bezpieczeństwu ludzi.

Układ czuwaków składa się z zespołu styków normalnie otwartych, które są zwierane przez motorniczego w czasie jazdy. Jeden styk czuwaka jest zazwyczaj umieszczany w manetce zadajnika jazdy w ten sposób, że ręka motorniczego zamyka ten styk w czasie normalnej jazdy. W przypadku zaślubienia motorniczego (utrąty zdolności kierowania pojazdem), następuje zwolnienie styku czuwaka i układ sterownika nadrzędnego dostaje informację o stanie zagrażającym bezpieczeństwu pasażerów, co umożliwia automatyczne wyhamowanie pojazdu.

## Właściwości asynchronicznego układu napędowego z tranzystorami IGBT

Układ napędowy ma następujące właściwości:

- efektywne hamowanie elektrodynamiczne w całym zakresie prędkości,
- zadawanie momentu napędzającego i hamującego,
- hamowanie awaryjne przy braku napięcia sieci,
- praca w szerokim zakresie napięć sieci,
- doskonała regulacja chwilowej wartości prądu silnika,
- ograniczenie chwilowych wartości prądu sieci,
- stała częstotliwość łączeń tranzystorów w całym zakresie prędkości,
- wewnętrzna diagnostyka stanów awaryjnych napędu,
- bezpieczny przejazd międzysekcyjny,
- sterowanie z pulpitu tylnego i przedniego (w obydwu wagonach) w czasie jazd manewrowych.

Zaawansowane algorytmy sterowania silników prądu zmiennego umożliwiają płynne zadawanie momentu napędzającego, jak i momentu hamującego silników. W ten sposób uzyskuje się hamowanie elektrodynamiczne w całym zakresie prędkości obrotowej. Wartość momentu hamującego jest taka sama, jak wartość momentu napędzającego dla danej prędkości pojazdu.

W przypadku zaniku napięcia sieci, układ sterowania napędu wykrywa taki stan i powoduje awaryjne wyhamowanie pojazdu. stycznik liniowy zostaje odłączony, a silniki są automatycznie wysterowane w ten sposób, że przechodzą w pracę generatorową, do chwili całkowitego zatrzymania pojazdu. W czasie hamowania

awaryjnego energia kinetyczna rozpedzonego tramwaju zamienia się na energię elektryczną (silniki elektryczne pracują w trybie generatorowym). Nadmiar energii jest rozpraszany w rezystorach hamujących.

Przy zmieniających się – w szerokim zakresie – wartościach napięcia sieci tramwajowej, układ sterowania falowników umożliwia poprawną pracę napędu nawet przy skrajnie niskim poziomie napięcia zasilania. W ten sposób możliwa jest awaryjna jazda tramwaju przy minimalnej wartości napięcia sieci.

Efektywna regulacja wartości prądu pozwala na wyeliminowanie chwilowych przetężeń prądowych, i w rezultacie na przedłużenie żywotności urządzeń i silników. Podstawową składową prądu silników – w każdym momencie pracy urządzenia – jest składowa sinusoidalna. W efekcie z sieci pobierany jest minimalny prąd, potrzebny do wytworzenia przez silniki niezbędnego momentu. Moc czynna pobierana przez silniki jest ograniczana dzięki odpowiedniemu sterowaniu falowników.

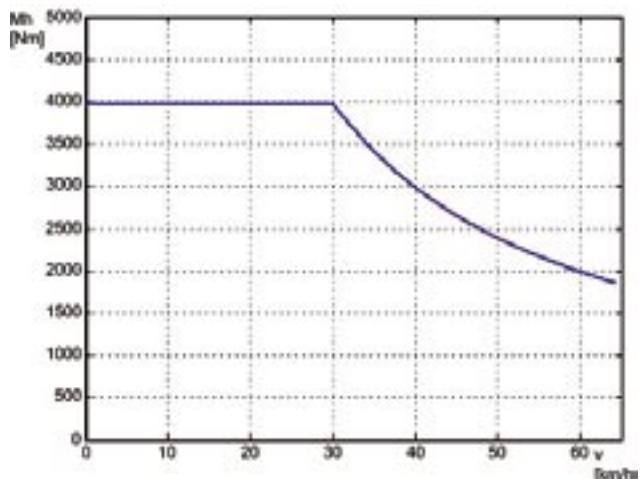
Zastosowanie modulacji wektorowej SVPWM (Space Vector PWM) umożliwiło optymalne wysterowanie falowników przy stałej częstotliwości łączeń. Liczba łączeń jest minimalna, co powoduje ograniczenie łączeniowych strat mocy w falownikach.

W pełni cyfrowy i swobodnie programowalny układ sterujący jest wyposażony w szereg funkcji diagnostycznych, które zwiększają bezpieczeństwo i niezawodność całego napędu.

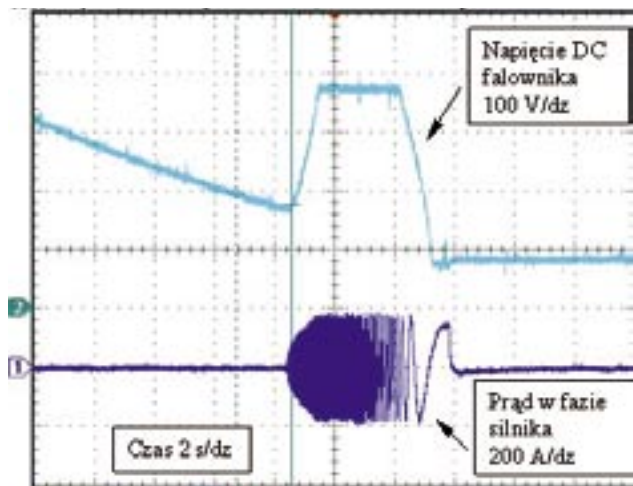
Wszystkie urządzenia składające się na układ napędowy są wyposażone w interfejsy CAN. Informacje o stanie dowolnej części układu są dostępne w całym systemie. W ten sposób możliwa jest odpowiednia, automatyczna reakcja układu w stanach awaryjnych, lub w stanach szczególnych napędu. Na przykład, stanem szczególnym napędu może być przejazd pod izolatorem międzysekcyjnym, kiedy następuje chwilowy zanik napięcia sieci. Układ sterowania jest w stanie zidentyfikować taki stan i odpowiednio zareagować, eliminując niepotrzebne przetężenia i przepięcia.

## Zastosowanie

Opisany układ napędowy został zastosowany i zweryfikowany w układzie tramwaju typu 105N, składającym się z dwóch wagonów trakcyjnych. Przeprowadzone testy urządzenia w warunkach rzeczywistej pracy potwierdziły doskonale właściwości jezdne i użytkowe urządzenia.



Rys. 6. Wartości maksymalne momentu napędzającego i momentu hamującego w zależności od aktualnej prędkości pojazdu



Rys. 7. Hamowanie awaryjne po zaniku napięcia sieci w stanie jazdy wybiegiem pojazdu

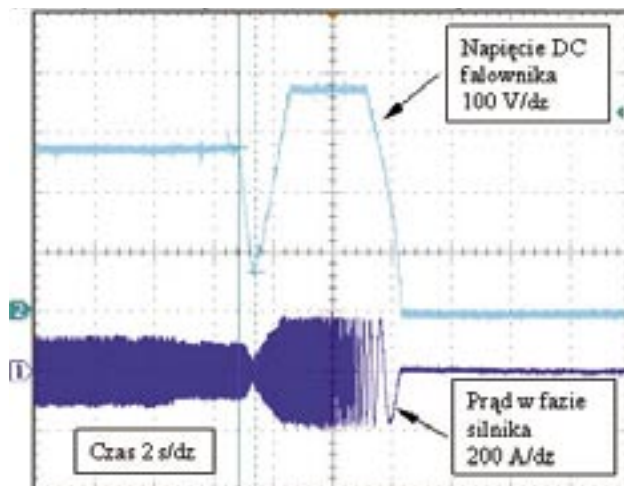
Potencjalne zastosowanie tego napędu wykracza poza rodzinę tramwajów 105N. Dzięki modułowej budowie i w pełni cyfrowemu sterowaniu urządzenie może być wykorzystane w napędach innych typów tramwajów, jak i napędach trakcyjnych większych mocy. Układ jest przystosowany do zastosowania w pojazdach składających się z trzech i większej liczby wagonów trakcyjnych.

Topologia falowników i silników może być zmieniona bez pogorszenia właściwości jezdnych całego pojazdu. Na przykład możliwe jest zasilanie z tego samego falownika tylko jednego, zamiast dwóch silników. W przypadku konfiguracji „jeden falownik – jeden silnik”, moc silnika może być dwukrotnie zwiększona w stosunku do mocy jednego silnika w konfiguracji „jeden falownik – dwa silniki”.



#### Literatura

- [1] Maciotek T.: *Zworniki napięciowe wielokrotnego działania w obwodach uszynienia...*. Międzynarodowa Konferencja Techniczna „Nowoczesne rozwiązania techniczne w komunikacji tramwajowej”. Wrocław 30.05–2.06.2000 r.
- [2] Mierzejewski L., Szelaż A.: *Sieci powrotne zelektryfikowanego szynowego transportu miejskiego*. Międzynarodowa Konferencja Techniczna „Nowoczesne rozwiązania techniczne w komunikacji tramwajowej”. Wrocław 30.05–2.06.2000 r.
- [3] Kacprzak J.: *Trakcja elektryczna – przegląd zagadnień*. Seminarium: Wybrane zagadnienia z elektrotechniki i elektroniki. PTETIS. Kielce – Ameliówka 2000.
- [4] Sone S.: *Rozwój hamowania elektrycznego w Japonii*. Conference Proceedings: Modern Electric Traction in Regional and Urban Transport. MET 2001 r.
- [5] Zając W., Czuchra W., Popczyk M.: *Pomiary harmonicznych prądu podstacji trakcyjnych obciążonych lokomotywą przekształtnikową*. Conference Proceedings: Modern Electric Traction in Regional and Urban Transport. MET 2001 r.
- [6] Czucha J., Kowalak R., Maćkiewicz R.: *Wyłączenie prądu zwarcia w sieci trakcyjnej przez urządzenia silnie ograniczające*. Conference Proceedings: Modern Electric Traction in Regional and Urban Transport. MET 2001 r.



Rys. 8. Hamowanie awaryjne po zaniku napięcia sieci w czasie przyspieszania pojazdu

- [7] Sałasiński M., Sikorski Ł.: *Nowoczesne metody kontroli stanu izolacji oraz wykrywania zakłóceń w napędach trakcyjnych oraz układach zasilających sterowniczych*. Conference Proceedings: Modern Electric Traction in Regional and Urban Transport. MET 2001 r.
- [8] Tunia H., Winiarski B.: *Energoelektronika*. WNT 1994.
- [9] Szczepny R.: *Komputerowa symulacja układów energoelektronicznych*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 1999.
- [10] Leonarski J.: *Analiza pracy trójfazowego sinusoidalnego falownika napięcia z przewodem neutralnym (praca doktorska)*. Warszawa 2002.
- [11] Orłowska-Kowalska T., Migas P.: *Neuronowy estymator strumienia i prędkości silnika indukcyjnego odporny na zmiany parametrów*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 1999.
- [12] Koczara W., Matraszek J., Seliga R.: *Adjustable Frequency Controlled Waveform Voltage Generated by the DC-to-AC Converters*. PEMC'98 Prague.
- [13] Koczara W.: *Kaskadowe układy napędowe z przekształtnikami tyrystorowymi*. WNT 1978.
- [14] Gopal K. Dubey: *Fundamentals of Electrical Drives*. Second Edition 2001 r.
- [15] Grabowski P.: *Direct Flux and Torque Neuro-Fuzzy Control of Inverter Fed Induction Motor Drives*.
- [16] Sobczuk D.: *Application of ANN for Control of PWM Inverter Fed Induction Motor Drives*.

#### Autorzy

dr inż. Robert Dziuba  
mgr inż. Andrzej Kundera  
mgr inż. Marek Niewiadomski  
Medcom Sp. z o.o.  
02-315 Warszawa, ul. Barska 28/30  
tel. +48 22 6689934