

**Tomasz Biskup, Andrzej Cieniuch, Mirosław Jurkiewicz, Henryk Kołodziej,
Jacek Sontowski, ENEL-PC Sp. z o.o., Gliwice
Witold Chmielewski, Sylwester Maźnio, ENTE Sp. z o.o., Gliwice**

PRZEKSZTAŁTNIKOWE STACJE PRÓB SILNIKÓW TRAKCYJNYCH

POWER ELECTRONIC SETUPS FOR TESTING TRACTION MOTORS

Streszczenie: W artykule opisano dwie stacje prób do badania trakcyjnych silników indukcyjnych klatkowych oraz silników szeregowych prądu stałego. Obie stacje zostały zbudowane w oparciu o przekształtniki energoelektroniczne, elementy pomiarowe i zarządzający nimi moduł kontrolno-sterujący. W kolejnych rozdziałach opisano szczegóły dotyczące każdej ze stacji, pokazując ich możliwości funkcjonalne. Artykuł zilustrowano zdjęciami systemu i wynikami pomiarowymi, uzyskanymi w czasie prób uruchomieniowych. Całość zakończono podsumowaniem.

Abstract: This articles describes two setups: one for testing traction squirrel cage induction motors and second for traction series DC motors. Both setups were built using power converters, measuring instruments and master control module. In following chapters there are presented some details concerns all setups. One shows also functional possibilities of the control system. The paper is illustrated by photos and waveforms obtained during startup works. Articles is ended by short resume.

Słowa kluczowe: *energoelektronika, napędy trakcyjne, maszyny elektryczne, badania diagnostyczne*
Keywords: *power electronics, traction drives, electrical machines, diagnostic tests*

1. Wprowadzenie

Współcześnie w Polsce, w rozwiązaniach pojazdów trakcyjnych, funkcjonują równocześnie napędy prądu przemiennego [1] i napędy prądu stałego [2]. Te nowsze opierają się już raczej wyłącznie na silnikach indukcyjnych klatkowych i dotyczy to tak kolei, metra warszawskiego, jak i pojazdów tramwajowych. Nadal jednak są i będą w najbliższej przyszłości eksploatowane pojazdy starsze, wykorzystujące szeregowo silniki prądu stałego.

Oba typy silników ze względu na intensywny sposób eksploatacji wymagają okresowych remontów oraz badań, których tryb określają wymagania producenta, a w normach opisane są jako próba wyrobu. Przykładowo dla silników indukcyjnych klatkowych sposób działania jest opisany w normie PN-EN 60349-2 [3] i składa się na niego typowe dla takich maszyn: próba biegu jałowego, próba zwarcia oraz test mechaniczny ze zwiększeniem prędkości ponad maksymalną dopuszczalną dla silnika. Dodatkowo wykonuje się badania: wytrzymałości izolacji, pomiary luzu promieniowego po wymianie łożysk, sprawdzenie bicia końca wału, badania wibracji, pomiar rezystancji uzwojeń czy kontrolę czujnika prędkości.

Współpraca firm ENTE i ENEL-PC pozwoliła na zbudowanie w ostatnich latach dwóch stacji prób: jednej dla trakcyjnych silników indukcyjnych klatkowych, drugiej dla silników prądu stałego. Pozwalają one na wykonanie niezbędnych badań w ramach próby wyrobu. Stacje prób bazują na specjalizowanych zasilaczach energoelektronicznych, pozwalających na niskostratne przetwarzanie energii elektrycznej.

2. Stacja prób trakcyjnych silników indukcyjnych klatkowych

W nowych oraz gruntownie modernizowanych pojazdach szynowych eksploatowanych na terenie Polski, jako napęd główny, wykorzystywane są silniki indukcyjne klatkowe. Silniki te są zasilane za pomocą specjalizowanych falowników napięcia, wykorzystujących energię z sieci trakcyjnej 3 kV napięcia stałego. Badanie takich silników opisuje norma PN-EN 60349-2. Zasadnicza część badań to próba biegu jałowego, próba zwarcia i próba mechaniczna. Założono, że stacja będzie generowała napięcie zasilania o odpowiednich wartościach częstotliwości i wartości skutecznej przy zachowaniu odpowiednio niskiej wartości współczynnika THD napięcia < 2%. Takie rozwiąza-

nie ma symulować warunki sinusoidalnego zasilania, jako punktu odniesienia dla porównania wyników badań dla poszczególnych silników z serii.

Na podstawie wymagań normy zaprojektowano stanowisko badawcze wykorzystujące przekształtnik energoelektroniczny jako źródło zasilania. Struktura stacji prób została przedstawiona na rys. 1. W jej skład wchodzi przetwornik częstotliwości, 3-fazowy filtr sinusoidalny, transformator dopasowujący, system pomiarowy, przełącznik zasilania oraz nadrzędny moduł kontrolno-sterujący.

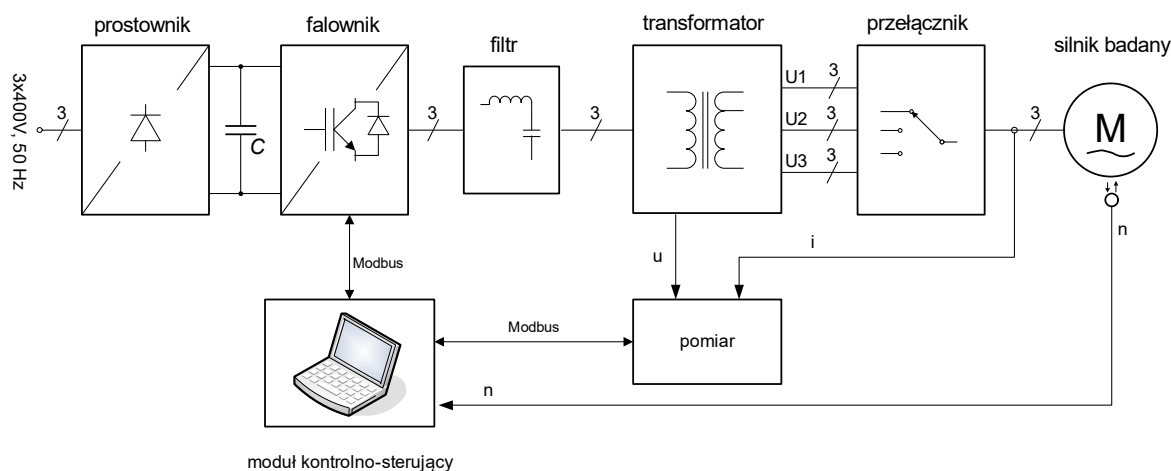
Przetwornik częstotliwości jest źródłem napięcia zasilania o regulowanej częstotliwości i wartości skutecznej 1-harmonicznej. 3-fazowe napięcie generowane przez falownik jest filtrowane i podawane na transformator. W ten sposób uzyskany kształt napięcia spełnia wymogi niskiej wartości THD.

Specjalnie zaprojektowany na potrzeby stacji transformator o mocy 250 kVA i znamionowym napięciu strony pierwotnej 400V, ma uzwojenie wtórne z 3 odczepami: $U_1=110\text{ V}$, $U_2=575\text{ V}$, $U_3=2700\text{ V}$. Zostały one dopasowane do napięć zasilania wymaganych dla poszczególnych prób silników. Wybór generowanego zakresu napięcia odbywa się za pomocą przełącznika. W układzie mierzone są: napięcie zasilania silnika, jego prąd oraz prędkość obrotowa wału silnika dla próby biegu jałowego i mechanicznej. Wielkości elektryczne są mierzone za pomocą przyrządu LUMEL N10, a prędkość obrotowa za pomocą impulsatora bezpośrednio podłączonego do modułu kontrolno-sterującego.

Moduł kontrolno-sterujący jest połączony z układem sterowania przetwornika częstotliwości oraz przyrządem N10 za pomocą transmisji Modbus. Przetwornik częstotliwości jest przygotowany do wykonania każdej z 3 prób: biegu jałowego, zwarcia i mechanicznej na podstawie parametrów silnika wpisanych przez moduł kontrolno-sterujący oraz wielkości pomiarowych, w sposób ciągły odczytywanych z przyrządów systemu. Pośrednikiem w przekazywaniu wartości pomiarowych jest moduł kontrolno-sterujący.

Dopasowanie zakresu napięcia wyjściowego zasilania stacji: 0-110 V, 0-500 V, 0-2340 V zależy od napięcia znamionowego silnika oraz typu próby i jest realizowane przez blok przełącznika. W ten sam sposób, za pomocą pomocniczego przełącznika, do układu N10 jest doprowadzane odpowiednie napięcie wyjściowe, przy czym dla zakresu napięcia najwyższego wykorzystywany jest przekładnik napięciowy firmy PolContact o przekładni 2500V/100V. Do pomiaru prądu silnika zastosowano przekładniki Lumel o mocy 10 VA i przełożeniu 500A/5A. Na schemacie nie zaznaczono elementów poprawiających właściwości EMC stacji oraz elementów systemu zabezpieczeń.

Nadrzędnym elementem stacji prób jest moduł kontrolno-sterujący zbudowany w oparciu o sterowniki pomiarowe ADVANTECH oraz specjalistyczne oprogramowanie kontrolno-sterujące wytworzone za pomocą środowiska programistycznego LabVIEW.

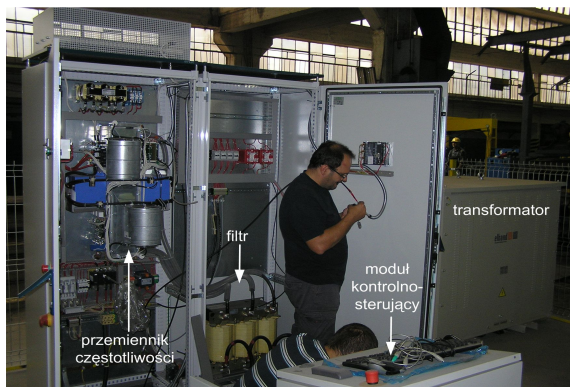


Rys. 1. Schemat blokowy stacji prób silników indukcyjnych klatkowych

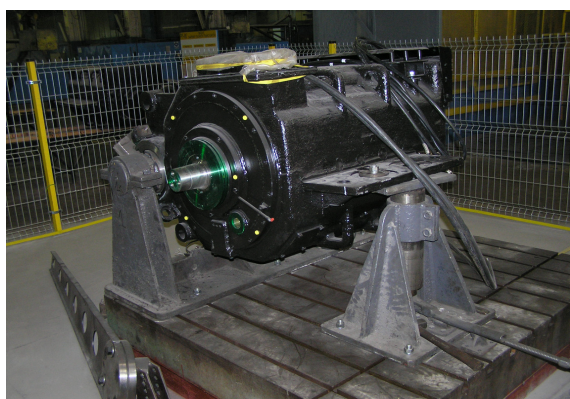
Moduł kontrolno-sterujący stanowi przemysłowe stanowisko pracy operatora stacji prób. Wyposażony on jest w dotykowy panel steru-

jący stacją prób. Z poziomu operatora przeprowadzenie prób sprowadza się jedynie do wyboru typu silnika, dla którego zdefiniowany jest

harmonogram prób oraz wyboru konkretnej próby do realizacji. System jest zabezpieczony przed uruchomieniem przez nieuprawnioną osobę przez czytnik RFID, a parametry silników przeznaczonych do badań zdefiniowane w plikach konfiguracyjnych. Istnieje możliwość samodzielnego wprowadzania kolejnych silników do systemu. W ten sposób system jest otwarty na rozbudowę pod warunkiem, że parametry silników mieszczą się w dopuszczalnych granicach.



Rys. 2. Zdjęcie części zasilającej stacji prób w czasie prac uruchomieniowych

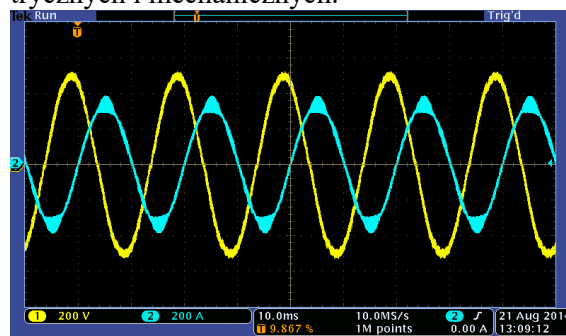


Rys. 3. zdjęcie silnika indukcyjnego klatkowego typu LK450X6 na stacji prób

Wszystkie pozostałe czynności, polegające na zadaniu wymaganych warunków zasilania i obciążenia oraz pomiarze parametrów pracy maszyny (takich jak napięcia, prądy, prędkość wirowania) odbywają się automatycznie. Efektem końcowym przeprowadzonych badań jest raport z wynikami wszystkich prób. Zdjęcie części zasilającej stacji prób w czasie prac uruchomieniowych przedstawiono na rys. 2, a badanego silnika trakcyjnego na rys. 3.

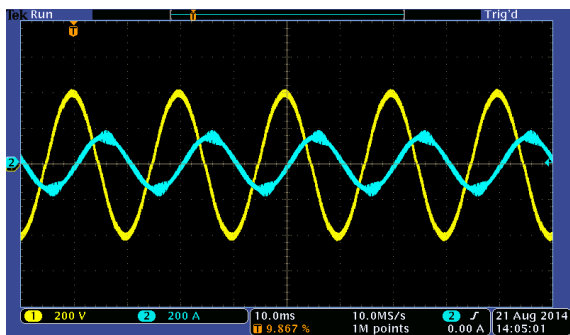
Idea działania stacji jest taka, że moduł kontrolno-sterujący przekazuje do układu sterowania przekształtnika rodzaj próby, parametry silnika i chwilowe wartości mierzonych wielkości,

a przekształtnik realizuje próbę wg. ustalonych danych i zapisów w normie PN-EN 60349-2. Przykładowo dla próby biegu jałowego następuje łagodny rozruch silnika do częstotliwości znamionowej, z utrzymaniem znamionowego napięcia zasilania dla docelowego punktu pracy. Moduł kontrolno-sterujący monitoruje wartości pomiarowe napięcia zasilania i prędkości obrotowej. Od chwili osiągnięcia docelowego punktu pracy stan ten jest sygnalizowany na monitorze, co pozwala operatorowi na zakończenie próby z zapisem wyników pomiaru. W przypadku braku reakcji operatora lub braku osiągnięcia właściwego punktu pracy przez określony czas próba jest przerywana w trybie wyłączenia awaryjnego. Podobnie są wykonywane próby: mechaniczna i zwarcia, przy czym dla próby zwarcia wał silnika jest blokowany mechanicznie przez operatora. Stacja prób jest przygotowana do badania silników o mocy do 500 kW i częstotliwości znamionowej 50-70 Hz z dwóch typowych grup o napięciach znamionowych mieszczących się w zakresie: 2200 - 2340 V lub 380 - 500 V. Dla grupy pierwszej dla próby biegu jałowego i mechanicznej wykorzystywany jest odpływ napięcia zasilania 0-2340 V, dla próby zwarcia 0-500 V. Odpowiednio dla drugiej grupy silników dla biegu jałowego i mechanicznej: 0-500 V, a dla zwarcia 0-110 V. Przykładowe przebiegi prądów oraz napięć dla wszystkich 3 prób i silnika LK450X6 [4] o mocy 250 kW i napięciu znamionowym 2340 V pokazano na rys. 4-6. Wszystkie wielkości zostały, ze względów bezpieczeństwa, zmierzone po stronie pierwotnej transformatora dopasowującego, czyli dla odtworzenia wartości silnika należałoby uwzględnić odpowiednią przekładnię transformatora. W trakcie trwania próby operator ma możliwość obserwacji na pulpicie modułu kontrolno-sterującego poszczególnych wielkości elektrycznych i mechanicznych.

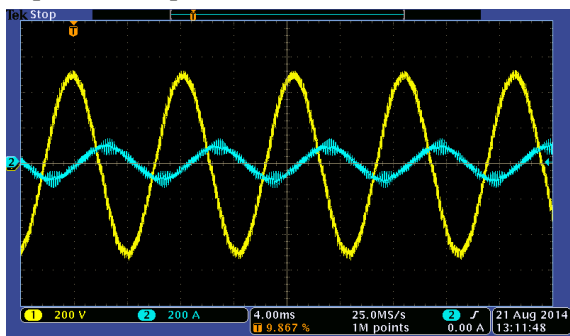


Rys. 4. Próba biegu jałowego silnika LK450X6, ch1-napięcie, ch2-prąd, $F=50$ Hz, $U=2340$ V

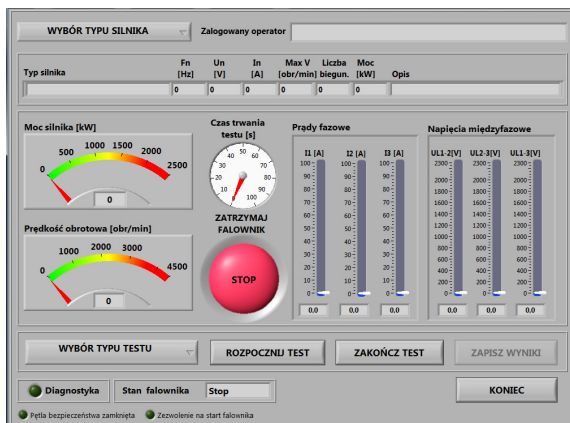
Wygląd pulpitu w czasie zatrzymania napędu został przedstawiony na rys. 7. W górnej części znajdują się typ i parametry wybranego do badań silnika, w dolnej pomiary. Umieszczone są tam mierniki poszczególnych wielkości, w tym bargrafy dla odczytywanych wartości 3 napięć i 3 prądów. W chwili osiągnięcia przez odpowiednią wielkość właściwego zakresu odpowiadającego danemu silnikowi i rodzajowi próby jest to sygnalizowane zmianą barwy bargrafu.



Rys. 5. Próba zwarcia silnika LK450X6, ch1 napięcie, ch2-prąd, F50 Hz, I=78 A



Rys. 6. Próba mechaniczna silnika LK450X6, ch1-napięcie, ch2-prąd, n=2880 obr/min



Rys. 7. Wygląd pulpitu modułu kontrolno-sterującego

W każdej chwili próba może zostać przerwana za pomocą przycisku STOP. Także otwarcie

jakiegokolwiek wyłącznika bezpieczeństwa na szafie stacji, drzwiach wejściowych do strefy niebezpiecznej powoduje wyłączenie systemu i zatrzymanie silnika. Po zakończeniu testu operator może zapisać wyniki badań do pliku tekstowego.

3. Stacja prób trakcyjnych silników prądu stałego

W starszych jednostkach trakcyjnych stosowane są nadal silniki szeregowo prądu stałego. Liczba pojazdów z takimi napędami jest na tyle duża, że istnieje zapotrzebowanie na badania rewiacyjne silników [2], a w ten sposób na nowoczesne rozwiązania stacji prób takich silników.

Projekt stacji bazuje na podobnej idei jak opisana w punkcie 2 stacja dla silników indukcyjnych klatkowych. Stacja prób dla silników prądu stałego jest bardziej rozbudowana, co wynika z wymogów poszczególnych testów opisanych w normie PN-EN 60349-1 [5]. Podstawowa część badań to:

- próba biegu jałowego,
- próba drgań,
- próba wytrzymałości mechanicznej,
- próba nagrzewania,
- badanie punktów charakterystyki mechanicznej,
- próba komutacji.

W pierwszych trzech sytuacjach badany jest pojedynczy silnik, dla kolejnych trzech badanie następuje w systemie, gdzie połączone są mechanicznie i elektrycznie dwa silniki, jeden jest silnikiem badanym, a drugi pracuje jako prądnica. Dodatkowym problemem dla dwóch ostatnich testów jest fakt, że muszą one zostać wykonane także dla stanu maksymalnego odwzbudzenia, określonego dla każdego silnika w jego dokumentacji. Badania są zwykle wykonywane dla obu kierunków wirowania. Biorąc pod uwagę, że część badań i tak jest wykonywana w systemie dwusilnikowym, stacja powinna być przygotowana tak, żeby silniki badać parami. W pierwszej części badań dany silnik jest obiektem testów, w drugiej prądnicą obciążającą drugi badany silnik z pary.

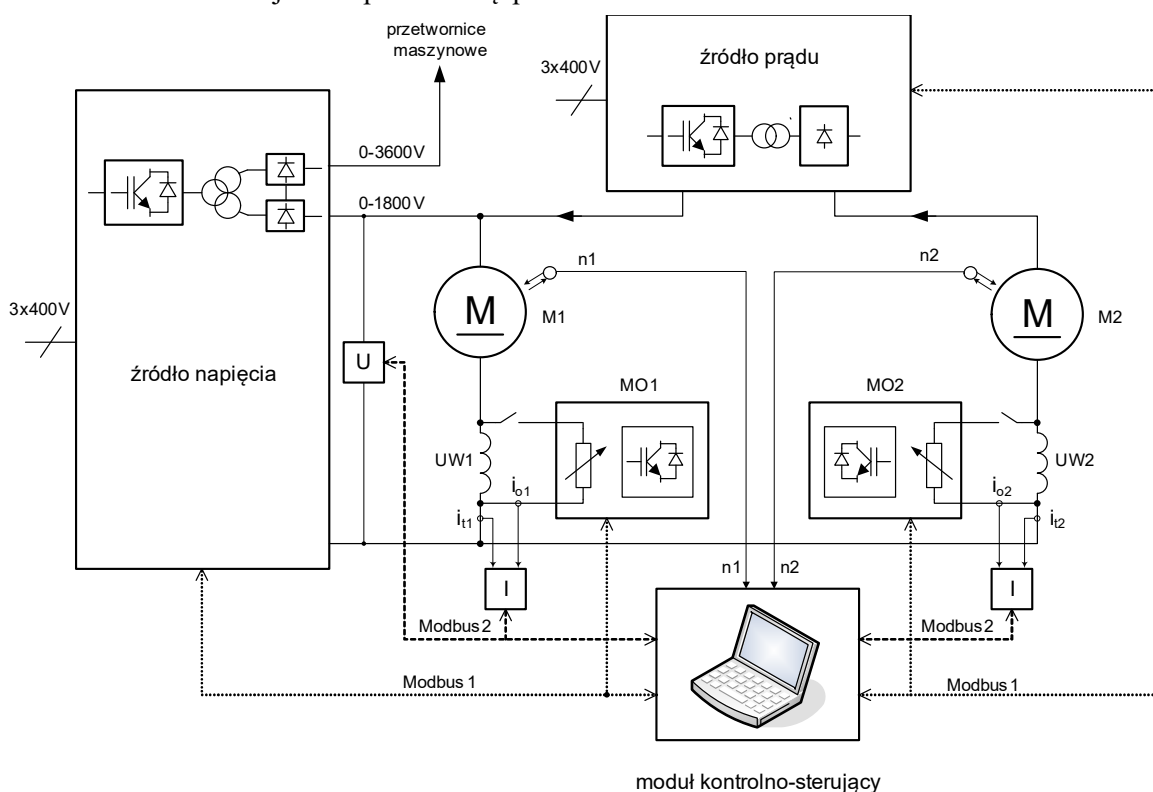
Uproszczony schemat blokowy stacji prób przedstawiono na rys. 8. Nie uwzględniono tu, nieopisanej wcześniej części pozwalającej na badanie kolejowych przetwornic maszynowych wymagających zasilania napięciem do 3600 V. Schemat został także uproszczony przez usunięcie systemu przełączników pozwalających na zmianę kierunku przepływu prądu w bada-

nym obwodzie i w ten sposób badanie silnika M2. Przelątki te ingerują też w przepływ prądu w obwodzie wzbudzenia UW1 i UW2. Uproszczenia na rysunku nie wpływają jednak na możliwość przedstawienia idei działania stacji.

Podstawowymi elementami są dwa źródła: napięcia i prądu. Pierwsze z nich wymusza napięcie na zaciskach silnika badanego i w ten sposób określana jest jego prędkość. Blok ten jest jednocześnie wyłącznym źródłem energii w badaniach, w których testowany jest pojedynczy silnik. Źródło prądu powoduje cyrkulację energii między maszynami połączonymi elektrycznie i mechanicznie. W ten sposób wymuszany jest zadany moment na silniku badanym M1. Źródło prądu pokrywa energię związaną ze stratami w rezystancjach obwodu. Źródła napięcia i prądu zostały zbudowane w podobny sposób i składają się z przemiennika częstotliwości zasilającego przez filtr sinusoidalny transformator. Dla źródła napięcia transformator ma 2 wtórne uzwojenia i przekładnię pod-

wyższą napięcie. Strony wtórne są podłączone do prostowników dających dwa regulowane źródła napięcia stałego: jedno 0-1800 V dla badanych silników oraz drugie, o szerszym zakresie regulacji 0-3600V i mniejszej mocy, dla badanych przetwornic maszynowych. Dla źródła prądu transformator ma przekładnię obniżającą napięcie i pojedynczy prostownik diodowy o dużej wydajności prądowej 900 A.

Istotną rolę pełnią układy odwzbudzenia MO dołączane do systemu w części prób. Oparte zostały one na kombinowanym systemie pasywno-aktywnym z rezystorem mocy i chopperem regulującym prąd, bazującym na tranzystorach MOSFET. Pomiaru są wykonywane z wykorzystaniem boczników i mierników wielkości napięcia stałego Lumel NA6. System jest też wyposażony w czujniki prędkości, wibracji i temperatury. Całość systemu sterowania i pomiarowy jest zarządzana przez moduł kontrolno-sterujący za pomocą dwóch linii transmisji w standardzie Modbus.



Rys. 8. Schemat blokowy układu stacji prób dla trakcyjnych szeregowych silników prądu stałego



Rys. 9. Zdjęcie szafy źródła napięcia systemu stacji prób silników prądu stałego

Obsługa stacji jest nieco bardziej rozbudowana w stosunku do stacji silników prądu przemiennego, ale ideowo zbliżona. Ze względu na konieczność zasilania dwóch lub jednego silnika oraz zadawania i kontroli większej ilości parametrów, moduł kontrolno-pomiarowy jest znacznie bardziej rozbudowany. Umożliwia on ciągły pomiar oraz kontrolę wartości krytycznych prędkości wirowania, temperatury łożysk, wirnika, komutatora, poziomu wibracji oraz wszystkich parametrów elektrycznych (napięcia, prądy, moce). Jednocześnie zgodnie z wymaganiami kart pomiarowych zapewnia dla badanego silnika odpowiednie punkty pracy wyznaczone przez kilka zależnych od siebie parametrów: napięcie zasilania, prąd obciążenia, stopień wzbudzenia, prędkość obrotowa. Dodatkowo, na podstawie zebranych doświadczeń z eksploatacji stacji prób do badania silników indukcyjnych, zdecydowano się na rozbudowę stanowiska o dodatkowy moduł automatycznej oceny poprawności pomiarów, mający na celu wyeliminowanie przypadków niewłaściwej interpretacji wyników badań przez operatora.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono dwa rozwiązania stacji prób dla trakcyjnych silników indukcyjnych klatkowych oraz szeregowych prądu stałego bazujących na przetwornikach energoelektrycznych i komputerowym systemie kon-

trojno-sterującym. Stacje pozwalają na realizację badań odpowiednich silników zgodnie z normami odpowiednio PN-EN 60349-2 i PN-EN 60349-1. Dotychczasowe wyniki i doświadczenia z ich eksploatacji są pozytywne.

5. Literatura

- [1]. L. Lipiński, M. Miszewski: "Nowe pasażerskie jednostki elektryczne z bydgoskiej PESY dla trakcji 3 kV", Technika Transportu Szynowego, nr 10, 2017, str. 54 -59.
- [2]. K. Dylong, R. Setlak: "Analiza awarii trakcyjnych maszyn elektrycznych DC na drodze do poprawy jakości okresowych przeglądów i napraw", Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 2/2014, str. 101 -104.
- [3]. PN-EN 60349-2:2011 Trakcja elektryczna - Elektryczne maszyny wirujące do pojazdów szynowych i drogowych -- Część 2: Maszyny prądu przemiennego zasilane z przetworników elektronicznych.
- [4]. J. Westerowski: "Problemy projektowe i konstrukcyjne silników trakcyjnych indukcyjnych typu LK450X6 o mocy 250kW", Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 89, 2011, str. 101 -104.
- [5]. PN-EN 60349-1:2011 Trakcja elektryczna - Elektryczne maszyny wirujące do pojazdów szynowych i drogowych -- Część 1: Maszyny inne niż silniki prądu przemiennego zasilane z przetworników elektronicznych.

Autorzy

dr inż. Tomasz Biskup, ENEL-PC sp. z o.o.
ul. Graniczna 74b, 44-178 Przyszowice
e-mail: t.biskup@enel-pc.pl
mgr inż. Andrzej Cieniuch, ENEL-PC sp. z o.o.
ul. Graniczna 74b, 44-178 Przyszowice
e-mail: a.cieniuch@enel-pc.pl
Miroslaw Jurkiewicz, ENEL-PC sp. z o.o.
ul. Graniczna 74b, 44-178 Przyszowice
e-mail: m.jurkiewicz@enel-pc.pl
dr inż. Henryk Kołodziej, ENEL-PC sp. z o.o.
ul. Graniczna 74b, 44-178 Przyszowice
e-mail: henryk.kolodziej@enel-pc.pl
mgr inż. Jacek Sontowski, ENEL-PC sp. z o.o.
ul. Graniczna 74b, 44-178 Przyszowice
e-mail: j.sontowski@enel-pc.pl
mgr inż. Witold Chmielewski, ENTE sp. z o.o.
ul. Gaudiego 7, 44-100 Gliwice
e-mail: w.chmielewski@ente.com.pl
mgr inż. Sylwester Maźnio, ENTE sp. z o.o.
ul. Gaudiego 7, 44-100 Gliwice
e-mail: s.maznio@ente.com