

EMIL GMURCZYK, ANDRZEJ KUNDERA,
MAREK NIEWIADOMSKI, TADEUSZ PŁATEK*

NOWOCZESNE ASYNCHRONICZNE NAPĘDY TRAKCYJNE W TECHNOLOGII IGBT

MODERN ASYNCHRONOUS TRACTION PROPULSION IN IGBT TECHNOLOGY

Streszczenie

Napęd asynchroniczny – z licznymi zaletami w porównaniu do napędu DC – jest przyszłością w kolejnictwie. Jego przewagą nad napędem DC stanowią: wyższa trwałość silnika AC, bardzo dobre dynamiczne parametry trakcyjne (rozruch i hamowanie), system kontroli antypoślizgowej, hamowanie elektrodynamiczne nawet przy braku napięcia trakcji i niższe koszty eksploatacji. Seria tranzystorowych napędów asynchronicznych opracowana w firmie MEDCOM została zainstalowana w pojazdach, a ich eksploatacja potwierdziła wysokie parametry użytkowe tych systemów. Praca napędów w zróżnicowanych warunkach klimatycznych (od -36°C do $+38^{\circ}\text{C}$) potwierdziła poprawność wykonanego projektu.

W niniejszym artykule przedstawiono ogólny opis systemu oraz trzy aplikacje: w trolejbusie (170 kW), autobusie szynowym (600 kW) oraz pojeździe czterocłonowym (2 MW).

Słowa kluczowe: napęd trakcyjny, napęd AC, napęd asynchroniczny, sterowanie wektorowe

Abstract

Asynchronous propulsion system – with doubtless advantages against DC propulsion – becomes a prospect solution for electric traction. In comparison to DC propulsion systems their advantages are: higher durability of AC motors, very good traction parameters dynamics of start-up and breaking), antislip control, electrodynamic braking without the presense of traction voltage and lower operation costs.

A series of transistor asynchronous propulsion systems designed in MEDCOM enabled a number of applications which confirmed high parameters of those systems. Operation of these systems in this year's climatic conditions (temperature range -36°C -38°C) proved their high resistance against difficult climatic environment.

This article presents a general description of designed AC propulsion and block diagrams of propulsion for: trolleybus (170 kW), rail-bus (600 kW) and 4-car electrical multiple unit (2 MW).

Keywords: traction propulsion system, AC drive, asynchronous drive, vector control

* Mgr inż. Emil Gmurczyk, mgr inż. Andrzej Kundera, mgr inż. Marek Niewiadomski, dr inż. Tadeusz Płatek, MEDCOM Sp. z o.o., Warszawa.

1. Wstęp

Napędy asynchroniczne – charakteryzujące się niewątpliwymi zaletami w stosunku do napędów prądu stałego – są obecnie perspektywicznym rozwiązaniem dla trakcji elektrycznej. Wielokrotnie większa trwałość silników AC, bardzo dobre parametry jezdne (dynamika rozruchu i hamowania), sterowanie antypoślizgowe, hamowanie elektrodynamiczne przy braku zasilania trakcyjnego, niższe koszty eksploatacji w porównaniu z napędami DC to tylko niektóre z cech asynchronicznych napędów trakcyjnych.

Opracowana w firmie MEDCOM seria tranzystorowych napędów asynchronicznych umożliwiła realizację wielu wdrożeń, które potwierdziły wysokie parametry tego typu napędów. Kolejnymi wdrożeniami były takie napędy, jak:

- tramwaj 105N (2 falowniki 100 kW oraz 4 silniki 50 kW – w jednym wagonie),
- elektryczny zespół trakcyjny EN95 (4 falowniki 300 kW oraz 4 silniki 300 kW),
- trolejbus PR110 (falownik 170 kW oraz 1 silnik 170 kW),
- autobus szynowy EN81 (2 falowniki 300 kW oraz 2 silniki 280 kW),
- elektryczny zespół trakcyjny ED74 (4 falowniki 500 kW oraz 4 silniki 500 kW).

Pierwsze dwa napędy były już przedstawione na Konferencji SEMTRAK-2004. Obecnie z nowymi napędami asynchronicznymi eksploatowanych jest 6 wagonów 105N (pierwsze dwa przejechały już po ok. 350 tys. km) oraz jeden zespół EN95. Eksploatacja potwierdza bardzo dobre parametry napędów oraz wysoką niezawodność przyjętych rozwiązań technicznych.

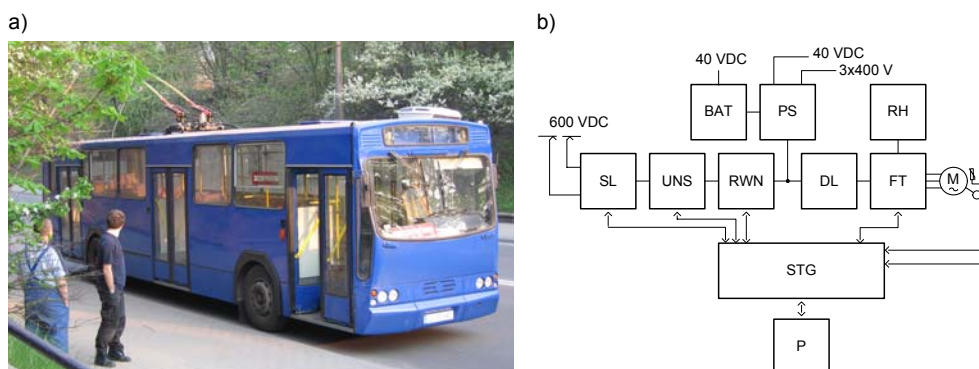
Poniżej zostaną przedstawione kolejne systemy napędowe firmy MEDCOM, które są obecnie stosowane w eksploatowanych pojazdach trakcyjnych.

Wspólnymi cechami opracowanych napędów są:

- najnowszej generacji tranzystory HV IGBT,
- cyfrowy system sterowania w technologii DSP (*Digital Signal Processor*),
- metoda sterowania FOC SVPWM (*Field Orientation Control Space Vector Pulse Width Modulation*),
- antypoślizgowe sterowanie momentem napędowym poszczególnych osi pojazdu,
- silniki asynchroniczne z przetwornikami prędkości obrotowej i temperatury,
- efektywne hamowanie elektrodynamiczne w całym zakresie prędkości pojazdu,
- hamowanie awaryjne przy braku napięcia w sieci trakcyjnej,
- zwrot energii do sieci podczas hamowania, z wytracaniem nadmiaru energii w rezystorach hamowania (po przekroczeniu maksymalnej wartości napięcia rekuperacji),
- praca przy szerokim zakresie zmian napięcia w sieci trakcyjnej,
- diagnostyka i rejestracja stanów awaryjnych falownika i przetwornicy statycznej,
- wymuszone chłodzenie powietrzne podzespołów systemu napędowego,
- niski poziom hałasu.

2. Napęd trolejbusu PR110

Trolejbus PR110 (ryc. 1a), zasilany z trakcji 600 VDC, został wyposażony w napęd asynchroniczny o mocy 170 kW, którego schemat blokowy przedstawiono na ryc. 1b.



Ryc. 1. Trolejbus PR110: a) widok pojazdu, b) schemat blokowy napędu: SL – stycznik liniowy, BAT – bateria akumulatorów, UNS – układ nawrotnika sieci, PS – przetwornica statyczna PSM-8T, RWN – rozdzielnia WN, RH – rezystor hamowania, DL – dławik filtra sieciowego, STG – sterownik główny, FT – falownik FT170-600, P – pulpit kierowcy, M – silnik asynchroniczny

Fig. 1. PR110 trolleybus: a) view of the bus, b) block diagram of the propulsion system: SL-Line contactor, BAT – battery, UNS – pole reverser, PS – static converter PSM-8T, RWN – HV switchgear, RH – brake resistor, DL – line filter choke, STG – main controller, FT – FT 170-600 inverter, P – driver desk, M – asynchronous motor

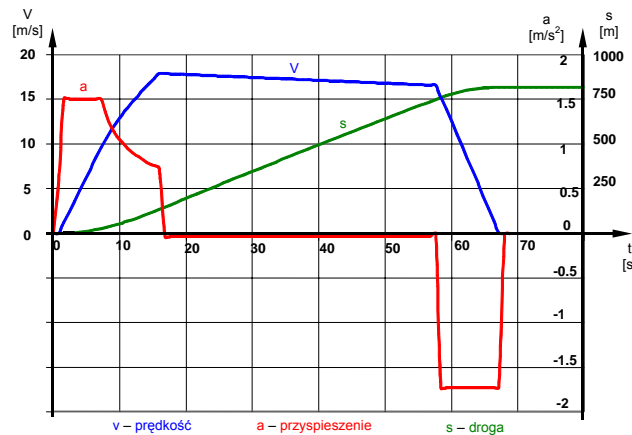
Wszystkie podzespoły, ze względu na niewielkie gabaryty, zostały umieszczone wewnątrz pojazdu, w skrzyni po rozruszniku rezystorowym (perspektywicznie możliwy jest wariant zabudowy na dachu pojazdu). W układzie sterowania ograniczono prędkość jazdy do 65 km/h (przy maks. możliwej do uzyskania 100 km/h), zachowując bardzo dobrą dynamikę rozruchu i hamowania.

Zastosowany elektroniczny układ nawrotnika umożliwi płynną jazdę przy zmianach biegunowości sieci trakcyjnej.

Tablica 1

Podstawowe parametry dynamiczne napędu

| | |
|---|----------------------|
| Moment znamionowy odniesiony do wału silnika | 1414 Nm |
| Przyspieszenie pojazdu przy rozruchu do prędkości 35 km/h | 1,5 m/s ² |
| Opóźnienie pojazdu przy hamowaniu | 1,7 m/s ² |
| Opóźnienie pojazdu przy hamowaniu bezpieczeństwa | 3 m/s ² |
| Prędkość maksymalna liniowa pojazdu przy stałym momencie | 35 km/h |
| Prędkość maksymalna liniowa pojazdu przy stałej mocy | 65 km/h (18 m/s) |



Ryc. 2. Charakterystyki trakcyjne trolejbusu PR110 z falownikiem FT170-600

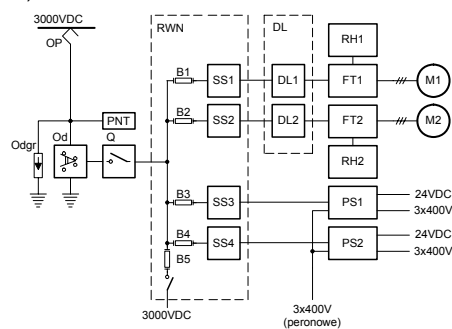
Fig. 2. Traction curves of PR110 trolleybus with FT170-600 inverter

Przedstawiony układ napędowy spełnia wszystkie normy europejskie w zakresie bezpieczeństwa oraz zakłóceń radiowych.

a)



b)



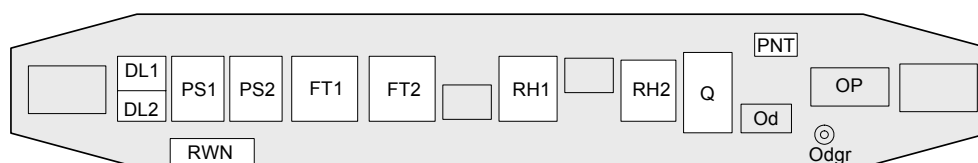
Ryc. 3. Jednoczłonowy pojazd trakcyjny EN81: a) widok pojazdu, b) schemat blokowy napędu: Odgr – odgromnik wejściowy, DL1-2 – dławiki indukcyjne, Od – odłącznik uziemiający, RH1-2 – rezystory hamowania, PNT – pomiar napięcia trakcyjnego, FT1-2 – falowniki napędowe FT300-3000, Q – szybki wyłącznik wejściowy, PS1-2 – przetwornice statyczne PSM-40, B1-5 – bezpieczniki w rozdzielni WN, M1-2 – silniki asynchroniczne, SS1-4 – układy „soft-startu”

Fig. 3. Single-module coach EN81: a) view of the train, b) block diagram of the propulsion system: Odgr – input lightning protection, DL1-2 – chokes, Od – grounding switch, RH1-2 – brake resistors, PNT – line voltage measurement, FT1-2 – FT300-3000 inverters, Q – high speed circuit breaker, PS1-2 – static converters PSM-40, B1-5 – fuses in HV switchgear, M1-2 – asynchronous motors, SS1-4 – soft-start circuits

3. Napęd autobusu szynowego EN81

Jednoczłonowy pojazd trakcyjny EN81 (ryc. 3a), zasilany z tracji 3000 VDC, został wyposażony w napęd asynchroniczny o mocy 600 kW, którego schemat blokowy przedstawiono na ryc. 3b.

Wszystkie podzespoły układu napędowego, z wyjątkiem silników, zostały rozmieszczone na dachu pojazdu (ryc. 4).



Ryc. 4. Rozmieszczenie podzespołów na dachu pojazdu EN81

Fig. 4. Placement of subassemblies on the roof of EN81

Obecnie w eksploatacji znajdują się cztery autobusy szynowe, z których dwa przejechały już powyżej 100 tys. km. Maksymalna prędkość jazdy została ograniczona do 120 km/h przy zachowaniu zakładanych parametrów dynamiki jazdy.

Tablica 2

Podstawowe parametry dynamiczne napędu

| | |
|--|-----------------------|
| Moment maksymalny odniesiony do wału silnika | 2159 Nm |
| Przyspieszenie wagonu przy rozruchu do prędkości 25 km/h | 0,65 m/s ² |
| Opóźnienie wagonu przy hamowaniu | 1,1 m/s ² |
| Prędkość maksymalna liniowa wagonu przy stałej mocy | 120 km/h (33 m/s) |

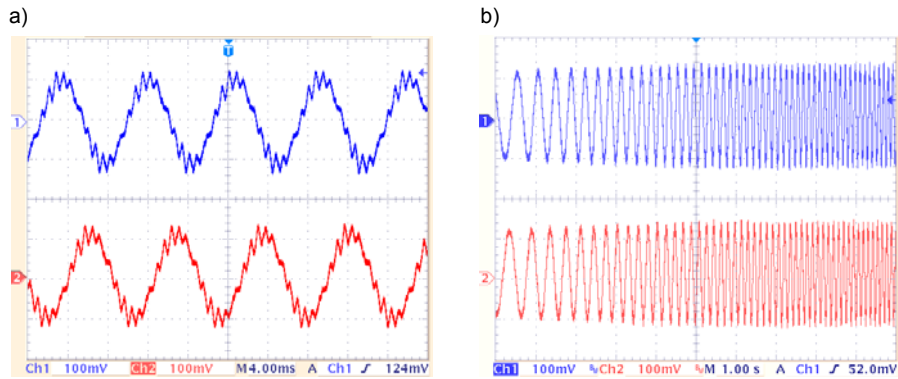
Zastosowane falowniki FT300-3000 zostały wykonane w technologii HV IGBT 6,5 kV.

Rezystory hamowania wykonane ze stali nierdzewnej gwarantują wysoką trwałość oraz niski poziom hałasu. Dzięki zastosowaniu systemu „busbar’s” oraz wysokiej klasy drivera IGBT zapewniona została bezawaryjna praca przy zwarciach w obwodzie wyjściowym falownika oraz eliminacja uszkodzeń wtórnych w następstwie awarii tranzystora.

Falownik spełnia normy UIC oraz normy EN w zakresie bezpieczeństwa i kompatybilności elektromagnetycznej. Układ napędowy charakteryzuje się bardzo niskim poziomem zakłóceń niskoczęstotliwościowych generowanych do sieci trakcyjnej.

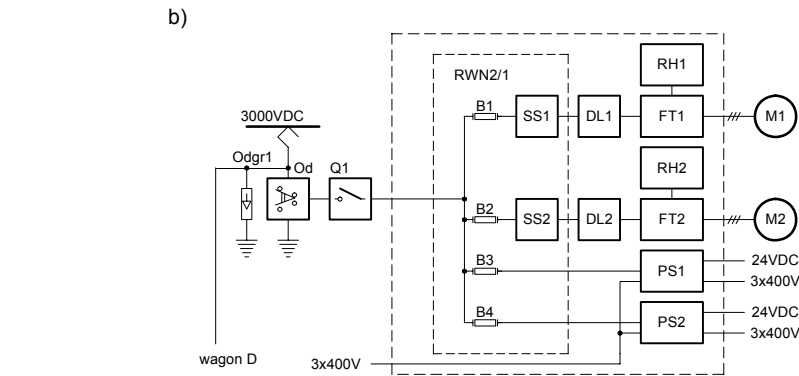
Falownik pracuje poprawnie w zakresie temperatur od -40 do -50°C , a zastosowane wymuszone chłodzenie powietrzem (zamiast z czynnikiem cieczowym) zwiększa niezawodność i obniża koszty eksploatacji pojazdu. Wykonana z aluminium obudowa falownika (IP65) zapewnia odporność na wpływy atmosferyczne (deszcz, śnieg) oraz nasłonecznienie do $650\text{W}/\text{m}^2$.

Na oscylogramach (ryc. 5) przedstawiono przebiegi fazowych prądów dwóch silników napędowych podczas jazdy z szybkością maksymalną (120 km/h) i w trakcie rozruchu. Rozruch przebiega z ograniczeniem maksymalnej wartości prądu do 75 A.



Ryc. 5. Prądy silników: a) przy maksymalnej prędkości, b) podczas rozruchu pojazdu

Fig. 5. Motors currents: a) at maximum speed, b) during start-up



Ryc. 6. Elektryczny zespół trakcyjny ED74: a) widok pojazdu, b) schemat blokowy napędu w członie A: Odgr – odgromnik wejściowy, DL1-2 – dławiki indukcyjne, Od – odłącznik uziemiający, RH1-2 – rezystory hamowania, Q1 – szybki wyłącznik wejściowy, FT1-2 – falowniki napędowe FT500-3000, SS1-2 – układy „soft-startu”, PS1-2 – przetwornice statyczne, B1-4 – bezpieczniki w rozdzielni WN, M1-2 – silniki asynchroniczne

Fig. 6. Electrical Multiple Unit ED-74: a) view of the train, b) block diagram of the propulsion system in A module: Odgr – input lightning protection, DL1-2 – chokes, Od – earth disconnector, RH1-2 – brake resistors, Q – high speed circuit breaker, FT1-2 – FT500-3000 inverters, SS1-2 – precharge circuits, PS1-2 – static converters, B1-4 – fuses in HV switchgear, M1-2 – asynchronous motors

4. Napęd elektrycznego zespołu trakcyjnego ED74

Elektryczny zespół trakcyjny ED74 (ryc. 6a), zasilany z trakcji 3000 VDC, został wyposażony w napęd asynchroniczny o mocy 2000 kW, którego schemat blokowy (dla członu A) przedstawiono na ryc. 6b.

Maksymalna prędkość zespołu ED74 wynosi 160 km/h, przy bardzo dobrych parametrach przyspieszania i hamowania.

Rozwiązania techniczne zastosowane w falownikach FT500-3000 pokrywają się z opisanymi wyżej cechami falowników FT300-3000.

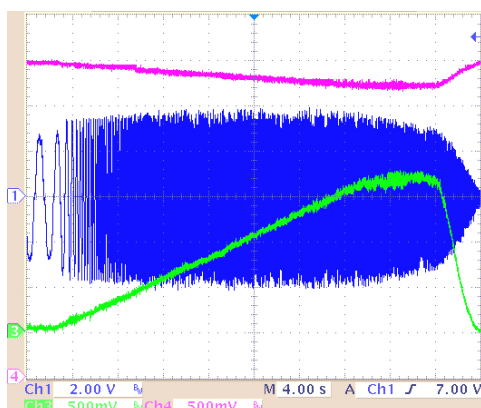
Na oscylogramach przedstawiono (w kolejności „od góry”) przebiegi:

- napięcia sieci trakcyjnej,
- fazowego prądu silnika,
- prądu pobieranego z sieci trakcyjnej.

Tablica 3

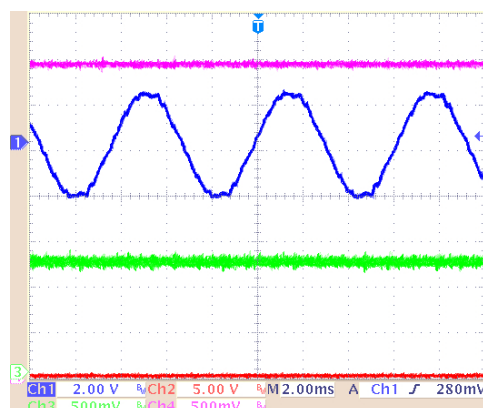
Podstawowe parametry dynamiczne napędu

| | |
|--|----------------------|
| Moment maksymalny odniesiony do wału silnika | 3700 Nm |
| Przyspieszenie wagonu przy rozruchu | 1,2 m/s ² |
| Prędkość maksymalna pojazdu | 160 km/h (44,4 m/s) |



Ryc. 7. Rozruch napędu EZT ED74 do 60 km/h

Fig. 7. Start-up of ED74 drive to the speed of 60 km/h

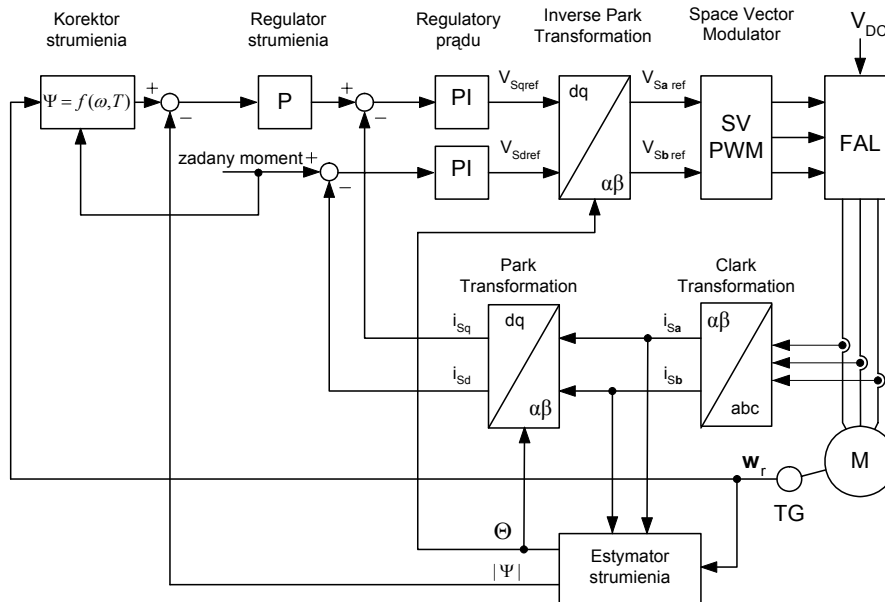


Ryc. 8. Jazda EZT ED74 z prędkością 160 km/h

Fig. 8. Continuous run with the speed of 160 km/h

5. System sterowania napędów asynchronicznych

Na rycinie 9 przedstawiono blokowy schemat układu sterowania zastosowany w omawianych falownikach napędowych.



Ryc. 9. Struktura systemu sterowania napędu asynchronicznego

Fig. 9. Structure of asynchronous propulsion control system

W systemie sterowania zastosowana jest metoda DFOC (*Digital Field Orientation Control*) z modulatorem SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*). Orientacja względem strumienia wirnika pozwoliła na całkowite odprężenie torów regulacji momentu i strumienia. Modyfikacja polegająca na uzależnieniu zadawanego strumienia od zadawanego momentu ma na celu ograniczenie strat oraz nadmiernej dynamiki napędu (szarpanie przy rozruchu i hamowaniu elektrodynamicznym).

W napędach średniego napięcia (3 kV DC) największym problemem przy projektowaniu napędu jest niska częstotliwość łączeń wysokonapięciowych łączników półprzewodnikowych (częstotliwość przełączania tranzystorów poniżej 1 kHz). Ograniczenie średniej częstotliwości łączeń uzyskano za pomocą modulatora typu Bus-Clamping. Synchronizacja modulatora ma na celu wyeliminowanie dudnień oraz ograniczenie poziomu występowania wyższych harmonicznych.

W napędach niskonapięciowych (600 V DC) został zastosowany asynchroniczny modulator SVM ze stałą częstotliwością kluczowania.

W układach napędowych mogą być zastosowane dodatkowe rejestratory napięcia trakcji i parametrów falownika. Pozwalają one na odtworzenie warunków zasilania w przypadku zakłóceń w pracy lub awarii układu napędowego.

Eksploatacja przedstawionych powyżej napędów w warunkach klimatycznych panujących w 2006 r. (od -36 do $+38^{\circ}\text{C}$) potwierdziła ich bardzo dobrą odporność na pracę w szerokim zakresie temperatur otoczenia. Należy dodać, że niezależnie od zapewniania wysokiego komfortu jazdy i aspektów ekonomicznych, napędy asynchroniczne, ze względu na wysoką sprawność (pow. 90%) oraz sterowanie antypoślizgowe, charakteryzują się również cechami proekologicznymi.

Literatura

- [1] Tunia H., Kaźmierkowski M.P., *Automatyka Napędu Przekształtnikowego*, PWN, 1987.
- [2] Khambadkone A., Holz J., *Low Switching Frequency and High Dynamic Pulsewidth Modulation Based on Field – Orientation for High Power Drives*, IEEE Trans. Power Electron., vol. 7, No. 4, October 1992, 627-632.
- [3] Holz J., *Pulsewidth Modulation for electronic power conversion*, Proc. IEEE, August 1994, 1194-1214.
- [4] Kaźmierowski M.P., Tunia H., *Automatic Control of Converter-Fed Drives*, Elsevier 1994.
- [5] Holmes D.G., *The Significance of Zero Space Vector Placement for Carrier-Based PWM Schemes*, IEEE Transaction on Industry Application, vol. 32, No. 5, September/October 1996.
- [6] Narayanan G., Ranganathan V.T., *Synchronised Bus-Clamping PWM Strategies based on Space Vector Approach for Modulation up to Six-Step Mode*, PEDES, 1998,
- [7] Khambadkone A., Holz J., *Fast Current Control for low Harmonic Distortion at Low Switching Frequency*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 45, No. 5, October 1998.
- [8] Hava A.M., Kerkman R.J., Lipo T.A., *Carrier-Based PWM-VSI Overmodulation Strategies: Analysis, Comparison, and Design*, IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 13, No. 4, July 1998.
- [9] Narayanan G., Ranganathan V.T., *Two Novel Synchronized Bus-Clamping PWM Strategies Based on Space Vector Approach for High Power Drives*, IEEE Transactions on Power Electronics, January 2002, 84-93.
- [10] Kaźmierkowski M.P., Krishnan R., Blaabjerg F., *Control In Power Electronics Selected Problems*, Academic Press, 2002.
- [11] Orłowska-Kowalska T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2003.
- [12] Holmes D.G., Lipo T.A., *Pulse Width Modulation for Power Converters Principles and Practice*, John Wiley & Sons, Inc. 2003.
- [13] Holz J., Quan J., Schmitt G., Ponnt O., Rodrigez J., Newman P., Miranda H., *Design of Fast and Robust Current Regulators for High Power Drives based on Complex State Variables*, IEEE Trans. on Ind. App., vol. 40, 2004.
- [14] Barancki A., Dziuba R., Kundera A., Niewiadomski M., *Nowoczesne asynchroniczne napędy trakcyjne*, XI Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2004, Kraków–Zakopane 2004.
- [15] Narayanan G., Ranganathan V.T., *Analytical Evaluation of Harmonic Distortion in PWM AC Drives Using the Notion of Stator Flux Ripple*, IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, No. 42, March 2005, 466-474.
- [16] Gmurczyk E., Kundera A., Niewiadomski M., Płatek T., *Nowoczesne asynchroniczne napędy pojazdów trakcyjnych*, Wiadomości Elektrotechniczne nr 09/2006.