

Problemy cyfrowych pomiarów elektrycznych w układach napędów średniego i niskiego napięcia

Ryszard Beniak, Arkadiusz Gardecki, Józef Moch

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej

Mimo ogromnych postępów w modelowaniu półprzewodnikowych przekształtników energii, jak również kompletnych układów napędowych, ostateczną weryfikację wyników modelowania stanowi pomiar w układzie rzeczywistym. Równoległe z rozwojem technik napędowych rozwijana jest technika pomiarowa, mająca na celu identyfikację i weryfikację algorytmów sterowania oraz ocenę sprawności rozwiązań układów napędowych. Pomiar w warunkach przemysłowych jest najczęściej przedsięwzięciem jednorazowym. Wykonanie takiego pomiaru wiąże się przeważnie z koniecznością dwukrotnego krótkotrwałego przerwania procesu technologicznego w celu zainstalowania i zdemontowania oprzyrządowania. Problemy pomiarów są więc wielorakiego rodzaju: organizacyjne, bezpieczeństwa sprzętu i personelu, dostępu do obwodów elektrycznych i sterujących badanego obiektu, doboru właściwych czujników pomiarowych i elementów kondycjonowania sygnałów, oceny maksymalnych wartości sygnałów w celu optymalnego doboru zakresów kanałów pomiarowych i na koniec interpretacji uzyskanych wyników. Zebrane w rejestracji przemysłowej wyniki pomiaru wymagają właściwej interpretacji. O ile problemy, np. aliasingu są dość łatwe do rozwiązania, to wyznaczenie mocy pobieranej przez układ napędowy oraz pomiar momentu mechanicznego maszyny stanowi poważne wyzwanie. W artykule opisano specyfikę przygotowania typowych pomiarów w warunkach przemysłowych. Opisano tor pomiaru napięcia i prądu przy uwzględnieniu dostępnych przyrządów pomiarowych i zasad bezpiecznego użytkowania tych przyrządów. Ponadto zaprezentowano technikę instalowania czujników pomiarowych ze szczególnym uwzględnieniem możliwości ich zamontowania. Na zakończenie przedstawiono przykładowy opis metod analizy uzyskanych wyników pomiarowych.

Słowa kluczowe: technika pomiarów, przyrząd pomiarowy, napęd elektryczny, układ średniego i niskiego napięcia

Ocenę pracy układów napędowych w zakresie ich sprawności energetycznej umożliwia symulacja, przy założeniu znajomości algorytmów sterowania i prawidłowego przyjęcia modeli przyrządów półprzewodnikowych oraz maszyn elektrycznych. W większości przypadków brakuje jednak istotnych informacji niezbędnych do identyfikacji parametrów elementów układu napędowego. Wtedy podstawową metodą uzyskiwania brakujących danych jest pomiar.

Wykonanie pomiaru wielkości elektrycznych i mechanicznych na czynnym układzie napędowym jest poważnym i skomplikowanym przedsięwzięciem, wymagającym dobrego przygotowania zespołu przeprowadzającego pomiar, przetestowania i przygotowania sprzętu oraz przyrządów pomiarowych, a także skoordynowania działań zespołu dokonującego pomiar z pracą służb utrzymania ruchu w przedsiębiorstwie właściciela badanego urządzenia.

Przygotowanie pomiaru

Wykonanie pomiaru na urządzeniu pracującym w energetyce nie zawsze jest możliwe. Możliwość dołączenia przyrządów pomiarowych na potrzeby doraźnego pomiaru pojawia się w czasie planowanego remontu, awarii lub po uzgodnieniu wyłączenia urządzenia ze służbami utrzymania ruchu. Stąd termin pomiarów jest wynikiem uzgodnień z właścicielem obiektu lub przypadkowych okazji, związanych z problemami z utrzymaniem ruchu obiektu.

Obiekt badań jest urządzeniem na stałe wbudowanym w infrastrukturę przedsiębiorstwa. Układ napędowy jest zamknięty w szafach sterowniczych. Szyny zasilania trójfazowego, przewodzące prąd stały i wyprowadzające energię w kierunku silnika, są trudno dostępne dla sond pomiarowych napięciowych i prądowych. Stąd też przed terminem właściwe-

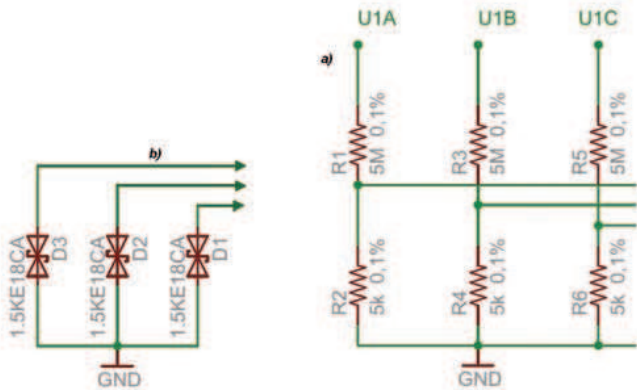
go pomiaru niezbędne jest przeprowadzenie rozeznania w zakresie dostępności obwodów badanego urządzenia oraz odległości punktów przyłączenia sond pomiarowych.

Właściwe przygotowanie wymaga sporządzenia spisu wszystkich niezbędnych elementów systemu pomiarowego oraz przetestowania ich w warunkach laboratoryjnych. Ze względu na koszt nabycia przyrządów pomiarowych, często przekraczający 100 tys. PLN, niebagatelny problem stanowi ubezpieczenie tego sprzętu na czas podróży i pomiaru. Nie wszystkie firmy ubezpieczeniowe podejmują się ubezpieczenia nietypowego zadania, dlatego zabiegi o ubezpieczenie rozpoczyna się zwykle z kilkutygodniowym wyprzedzeniem. Firmy zajmujące się profesjonalnie pomiarami przemysłowymi zawierają zwykle długoterminowe umowy ubezpieczeniowe, co znacznie obniża ich koszt.

Przyrządy pomiarowe i ich bezpieczne użytkowanie

Pomiary w obwodach niskiego napięcia przyrządami o zakresie do 1 kV nie stanowią przeważnie dużego problemu technicznego ani nie niosą ponadprzeciętnych zagrożeń dla osób obsługi i sprzętu pomiarowego. Inaczej jest w przypadku pomiarów w obwodach średniego napięcia (w układach napędowych najczęściej jest to 6 kV). Metoda pomiaru napięć opracowana i stosowana przez zespół autorów z Instytutu Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Opolskiej polega na użyciu trójfazowych rezystancyjnych dzielników napięcia wysokiej dokładności wykonania (rys. 1). Dzielniki włączane są w obwód zasilania układu napędowego oraz na wyjściu przekształtnika energoelektronicznego (rys. 2). W czasie takiego pomiaru należy zadbać, by nie zostało przekroczone maksymalne dopusz-

czalne napięcie na wejściu kart pomiarowych. Powstaje tutaj konflikt między potrzebą zachowania bezpieczeństwa aparatury i utrzymania klasy systemu pomiarowego. Każdy element ograniczający przepięcia włączony równolegle do wejść kart pomiarowych wprowadza dodatkową, na ogół nieliniową, rezystancję albo pojemność. Dla zachowania klasy przyrządów w niektórych przypadkach niezbędnym staje się zaniechanie ochrony przepięciowej wejść przyrządu.



Rys.1. a) Trójfazowy dzielnik pomiarowy średniego napięcia, b) opcjonalna ochrona przepięciowa wykorzystująca tranzystor

Fig.1. a) Three-phase medium voltage measurement divider, b) with optional surge transistor

Większość energoelektronicznych przetwornic częstotliwości o znacznej mocy ma połączenia elektryczne wykonane w postaci szyn. Ich demontaż w celu włączenia boczników pomiarowych często jest utrudniony lub w praktyce niemożliwy. Jedynym możliwym sposobem pomiaru prądów w obwodzie jest w tym przypadku zastosowanie przetworników pomiarowych izolowanych od przewodów z prądem. Praktycznym przykładem tego rozwiązania są cewki Rogowskiego lub przetworniki prądowe z czujnikami Halla. Istnieją

rozwiązania takich przetworników, pozwalające na otwieranie i zamykanie ich obwodu magnetycznego w celu założenia przetwornika na szynę z prądem.

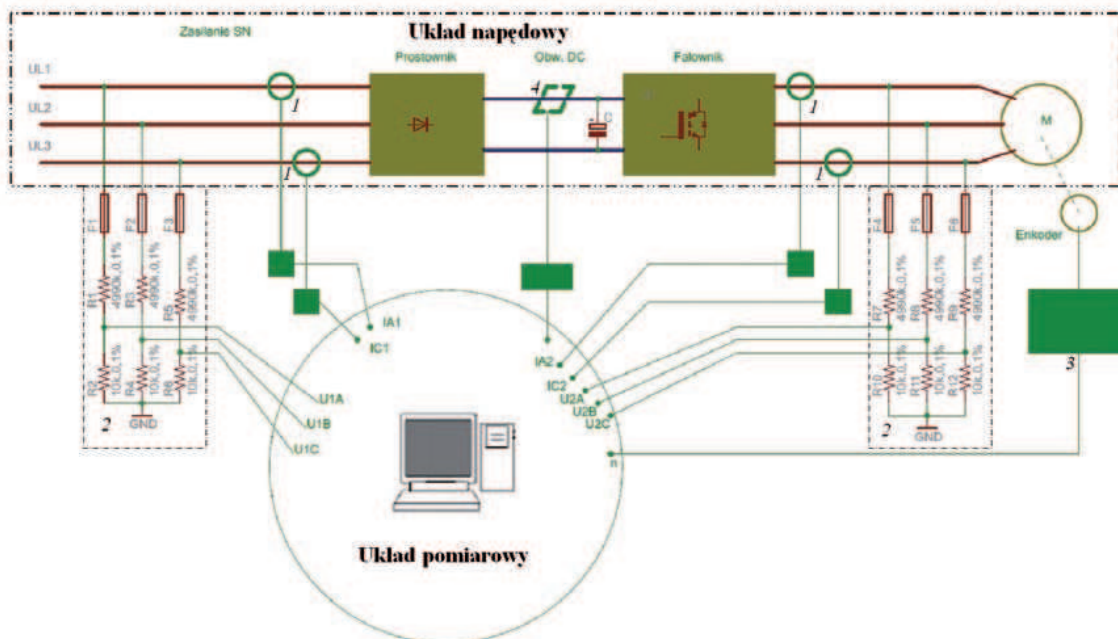
Bezpieczeństwo osób obsługi pomiaru oraz urządzeń, zarówno poddawanych badaniu, jak i aparatury badawczej, należy uznać za priorytet przy organizowaniu pomiarów przemysłowych, zwłaszcza w obwodach średniego napięcia. Dlatego dobrą praktyką jest zapraszanie do oceny i nadzorowania bezpieczeństwa wykonywanych czynności osób z doświadczeniem i obyciem w pracach w rozdzielniach przemysłowych.

Przy instalowaniu czujników pomiarowych istotne staje się właściwe ustalenie kierunku ich zamontowania. W obiektach o skomplikowanych trasach przebiegu szyn zasilających łatwo popełnić błąd, skutkujący poważnymi trudnościami w interpretacji wyników pomiaru.

Dużą trudność sprawia uzyskanie dostępu do sygnałów prędkości w układach napędowych. Wiele z tych układów działa w zamkniętym układzie regulacji, w którym prędkość nie jest wielkością regulowaną. Jej wartość ma charakter informacyjny, zastosowane czujniki są w takim przypadku mało precyzyjne i o dużej bezwładności. Z kolei rzadko można zainstalować własny czujnik prędkości na wale maszyny napędowej. Większość obecnie stosowanych układów falowników mierzy prędkość napędu w sposób pośredni (obliczeniowy) i wystawia na wybranych zaciskach sygnał napięciowy lub prądowy, proporcjonalny do prędkości. Są to jednak sygnały informujące o uśrednionych wartościach prędkości, pozbawione części informacji o dynamice zmian tej wielkości.

Analiza i przykłady interpretacji zebranych wyników

Wyniki pomiarów, zakładając prawidłowe przeprowadzenie pomiaru, wymagają oceny i interpretacji. W symetrycznych układach trójfazowych prostym sposobem weryfikacji pra-

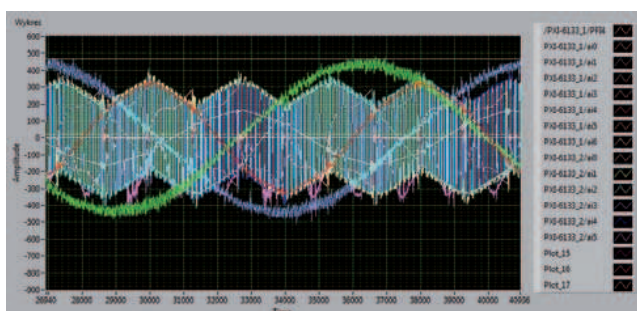


Rys. 2. Sposób włączenia czujników pomiarowych w badany obwód, 1 – cewki Rogowskiego, 2 – 3-fazowe dzielniki napięcia, 3 – układ kondycjonowania sygnałów enkodera, 4 – przetwornik prądowy LEM

Fig. 2. The method of integrate sensors in the test circuit, 1 – Rogowski coil, 2 – 3-phase voltage dividers, 3 – encoder signal conditioning system, 4 – LEM current transducer

widłości połączeń czujników jest sprawdzenie równego przesunięcia fazowego dla każdej pary prąd-napięcie. Ten sposób weryfikacji jest skuteczny, jeżeli jest możliwe wstępne określenie przybliżonej wartości tego przesunięcia. Na początkujących pomiarowców czyhają tu również pułapki. Na przykład przesunięcie fazowe biegu jałowego małych silników różni się znacznie od przesunięcia fazowego dużych maszyn, przenoszenie wiedzy o małych obiektach na obiekty duże może prowadzić do błędów, których poprawienie może okazać się niemożliwe.

Przykładem trudnego do zinterpretowania wyniku jest przebieg przedstawiony na rys. 3. Obwiednię napięć fazowych na wyjściu falownika stanowią linie trójkątne z góry i dołu kolorowych obszarów. Wyjaśnienia tego zjawiska należy poszukiwać w sposobie włączenia dzielników pomiarowych w badany obwód elektryczny. Trójfazowy dzielnik napięcia jest połączony w gwiazdę, przy czym punkt wspólny

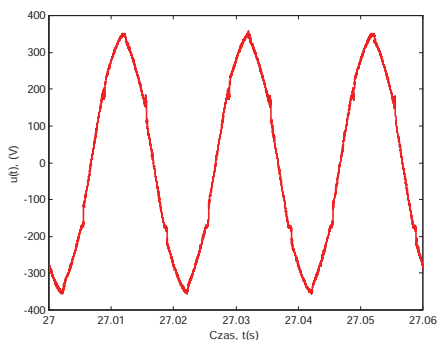


Rys. 3. Wybrane przebiegi czasowe z przykładowego pomiaru

Fig. 3. An example measurement selected waveforms

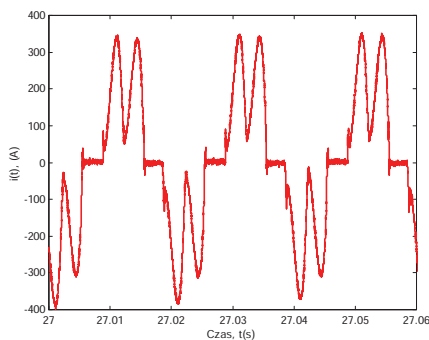
jest połączony z punktem zerowym sieci zasilającej. Amplitudy napięć fazowych na wyjściu falownika są równe na przemian dodatniej i ujemnej wartości napięcia w obwodzie pośredniczącym prądu stałego, odniesionej do potencjału zerowego sieci zasilającej. W sieci bez zniekształceń kształt napięć byłby sinusoidalny, w sieciach zasilających większą liczbę falowników odkształcenie napięć piątą harmoniczną jest tak znaczne, że ich przebieg w okolicy amplitud staje się linią łamaną (rys. 3).

Poważnym problemem przy obróbce wyników pomiaru jest wyznaczanie mocy w punktach pomiaru oraz sprawności poszczególnych składników układu napędowego. Jak już wcześniej opisano [1], wyznaczenie sprawności za pomocą tak wykonanego pomiaru jest możliwe tylko z ograniczoną dokładnością, mimo zastosowania precyzyjnych przyrządów pomiarowych.



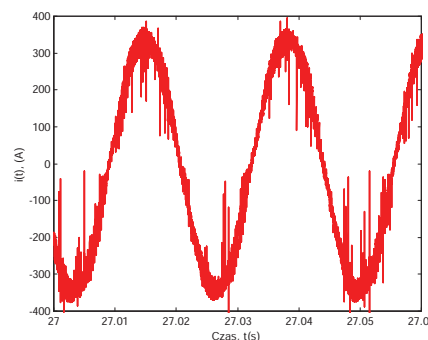
Rys. 4. Fragment przebiegu napięcia (u_{L1}) na wejściu do przekształtnika

Fig. 4. A part of voltage waveforms (u_{L1}) on converter's supply



Rys. 5. Fragment przebiegu prądu (i_{L1}) na wejściu do przekształtnika

Fig. 5. A part of current waveforms (i_{L1}) on converter's supply



Rys. 6. Fragment przebiegu prądu (i_{L1}) na wyjściu falownika

Fig. 6. A part of current waveforms (i_{L1}) on motor's supply

Przykład pomiaru przy użyciu układu pomiarowego zbudowanego z komponentów firmy National Instruments

Badany układ napędowy, znajdujący się w elektrowni konwencjonalnej, zasilą pompę wody ciepłowniczej. Obecnie w tego typu układach stosowane są bardzo często przemienniki częstotliwości [2]. Zastosowany przemiennik częstotliwości realizuje algorytm sterowania skalarnego MSI. W tego typu układach możliwe jest ustawienie wartości częstotliwości fali nośnej. W badanym układzie falownik może zmieniać częstotliwość fali nośnej w zakresie 3–14 kHz. Układ pomiarowy [4] zbudowany jest na bazie dwóch kart pomiarowych NI 6133 [5] i umożliwia rejestrację w szesnastu kanałach z częstotliwością próbkowania 400 kHz.

W badanym układzie pompa ciepłownicza napędzana jest silnikiem asynchronicznym typ SEE 355ML o mocy 315 kW. W trakcie pomiarów zarejestrowano przebiegi wartości chwilowych napięć i prądów na wejściu i wyjściu układu przekształtnikowego [3] oraz prędkość kątową silnika. Częstotliwość pomiarów prędkości obrotowej była ograniczona możliwościami zastosowanego w napędzie układu pomiarowego, który zapewniał jeden impuls na obrót wału maszyny. Pozostałe pomiary wykonano z częstotliwością 400 kHz. Rejestrowano rozruch i stan ustalony pracy napędu (rys. 4–6).

Na podstawie przebiegów czasowych prądów i napięć na wejściu i wyjściu falownika oraz spektrów harmonicznych obliczono sprawność części przekształtnikowej napędu oraz współczynnik zawartości wyższych harmonicznych THD w napięciach i prądach (tab. 1).

Tab. 1. Zestawienie wybranych wskaźników jakości pracy układu napędowego dla częstotliwości fali nośnej $f_s = 3,5 \text{ kHz}$

Tab. 1. Parameters of control quality for a system operating in a stationary state for the frequency of the control system $f_s = 3,5 \text{ kHz}$

Miejsce pomiaru	THD I [%]	THD U [%]	η
We	60,24	6,60	0,977
Wy	6,02	8,48	

Podsumowanie

Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Opolskiej dysponuje sprzętem pomiarowym umożliwiającym pomiary w układach niskiego napięcia i napięcia średniego do 10 kV. Ze względu na zastosowanie kart pomiarowych NI 6133 (16 kanałów) do pomiaru napięć wykorzystywane są dwa rodzaje dzielników napięcia, w zależności od mierzonych napięć. Szacowana dokładność dzielników napięcia [4] wynosi 0,2 %. Do pomiarów prądów standardowo stosowane są cewki Rogowskiego CWT30LF firmy PEM o błędzie pomiarowym 0,2 %. Dodatkowo Instytut posiada analizator mocy D6200 (LEM Norma) w wykonaniu umożliwiającym pomiary w dwunastu separowanych galwanicznie kanałach z częstotliwością 70 kHz na kanał. Analizator ten stosowany jest do pomiarów niewymagających długich czasów rejestracji i bardzo wysokich częstotliwości pomiarowych. Sprzęt ten umożliwia określenie sprawności układów przekształtnikowych i ich oddziaływania na tor zasilający oraz na silnik. Dysponowanie profesjonalnym sprzętem nie zmniejsza jednak stopnia trudności realizacji pomiaru. Podstawowe problemy przedstawione w artykule wskazują na dużą rolę doświadczenia zespołu przeprowadzającego pomiary.

Bibliografia

1. Beniak R., Matolicz K., Moch J.: *Praktyczne aspekty pomiarów mocy w układach przekształtników w sieci 6 kV*. Wiadomości Elektrotechniczne 2003, nr 1–2, s. 38–41.
2. Jędral W.: *Efektywność energetyczna pomp i instalacji pompowych*. KAPE S.A., Warszawa 2007.
3. Instrukcja: *Przetwornice częstotliwości VLT® 6000 HVAC do napędu pomp i wentylatorów*. www.danfoss.com
4. Beniak R., Gardecki A., Moch J.: *Praktyczne aspekty pomiarów mocy w układach przekształtnikowych*. Sympozjum XIII PPEEm 2009, Wisła 14–17 grudnia 2009, s. 33–37.
5. www.ni.com/pdf/manuals/371231d.pdf, NI 6132/6133 Specifications
6. Beniak R., Gardecki A.: *Wykorzystanie oszacowanych parametrów układu napędowego do obliczeń wybranych stanów pracy układu przekształtnikowego*. Modelowanie i Symulacja MiS-6, Kościelisko 21–25 czerwca 2010.

Issues with digital electric measurements in modern medium and low voltage systems

Despite significant progress in modelling of semiconductor energy converters and complete motive systems, measurement in real time systems serves as the ultimate verification of modelling results. Along with a gradual improvement of motive systems, measurement techniques, which allow for identifying and verifying steering algorithms, and assessing the efficiency of motive systems, are being improved as well. For the industrial purposes, one-off measurements are most common. Such measurements require two short interruptions of production process – while installing and dismantling

the measurement sets. Measurement involves various challenges, such as management, safety procedures for measurement devices and staff, access to electronic and steering networks, proper selection of measurement sensors and signal conditioning items, assessment of maximum signal values for optimum choice of measurement channel range, and last but not least proper interpretation of the obtained results. While e.g. aliasing issues are relatively easy to solve, transmission of power by the motive system or torque measurement are serious challenges. This paper discusses particularities of typical real time measurements for industrial purposes. It describes voltage and electric current waveforms taking into account the accessibility of measurement devices and safety procedures. In addition, it presents the manner of installing measurement devices. In the final part of the paper, we show examples of how to analyze the measurement outcomes.

Keywords: measurements technique, instrumentation, electric drive, medium and low voltage system

dr inż. Ryszard Beniak

Absolwent Wydziału Elektrotechniki WSI w Opolu. Od 1986 r. zatrudniony na stanowisku asystenta w Katedrze Napędu Elektrycznego. Pracę doktorską obronił w 1994 r. na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Zainteresowania zawodowe dotyczą: metod modelowania i symulacji przekształtnikowych układów napędowych, metod identyfikacji parametrów, mobilnych układów robotyki oraz metod całkowania równań różniczkowych zwyczajnych.

e-mail: r.beniak@po.opole.pl



dr inż. Arkadiusz Gardecki

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Opolskiej. Od 1997 r. zatrudniony na stanowisku asystenta w Katedrze Automatyki i Diagnostyki Układów Elektromechanicznych. Pracę doktorską obronił w 2006 r. na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Zainteresowania zawodowe dotyczą: metod numerycznych stosowanych w układach sterowania silników indukcyjnych i symulacji przekształtnikowych układów napędowych oraz pomiarów i analizy jakości energii elektrycznej w sieciach lokalnych.

e-mail: a.gardecki@po.opole.pl



dr inż. Józef Moch

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej w 1970 r. Przez kilkanaście lat pracował w przemyśle, w utrzymaniu ruchu i działach konstrukcyjnych. Przez około 25 lat zatrudniony jako pracownik naukowo-badawczy w Katedrze Automatyki i Diagnostyki Układów Elektromechanicznych Politechniki Opolskiej. Pracę doktorską obronił w 2008 r. na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki tej uczelni, obecnie na etacie adiunkta. Specjalizuje się w energoelektronice, pomiarach, sterowaniu i napędzie elektrycznym. W tych dziedzinach mieszczą się jego praktyczne osiągnięcia zawodowe.

e-mail: j.moch@po.opole.pl

