

Wykorzystanie przemiennika częstotliwości w układzie hamowania tłokowego silnika spalinowego

Streszczenie. W pracy opisano sposób wykorzystania przemiennika częstotliwości w układzie hamowania tłokowego silnika spalinowego do wyznaczenia jego mocy indykowanej. Sprawdzone czy i jak dokładnie energia tracona w rezystorze hamowania w ciągu każdego cyklu pracy silnika może być wykorzystana do określenia mocy indykowanej silnika w tym cyklu. Opisano stanowisko badawcze i przedstawiono przykładowy przebieg mocy indykowanej i energii traconej w rezystorze hamującym.

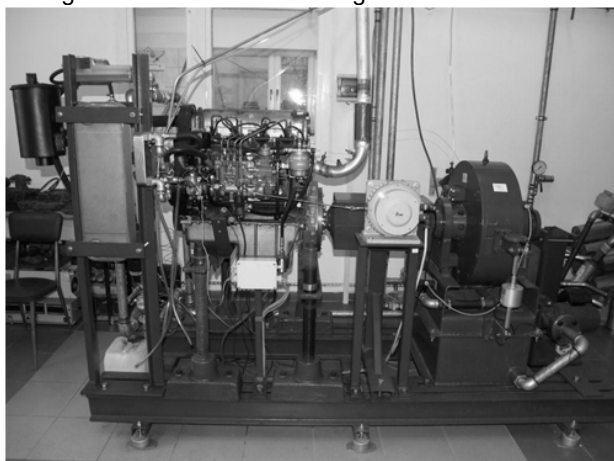
Abstract. The paper describes the use of a frequency converter in the piston braking system of an internal combustion engine to determine its indicated power. It was checked whether and how exactly the energy lost in the braking resistor during each engine operation cycle can be used to determine the indicated engine power in this cycle. The test stand is described and an example of the indicated power and energy lost in the braking resistor is presented. *(The use of an inverter in the braking system of an internal combustion engine)*

Słowa kluczowe: Przemiennik częstotliwości, hamownia silnikowa, moc indykowana, tłokowy silnik spalinowy

Keywords: Frequency converter, engine dynamometer, indicated power, combustion piston engine

Wstęp

Na stanowiskach dydaktycznych i badawczych w laboratoriach hamowni silników spalinowych Katedry Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej wykorzystywanych jest kilka rodzajów układów obciążenia tłokowego silnika spalinowego. Wykorzystywane są głównie maszyny elektryczne do długotrwałego obciążania tłokowych silników spalinowych. Ze względu na wielkość mocy silnika, typu tłokowego silnika spalinowego, charakterystyki prędkościowej prowadzonych testów jak i sposobu oddawania energii w układzie hamulca można wymienić kilka rozwiązań układów hamowni na bazie maszyn elektrycznych. Hamownie te podlegają ciągłym zmianom konstrukcyjnym. Modernizacji podlegają przede wszystkim układy sterowania i rejestracji danych pomiarowych. Na rys.1 przedstawiono standardowe rozwiązanie hamowni silnikowej na bazie hamulca elektrowirowego [1]. Rozwiązanie takie powszechnie stosuje się w laboratoriach silnikowych. Wymaga ono wodnego układu chłodzenia samego hamulca.



Rys.1. Stanowisko badawcze na bazie hamowni silnikowej na bazie hamulca elektrowirowego EMX-10/1800 Firmy Elektromex

Innym przykładem hamowni silnikowej dostępnej na rynku jest hamownia inercyjna stosowana do krótkotrwałych pomiarów i wyznaczania charakterystyk mocy oraz momentu napędowego silników spalinowych w funkcji prędkości obrotowej (rys.2.)



Rys.2. Hamownia silnikowa inercyjna HST-12i Świątek

Istnieją również mobilne hamownie silnikowe wykorzystywane do testowania wolnych jednostek silnikowych lub spalinowych układów napędowych z WOM-em (wał odbioru mocy). Hamownie takie wykorzystywane są głównie do pomiaru silników po zmianach konstrukcyjnych, głównie w celu dotarcia mechanicznego (rys. 3) [2,3].



Rys.3. Mobilna hamownia WOM Egger PT170 z hamulcem elektrowirowym (retarder) chłodzonym powietrzem do testowania ciągnikowych silników spalinowych do 300kW

Rodzaje układów hamowni silnikowych z wykorzystaniem maszyn elektrycznych

Pierwszym układem hamowni silników spalinowych jest najprostszy układ z wykorzystaniem elektrycznej maszyny asynchronicznej. Silnik spalinowy pracuje na sztywno poprzez przekładnię pasową lub wał z maszyną asynchroniczną (silnik klatkowy), która jest podpięta do sieci zasilającej. Stanowisko to wykorzystywane jest głównie do testów silnika spalinowego przy stałej prędkości obrotowej z uwzględnieniem możliwości ewentualnych zmian prędkości na przekładni pasowej. W pomiarach pomija się chwilowe zmiany prędkości obrotowej układu napędowego wynikające ze zmian poślizgu maszyny asynchronicznej. Energia elektryczna oddawana jest bezpośrednio do sieci. Wykorzystywana maszyna asynchroniczna służy również jako rozrusznik badanego silnika spalinowego.

Drugi przypadek to układ do wyznaczania charakterystyki silnika spalinowego przy stałej prędkości obrotowej. Wykorzystywana jest maszyna synchroniczna w układzie silnik spalinowy – maszyna synchroniczna – sieć. Rozruch silnika spalinowego realizowany jest przez własny rozrusznik elektryczny albo z wykorzystaniem maszyny synchronicznej w rozruchu częstotliwościowym. Po uzyskaniu nominalnej częstotliwości pracy układu napędowego następuje zbocznikowanie przemiennika częstotliwości, co powoduje, że prądnica synchroniczna łączona jest na sieć sztywną i obciążając testowany tłokowy silnik spalinowy oddaje energię elektryczną do sieci. Ten typ hamowni silnikowej wykorzystywany jest przy testach silnikowych wymagających stabilnej (synchronicznej) prędkości obrotowej.

Najbardziej powszechnym układem wykorzystywanym w typowych hamowniach silników spalinowych, jak również w KMC PCz jest układ z hamulcem elektrowirowym. Na stanowiskach tego typu przeprowadza się testy silników spalinowych przy zmiennym obciążeniu i prędkości obrotowej a energia tracona jest w postaci ciepła z chłodzenia hamulca elektrowirowego. Są to zazwyczaj badania długotrwałe. Do chłodzenia hamulca elektrowirowego wykorzystywane są wodne układy z traceniem czynnika lub układy z komorą zamkniętą. Rozruch silnika spalinowego odbywa się głównie z wykorzystaniem własnego rozrusznika elektrycznego.

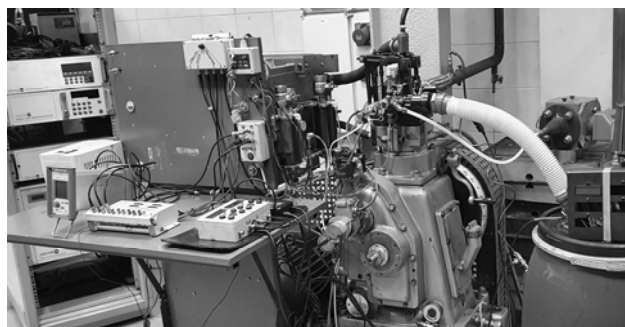
Najstarszym rozwiązaniem w laboratoriach hamowni silników spalinowych PCz jest hamulec z wykorzystaniem układu Leonarda. Silnik spalinowy jest połączony mechanicznie z maszyną prądu stałego (prądnica-silnik). Maszyna ta połączona jest elektrycznie z kolejną maszyną prądu stałego (prądnica-silnik), która połączona jest mechanicznie z asynchroniczną maszyną wpiętą przez układ sterowania do sieci zasilającej. Na stanowisku tym przeprowadza się testy silników spalinowych przy zmiennym obciążeniu i prędkości obrotowej a energia oddawana jest do sieci. Układ ten ze względu na rozbudowaną konstrukcję obciążony jest sporymi stratami mechanicznymi i elektrycznymi oraz wymaga ciągłej korekty nastaw podczas pracy małych jednocylindrowych jednostek spalinowych.

W niniejszej pracy opisano i poddano krótkiej analizie kolejne rozwiązanie hamowni silnikowej, która w swoim układzie wykorzystuje przemiennik częstotliwości i asynchroniczną maszynę elektryczną. Przemiennik wykorzystywany jest w układzie sterowania pracą asynchronicznej maszyny elektrycznej dla zmiennej prędkości obrotowej (charakterystyki prędkościowe) jak i przekazywania energii elektrycznej do sieci (praca na sztywno) lub rozpraszania jej w rezystorze hamującym w postaci prądu stałego. Ten ostatni przypadek został

poddany analizie w niniejszej pracy. Prosta budowa, łatwość kontroli jak i zmiany parametrów pracy pozwala wykorzystywać ten układ napędowo-hamujący do budowy hamowni tłokowych silników spalinowych małej mocy [6,7].

Opis stanowiska badawczego

Badania układu napędowego przeprowadzono na stanowisku przedstawionym na rys. 4. W jego skład wchodzi jednocylindrowy tłokowy silnik spalinowy UIT 85 o zmiennym stopniu sprężania. Ze względu na specyficzną konstrukcję tego silnika (jednostka typowo badawcza), niską prędkość obrotową pracy (450-1000 obr/min), rozbudowany układ sterowania zapłonem, dawką paliwa i uniwersalnością stosowania paliw gazowych jak i ciekłych silnik ten jest doskonałym obiektem do badań naukowych jak i zajęć laboratoryjnych dla studentów. Przez wiele lat hamulcem dla tego silnika spalinowego o uzyskiwanej mocy 4-4.5 kW był asynchroniczny silnik elektryczny o mocy 5.5 kW i nominalnej prędkości 1410 obr/min przy częstotliwości 50Hz. Maszyna ta przez prosty układ sterowania i pomiarowy (watomierz w układzie Arona) połączona była z siecią elektryczną. Silnik ten nie posiada własnego rozrusznika elektrycznego dlatego niezbędne jest wykorzystywanie pracy silnikowej jak i prądnicowej elektrycznej maszyny asynchronicznej.

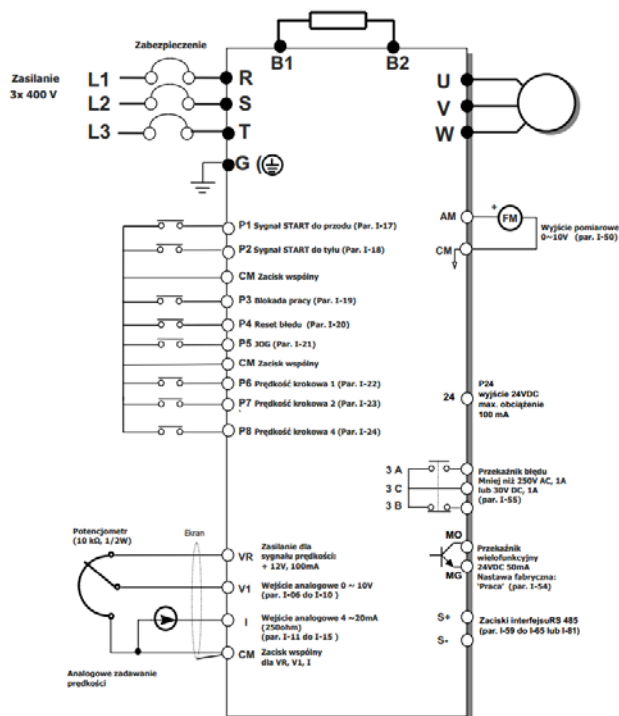


Rys.4. Stanowisko badawcze silnika UIT 85 w KMC Politechnika Częstochowska

Po przeprowadzonej modernizacji stanowiska do układu elektrycznego sterowania i zasilania maszyny elektrycznej dołożono przemiennik częstotliwości wraz z niezbędnymi dodatkowymi aparatami elektrycznymi. Wykorzystano standardowy, dostępny „falownik” marki LG, którego podstawowe dane przedstawiono w poniższej tabeli 1, a schemat podłączenia przedstawiono na rys. 5. Do styków B1 i B2 podłączono rezystor hamujący o mocy 4kW zabudowany poziomo w celu grawitacyjnego chłodzenia powietrzem. Na zasilaniu rezystora (szyna DC) umieszczono sondy napięciowe i amperomierz cęgowy z wyjściem napięciowym w celu kontroli i pomiaru parametrów elektrycznych. Dane pomiarowe były rejestrowane modułem 16 bitowego przetwornika AC: USB 1608HS z wykorzystaniem własnego oprogramowania.

Tabela 1. Przykładowe dane katalogowe dostawcy przemiennika częstotliwości [ZAWEX falowniki.pl]

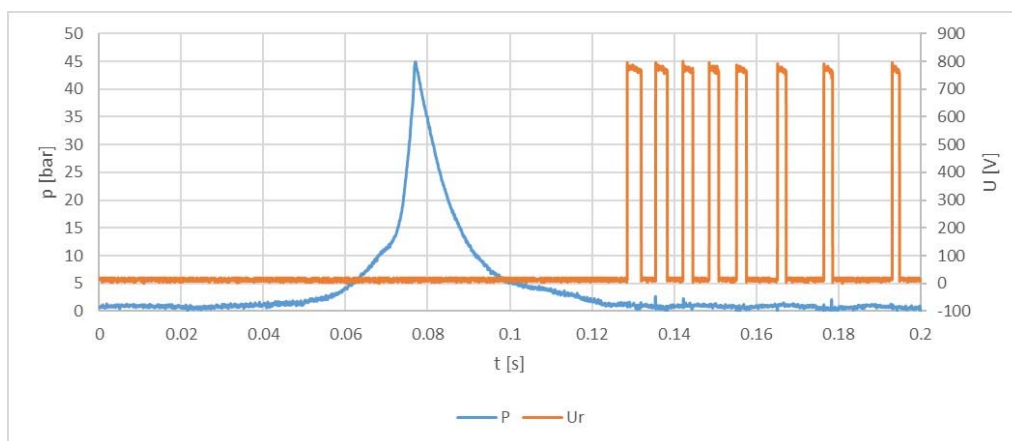
Model	SV075iG5A
Zasilanie	3x400V
Prąd nominalny	16A
Typ sterowania	skalarny/wektorowy
Moduł hamowania	tak
Przebieżalność	150%
Wyjście analogowe	0-10V
Komunikacja	RS485/ModBus
Sterowanie zewnętrzne	0-10V
Regulator PID	tak



Rys.5. Schemat podłączenia przemiennika częstotliwości

Moc tracona w rezystorze

Zarejestrowano i przeanalizowano chwilowe przebiegi napięcia i prądu bezpośrednio na stykach zaciskowych rezystora hamującego w warunkach różnych obciążeń silnika spalinowego (prędkość i moment obrotowy). Aby w czasie hamowania silnika zapobiec niekontrolowanemu spalinnemu oddawaniu energii elektrycznej przez przemiennik częstotliwości do sieci zasilającej, na czas pomiarów przemiennik był odłączany od sieci zasilającej. Na podstawie przebiegów chwilowych wartości prądu i napięcia w układzie rezystora obliczono moc oddawaną na rezystorze. Otrzymane wyniki następnie skorelowano z wykresami mocy indykowanej silnika spalinowego, którą wyznaczono na bazie zarejestrowanych w trybie on-line



Rys.6. Przebieg ciśnienia w komorze spalania silnika z nałożonym przebiegiem zmian napięcia na rezystorze hamującym

Energię elektryczną wydzieloną na rezystorze hamującym w czasie trwania jednego cyklu pracy silnika podzieloną przez jego czas trwania możemy potraktować jako średnią moc elektryczną rozpraszaną w tym

wykresów indykatorowych ciśnienia w komorze spalania silnika. Pomiary powtórzone dla różnych obciążeń silnika spalinowego. Znając średnie ciśnienie indykowane można obliczyć moc indykowaną, tzn. pracę wykonywaną przez gazy zamknięte w cylindrze silnika spalinowego w ciągu jednej sekundy. W silniku czterosuwowym pracującym z prędkością obrotową n liczba wykonanych cykli wynosi $0,5n$, a więc moc indykowaną silnika czterosuwowego można obliczyć wg. zależności:

$$(1) \quad N_i = \frac{p_i \cdot V_s \cdot i \cdot n}{2 \cdot 60} [kW]$$

gdzie: p_i – średnie ciśnienie indykowane [kPa], V_s – pojemność skokowa silnika [m^3], i – liczba cylindrów silnika, n – prędkość obrotowa [obr/min].

Moc indykowana silnika spalinowego jest większa od mocy mechanicznej dostępnej na wale tego silnika o wartość strat na tarcie w mechanizmach silnika i na napęd jego osprzętu.

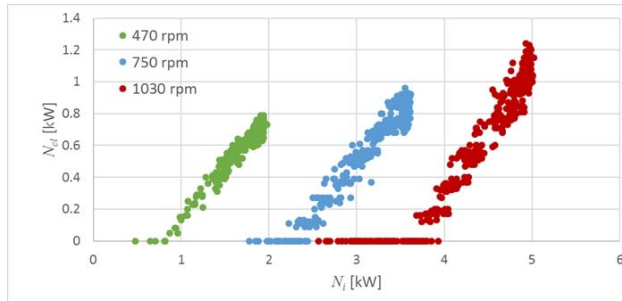
Przykładowy przebieg ciśnienia w komorze spalania silnika z nałożonym przebiegiem zmian napięcia na rezystorze hamującym przedstawiono na rys.6. Widoczne na nim impulsy napięcia określają przedziały czasu, w których następuje przepływ prądu przez rezystor hamujący. Zauważono, że wraz ze wzrostem obciążenia silnika zwiększała się głównie liczba impulsów napięciowych. Natomiast ich szerokości zmieniały się tylko w niewielkim stopniu. Najszersze z nich występowały w początkowej fazie rozpraszania energii elektrycznej w rezystorze. Dostrzegalna jest również zwłoka czasowa między początkiem pojawiania się impulsów napięcia w stosunku do suwu pracy silnika, w którym silnik spalinowy oddaje moc na swoim wale. Faza oddawania energii z obwodu pośredniego przemiennika ma miejsce dopiero po zakończeniu suwu pracy silnika spalinowego – głównie w czasie suwu wydechu i początkowej fazie suwu dolotu. Efekt ten można tłumaczyć opóźnieniem konieczności rozpraszania nadmiaru energii elektrycznej na rezystorze hamującym dopiero po naładowaniu kondensatorów przemiennika i przekroczeniu napięcia szyny DC ponad 760-780V.

rezystorze. Została ona nazwana mocą elektryczną N_{el} , a do jej obliczenia wykorzystano zależność:

$$(2) \quad N_{el} = \frac{I \cdot U \cdot \sum \Delta \varphi_i}{720} [kW]$$

gdzie: I – natężenie prądu rezystora [A], U – napięcie na rezystorze [kV], $\Delta\phi_i$ – przedziały kąta obrotu wału korbowego silnika, w których przepływa prąd przez rezystor hamujący [deg].

Rysunek 7 przedstawia wyniki pomiarów mocy elektrycznej rozpraszanej na rezystorze hamującym w funkcji mocy indykowanej silnika spalinowego. Każda seria ilustruje zależność między wymienionymi mocami dla innej prędkości obrotowej silnika przy zmiennym jego obciążeniu.



Rys.7. Przebieg ciśnienia w komorze spalania silnika z nałożonym przebiegiem zmian napięcia na rezystorze hamującym

Jak widać na rysunku 7, dla każdej prędkości obrotowej istnieje wyraźna, liniowa korelacja między mocą silnika spalinowego i energią elektryczną wydzieloną na rezystorze hamującym. Oznacza to, że zaproponowana metoda określania mocy silnika na podstawie pomiaru mocy oddawanej na rezystorze hamującym mogłaby być w pewnych warunkach zastosowana w praktyce. Najważniejszym ograniczeniem tej metody jest niestety fakt, że energia oddawana jest do rezystora hamującego dopiero po przekroczeniu strat mocy w przemienniku częstotliwości. Dlatego jeśli silnik spalinowy pracuje przy niskim obciążeniu na rezystorze hamującym nie jest oddawana żadna energia. Również ograniczone poziomy sprawności mechanicznej samego silnika spalinowego oraz sprawności maszyny asynchronicznej i przemiennika powodują, że moc rozpraszana na rezystorze jest dużo mniejsza od mocy indykowanej silnika spalinowego. Dlatego należy uznać, że badana metoda określania mocy silnika na podstawie pomiaru mocy oddawanej na rezystorze hamującym mogłaby być zastosowana jedynie w warunkach dużych obciążeń silnika spalinowego. Wymagałaby ona dodatkowego przeliczania mocy elektrycznej na moc indykowaną według wyznaczonych doświadczalnie charakterystycznych punktów pracy, jak również wyposażeniu stanowiska badawczego w pomiar momentu na wale silnika spalinowego. Pomiar prędkości obrotowej (kątovej) realizowany jest przez programowalny enkoder z rozdzielczością jednego stopnia obrotu wału korbowego silnika spalinowego. Wraz z pomiarem chwilowego ciśnienia w komorze spalania stanowią niezbędne parametry do analizy pracy i procesu spalania badanego silnika.

Wnioski

Z analizy otrzymanych przebiegów napięciowych, prądowych, przebiegów ciśnienia w komorze spalania silnika jak i chwilowego położenia wału korbowego można wykazać częściową przydatność zaproponowanego rozwiązania konstrukcyjnego hamowni silnikowej. Zaproponowany układ napędowy i sterowania pracą

przemiennika częstotliwości może być wykorzystywany w badaniach jednostek spalinowych małej mocy, a koszty budowy takich stanowisk są znikome w porównaniu do rozwiązań przedstawionych we wstępie pracy. Wykorzystanie przemiennika częstotliwości jako regulatora i hamulca do sterowania płynnie prędkością obrotową pracy silnika spalinowego pozwala przeprowadzać testy przy zmiennym obciążeniu jednostki spalinowej. Nawrotność pracy układu napędowego pozwala dokonywać pomiary w pracy sprężarkowej testowanego silnika również przy zmiennej, regulowanej prędkości obrotowej (wyznaczenie współczynnika napelniania cylindra). Do układów hamowni silnikowych dużych mocy z wykorzystaniem przemiennika częstotliwości korzystne jest oczywiście zastosowanie przemienników z oddawaniem energii do sieci zasilającej [12,13].

Autorzy: dr inż. Michał Gruca, Politechnika Częstochowska, Katedra Maszyn Ciepłych, al. AK 21, 42-201 Częstochowa, E-mail: michal.gruca@pcz.pl; dr inż. Michał Pyrc, Politechnika Częstochowska, Katedra Maszyn Ciepłych, al. AK 21, 42-201 Częstochowa, E-mail: michal.pyrc@pcz.pl; dr inż. Borys Borowik, Politechnika Częstochowska, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, al. AK 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: borys.borowik@pcz.pl.

LITERATURA

- [1] Dokumentacja hamowni silnikowej EMX-10/1800. AUTOMEX S.A., Gdańsk (2021)
- [2] Breuer B., Bill H.K.: Brake Technology Handbook, Warrendale, SAE 2008
- [3] Yao L., Chu L., Chen J., Chao L., Guo J.: Integrative Braking Control System for Electric Vehicles, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE
- [4] Yiming M., Huiyan C., Jianwei G., Hui J., Yang W., Honglei L.: Design and Development of a Real-time Dynamic AMT Test Bench for Simulating Total Road Forces of Vehicle, Proceedings of 2008 SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, June 2008, Shanghai, China
- [5] Zawirski K., Deskur J., Kaczmarek T.: Automatyka napędu elektrycznego, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
- [6] Koczara W.: Wprowadzenie do napędu elektrycznego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
- [7] Tunia H., Kaźmierkowski M.: Automatyka napędu przekształtnikowego. PWN, Warszawa, 1987.
- [8] Orłowska - Kowalska T.: Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [9] Krzemiński Z., Adamowicz M.: Control of the induction motor in the field-weakening region based on the multiscalar model. Int. Conf. PCIM'2003, Nuremberg, 2003.
- [10] Krzemiński Z., Lewicki A.: Switching strategy without dead time for the voltage source inverter supplying the sensorless controlled induction motor, Int. Conf. EPE'2003, Toulouse, 2003.
- [11] Abu-Rub H., Guzinski J., Krzemiński Z., Toliyat H. A.: Speed observer system for advanced sensorless control of induction motor. IEEE Transactions on Energy Conversion. Volume 18, Issue 2, June 2003, pp. 219 – 224.
- [12] Włas M., Krzemiński Z., Pietryka J., Szewczyk J.: Techniczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania falowników dwukierunkowych w praktyce. Automatyka, Elektryka, Zakłócenia. Konferencja – Jurata 11-14 czerwca 2008
- [13] M. Baszyński, R. Dudek, A. Dziadecki, A. Stobiecki: Badanie sprawności układu maszyna pmsm – przekształtnik w szerokim zakresie przetwarzanej mocy, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 2/2017 (114)