Wybrane problemy badawcze Zespołu Sterowania Cyfrowego Katedry Automatyki i Robotyki AGH

Dawid Knapik, Krzysztof Kołek, Paweł Piątek, Mariusz Pauluk, Maciej Rosół, Andrzej Tutaj, Paweł Zagórski

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków

Streszczenie: Ostatnie dekady to czas intensywnej wymiany informacji, która przyczyniła się do gwałtownego rozwoju wiedzy oraz poszerzenia obszaru jej praktycznego zastosowania. Technologie zastrzeżone wcześniej dla ośrodków badawczych o największych budżetach obecnie są powszechnie dostępne. Zespół Sterowania Cyfrowego koncentruje się na badaniu i rozwiązywaniu problemów z obszarów projektowania i budowy: sztucznych satelitów Ziemi, aktywnych urządzeń elektroenergetycznych, inteligentnych elektronarzędzi oraz mobilnych pojazdów.

W kolejnych rozdziałach omówiono wyniki prac związanych z:

- orientacją przestrzenną sztucznych satelitów Ziemi,
- konstrukcją aktywnego filtru, utrzymującego nominalny stanu sieci energetycznej,
- przemieszczaniem się w sposób stabilny dwukołowego robota mobilnego,
- inteligentnymi elektronarzędziami realizujących m.in. złożone algorytmy pomiarowe oraz diagnostyczne.

Słowa kluczowe: inżyniera kosmiczna, aktywny filtr trójfazowy, pojazd dwukołowy, inteligentne elektronarzędzia

SELECTED RESEARCH PROBLEMS OF THE DIGITAL CONTROL TEAM OF THE DEPARTMENT OF AUTOMATIC CONTROL AND ROBOTICS AT AGH UST

Abstract: The last decades have been a time of intensive information exchange, which has contributed to the rapid development of knowledge and the expansion of the area of its practical application. Technologies previously reserved for research centers with the largest budgets are now widely available. The Digital Control Team focuses on researching and solving problems in the areas of design and construction: artificial Earth satellites, active power devices, intelligent power tools and mobile vehicles.

The following chapters discuss the results of work related to:

- spatial orientation of the Earth's artificial satellites,
- construction of an active filter, keeping the nominal state of the power grid,
- stable movement of the two-wheeled mobile robot,
- intelligent power tools, implementing, inter alia, complex measurement and diagnostic algorithms.

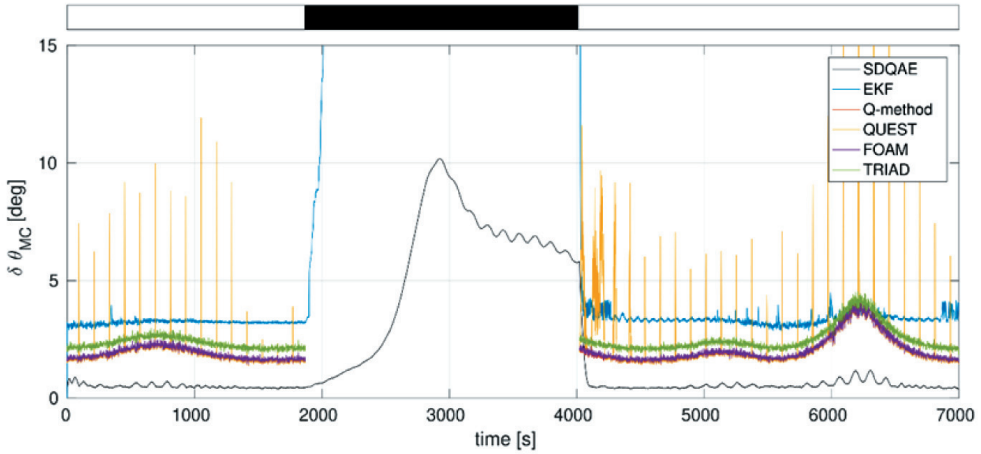
Keywords: space engineering, three-phase active filter, two-wheeled vehicle, smart power tools

https://doi.org/10.7494/978-83-67427-00-5_4

1. Orientacja przestrzenna sztucznych satelitów Ziemi

W Zespole Sterowania Cyfrowego prowadzone są m.in. badania z obszaru inżynierii kosmicznej. Jednym z podejmowanych tematów było opracowanie algorytmu estymacji orientacji przestrzennej dla małych, sztucznych satelitów Ziemi (SDQAE – *Steepest Descent Quaternion Attitude Estimator*) na podstawie pomiarów wektorowych pola magnetycznego Ziemi, prędkości kątowej satelity i położenia Słońca.

Po przeprowadzeniu symulacji i zbadaniu właściwości algorytmu (Zagorski i in. 2018) okazało się, że w porównaniu z innymi algorytmami znanymi z literatury jego dokładność w określaniu położenia jest zdecydowanie lepsza. Przykładowe porównanie błędów estymacji przedstawiono na rysunku 1.

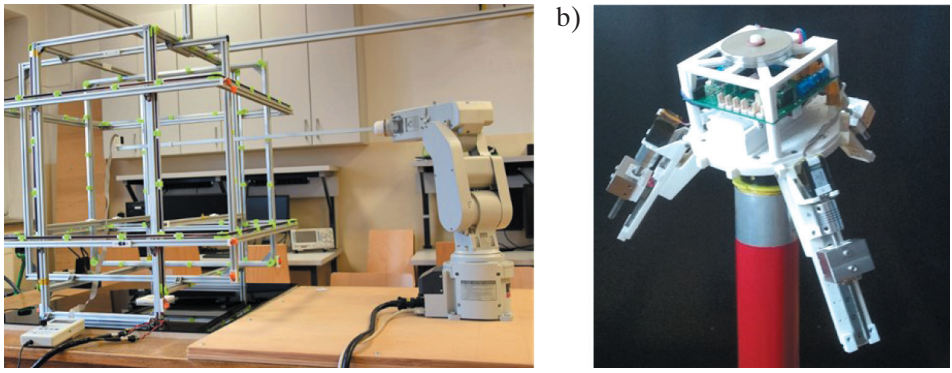


Rys. 1. Porównanie błędów estymacji położenia kątowego wyznaczonych w symulacjach Monte Carlo autorskiego algorytmu SDQAE oraz innych algorytmów znanych z literatury. Czarny pasek nad wykresem, równoległy do osi czasu, oznacza okres, w którym satelita znajduje się w cieniu Ziemi
Źródło: Zagorski i in. (2018)

Prowadzone są także wspólne badania z Wydziałem Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. Jednym z podejmowanych obszarów badawczych jest wykorzystanie pomiarów pola magnetycznego występującego na pokładzie satelity do estymacji parametrów jego orbity. W ramach dotychczasowych prac opracowano algorytm (Zagorski i in. 2017) estymujący półosie wielkiej orbity.

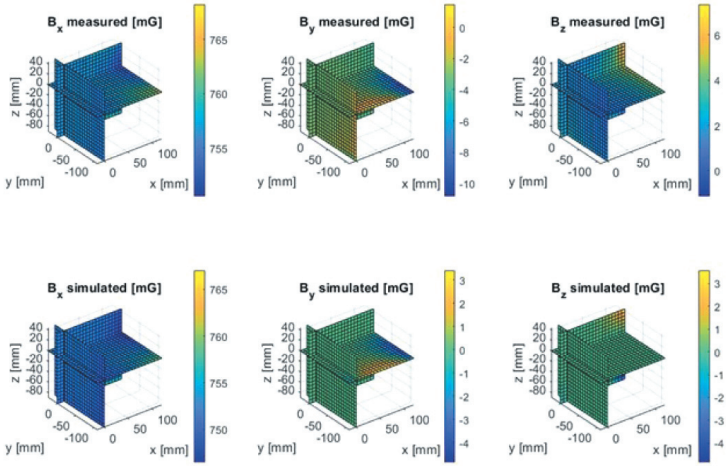
Na potrzeby dalszych prac zostało także zbudowane stanowisko laboratoryjne składające się z klatki Helmholtza i platformy samobalansującej, zawieszonej na półsferycznym łożysku powietrznym (rys. 2). Wymagane jest, aby platforma była precyzyjnie wyważana.

a) b)



Rys. 2. Stanowisko z cewkami Helmholtza do symulacji pola magnetycznego w warunkach orbity okołoziemskiej (a). Platforma samobalansująca oparta na półsferycznym łożysku powietrznym służącym do symulacji dynamiki ruchu obrotowego małych satelitów (b)

Opracowano zatem skuteczny algorytm umożliwiający automatyzację tego procesu (Zagórski i in. 2020). Klatka Helmholtza jest złożonym systemem, który służy do generowania niemal jednorodnego pola magnetycznego. Zawiera m.in. sterowany z wykorzystaniem komputera system zasilania cewek według zadanych, zmiennych w czasie wartości prądu. Urządzenie to jest wrażliwe na niedokładności w geometrii konstrukcji oraz bardzo podatne na zakłócenia. W związku z powyższym skonstruowano system pomiarowy składający się z robota przemysłowego i czujnika pola magnetycznego w celu weryfikacji jednorodności wygenerowanego pola. Zestawienie zeskanowanego w trzech wymiarach pola magnetycznego z przewidywaniami modelu analitycznego przedstawiono na rysunku 3.



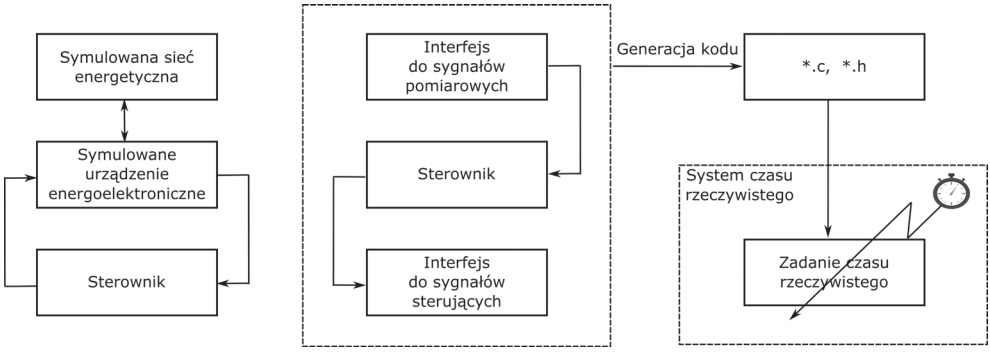
Rys. 3. Porównanie pomiarów pola magnetycznego wygenerowanego w przestrzeni roboczej cewki Helmholtza z przewidywaniami modelu analitycznego

2. Sterowniki urządzeń energoelektronicznych

Urządzenia energoelektroniczne podłączane są bezpośrednio do sieci energetycznej i operują dużymi mocami. Ze względu na tę specyfikę sterownik musi poprawnie sterować urządzeniem już od pierwszego uruchomienia. W przeciwnym razie sterowane urządzenie łatwo może ulec awarii.

Ze względu na brak możliwość wstępnego strojenia sterownika w docelowym środowisku duży nacisk podczas jego projektowania przykłada się do eksperymentów symulacyjnych.

Fazy projektowania oraz implementacji sterownika przedstawia rysunek 4.

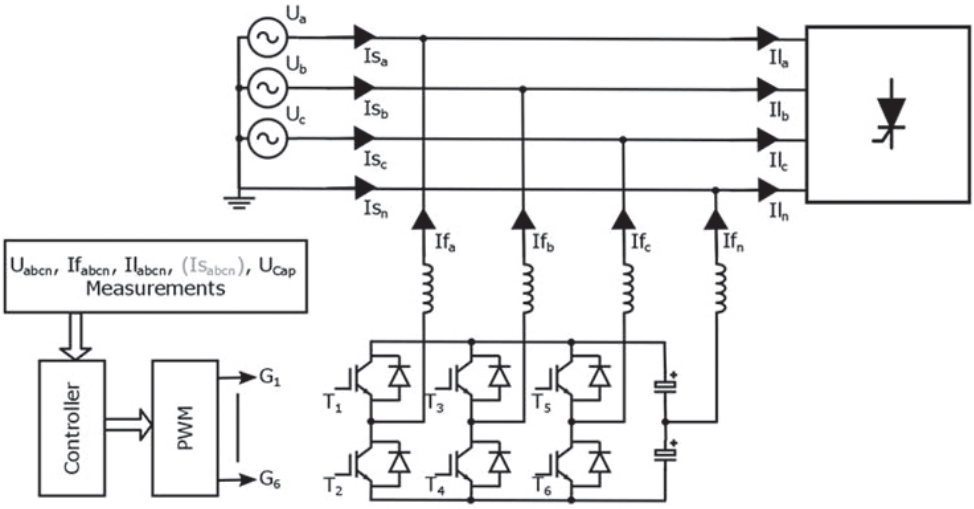


Rys. 4. Schemat projektowania oraz generacji aplikacji czasu rzeczywistego

Początkowo sterownik wraz z modelem sterowanego urządzenia oraz modelem sieci energetycznej badany jest wyłącznie symulacyjnie. Symulacja, oprócz doboru struktury oraz parametrów sterownika, pozwala również przetestować zachowanie się urządzeń w różnych warunkach zasilania sieciowego oraz przy różnych obciążeniach. Następnie w opracowanym sterowniku symulowane dotychczas źródło sygnałów wejściowych zamieniane jest na oprogramowanie będące interfejsem dla sygnałów mierzonych, a wyjścia sterownika podłączone są do bloku programowego tworzącego interfejs dla sygnałów sterujących. Z tych trzech bloków generowany jest automatycznie kod w języku C, będący funkcjonalnym odpowiednikiem sterownika. Wygenerowany kod umieszczony w systemie czasu rzeczywistego tworzy zadanie sterujące wykonywane z zadanym okresem próbkowania.

Przykładem opracowanego urządzenia, w którym wykorzystano opisane podejście do konstruowania sterownika, jest energetyczny filtr aktywny (rys. 5) (Firlit i in. 2017).

Zadaniem sterownika jest pomiar napięć sieciowych U_{abc} oraz prądu obciążenia Il_{abc} i na ich podstawie obliczenie prądów If_{abc} kompensujących niepożądane składowe prądu obciążenia.



Rys. 5. Schemat filtru aktywnego
Źródło: Kołek i Firlit (2021)

Sterownik wytwarza sygnały PWM sterujące mostkami tranzystorowymi w taki sposób, aby wygenerować obliczone referencyjne prądy filtru oraz ustabilizować zadane napięcia na kondensatorze U_{Cap}.

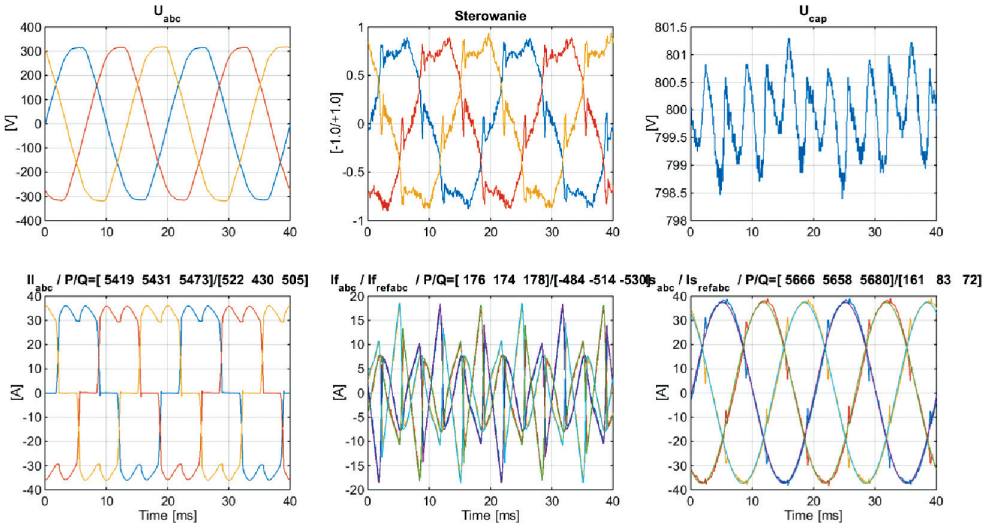
$$\min_{d_a, d_b} \left(If_{abc}\left(t+T_0\right) - If_{refabc} \right)^T \left(If_{abc}\left(t+T_0\right) - If_{refabc} \right),\ d_c = 0 \tag{1}$$

$$If_{abc}\left(t+T_0\right) = \begin{bmatrix} i_a(t) - \dfrac{T_0\left(\dfrac{2U_a}{3} - \dfrac{U_b}{3} - \dfrac{U_c}{3} + \dfrac{U_{dc}\left(d_b - 2d_a\right)}{3}\right)}{L} \\ i_b(t) + \dfrac{T_0\left(\dfrac{U_a}{3} - \dfrac{2U_b}{3} + \dfrac{U_c}{3} - \dfrac{U_{dc}\left(d_a - 2d_b\right)}{3}\right)}{L} \\ i_c(t) + \dfrac{T_0\left(\dfrac{U_a}{3} + \dfrac{U_b}{3} - \dfrac{2U_c}{3} - \dfrac{U_{dc}\left(d_a + d_b\right)}{3}\right)}{L} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$d_a - 1 \le 0, \quad -d_a \le 0 \tag{3}$$

$$d_b - 1 \le 0, \quad -d_b \le 0 \tag{4}$$

Wyznaczenie współczynników wypełniania d_{abc} fal PWM wymaga rozwiązania w każdym okresie próbkowania zadania optymalizacji (1) przy spełnieniu ograniczeń (2)–(4) (Kołek i Firlit 2021). Wynik pracy filtru dla wybranego obciążenia przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Rezultat pracy filtru aktywnego

Prąd obciążenia Il_{abc} zawiera składowe mocy biernej oraz harmoniczne powyżej częstotliwości sieciowej. Prąd filtru If_{abc} zawiera składowe kompensujące moc bierną oraz harmoniczne. Suma prądu obciążenia oraz prądu filtru generuje prąd sieci Is_{abc} o kształcie zbliżonym do sinusoidalnego napięcia sieciowego, co oznacza wyłącznie szczątkową obecność mocy biernej oraz składowych harmonicznych w prądzie pobieranym z sieci.

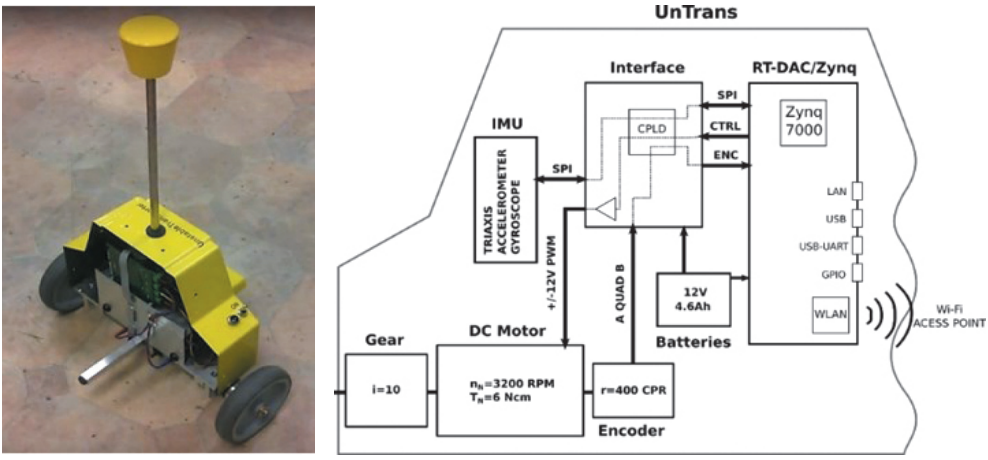
3. Dwukołowy, niestabilny robot mobilny

W ramach prowadzonych badań zaprojektowano również i wykonano platformę mobilną – dwukołowy, niestabilny robot oraz opracowano narzędzia do szybkiego prototypowania algorytmów, umożliwiające ich testowanie, śledzenie trajektorii, weryfikowanie poprawności działania w niestabilnym punkcie równowagi, a także kooperację robotów. Narzędzia te opracowano zgodnie ze współczesnymi trendami wytwarzania bezpiecznego oprogramowania (Hölttä i in. 2004, Pauluk 2020).

Ogólny widok robota przedstawiono na rysunku 7. Robot porusza się na dwóch kołach o wspólnej osi obrotu. Urządzenie napędzają dwa silniki prądu stałego przekazujące moment obrotowy poprzez przekładnie planetarne o obniżonym luzie kątowym.

Prędkość obrotowa sterowana jest wypełnieniem sygnału PWM. Położenie kątowe wału silnika odczytywane jest z kwadraturowych enkoderów inkrementalnych zamontowanych na wale silnika. Robot wyposażono w czujnik typu „6 stopni swobody" składający się z akcelerometru oraz żyroskopu, każdy o trzech stopniach swobody (6DOF – *6 Degrees of Freedom*), który służy do estymacji położenia robota. Realizację algorytmu sterowania, komunikację z systemem nadrzędnym oraz obsługę czujników powierzono mikrokomputerowi RT-DAC/Zynq opartemu na układzie Xilinx Zynq7020 składającym się z dwurdzeniowego procesora typu ARM oraz układu FPGA.

a) b)

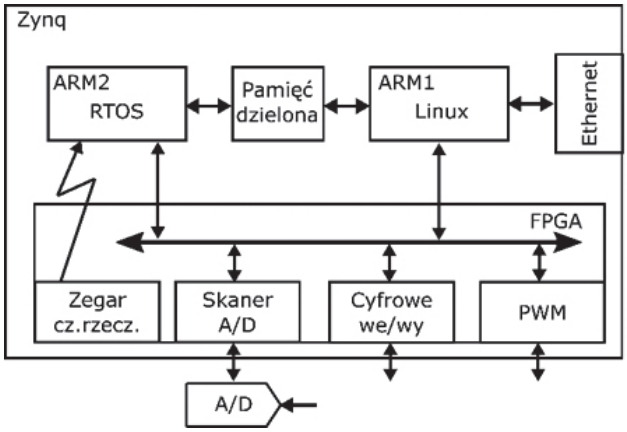


Rys. 7. Niestabilny robot mobilny (a) oraz schemat blokowy urządzenia (b)
Źródło: Knapik i in. (2019)

Mikrokomputer RT-DAC/Zynq wykorzystano zarówno do sterowania, jak i komunikacji. Ze względu na reżimy czasowe systemów sterowania algorytmy podzielono na trzy kategorie:

1) zadania sterujące i przetwarzające sygnały pomiarowe,
2) zadania komunikacyjne i pozostałe, niewymagające zachowania warunków systemu czasu rzeczywistego,
3) zadania obsługujące czujniki na niskim, sprzętowym poziomie.

Pierwsza grupa zadań wykonywana jest przez procesor ARM2, w którym zainstalowany jest system czasu rzeczywistego (RTOS – *Real Time Operating System*). Druga grupa została uruchomiona na rdzeniu ARM1, w systemie operacyjnym Linux, a trzecia grupa została zaimplementowana sprzętowo w układzie FPGA. Oba rdzenie: ARM1 i ARM2 komunikują się poprzez pamięć współdzieloną. Na rysunku 8 zobrazowano powyższe zależności w formie schematu blokowego.



Rys. 8. RT-DAC/Zynq: zadania sterowania, komunikacji i obsługi czujników
Źródło: Knapik i in. (2019)

Najbardziej wymagającym pod względem technicznym zadaniem jest algorytm sterujący, który w każdym kroku sterowania powinien zdążyć przetworzyć informację z czujników oraz obliczyć właściwe wartości współczynników wypełnienia sygnałów PWM. W opracowanym rozwiązaniu zadanie to obliczane jest z częstotliwością 10 kHz z odchyleniem od wartości nominalnej (*jitter*) nieprzekraczającym 12 ns.

Najważniejszym zadaniem systemu sterowania jest obliczenie pętli sprzężenia zwrotnego. W czasie jednego okresu sterowania system pobiera dane z czujnika bezwładnościowego oraz enkoderów inkrementalnych i na tej podstawie oblicza nową wartość sygnału PWM, który wpływa na prędkość obrotową kół. Jak wcześniej wspomniano, aby uzyskać stabilne zachowanie systemu, wykonanie tych operacji musi się odbywać w reżimie czasu rzeczywistego (Gorczyca i in. 2013, Knapik i in. 2019).

4. Inteligentne elektronarzędzia

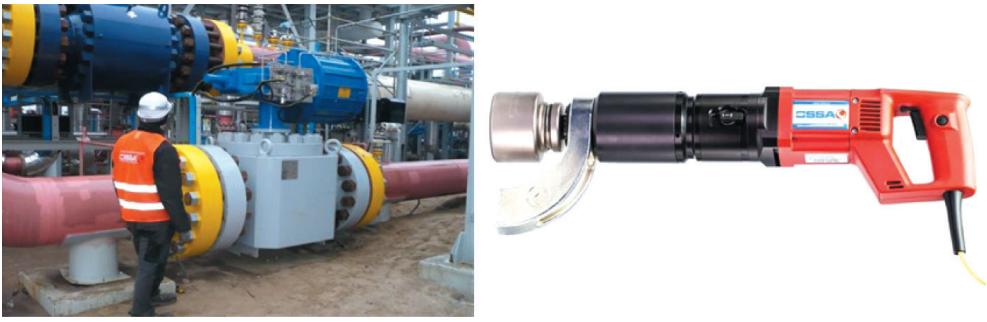
Inteligentne elektronarzędzia są wyposażone w zaawansowane sterowniki cyfrowe, pozwalające na uruchamianie złożonych algorytmów pomiarów, filtracji sterowania oraz diagnostyki. Intensywny rozwój technologii internet rzeczy (IoT – *Internet of Things*) oraz 5G (5^{th} *Generation*) zakładającej pojemność 1 mln urządzeń na 1 km^2, otwiera nowe możliwości w zakresie:

- monitoringu pracy narzędzi,
- zaawansowanej diagnostyki on-line w celu zapobieganiu uszkodzeniom,
- gromadzenia danych do tworzenia nowych algorytmów, w tym adaptacyjnych,
- udoskonalania narzędzi i metod sterowania.

Ze względu na specyfikę pracy oraz sposób użytkowania takich narzędzi przez operatora inteligentne narzędzia stanowią rozwiązanie pośrednie pomiędzy klasycznymi założeniami użytkowymi internetu rzeczy a użytkownikami przemysłowego internetu rzeczy (IIoT – *Industrial IoT*).

Prace związane z problematyką inteligentnych narzędzi były do tej pory prowadzone głównie z wysokomomentowymi zakrętarkami elektromechanicznymi. Zakrętarki takie są urządzeniami służącymi do sprężania połączeń śrubowych, czyli – potocznie mówiąc – do dokręcania śrub. Różnią się znacznie od znanych powszechnie wkrętarek stosowanych w domach i warsztatach czy też pneumatycznych udarowych kluczy stosowanych w warsztatach samochodowych. Urządzenia takie są najczęściej stosowane do skręcania stalowych konstrukcji budowlanych w przemyśle petrochemicznym i chemicznym bądź w energetyce. Na rysunku 9 przedstawiono typową konstrukcję przemysłową skręcaną zakrętarkami elektromechanicznymi oraz zakrętarkę elektromechaniczną.

a) b)



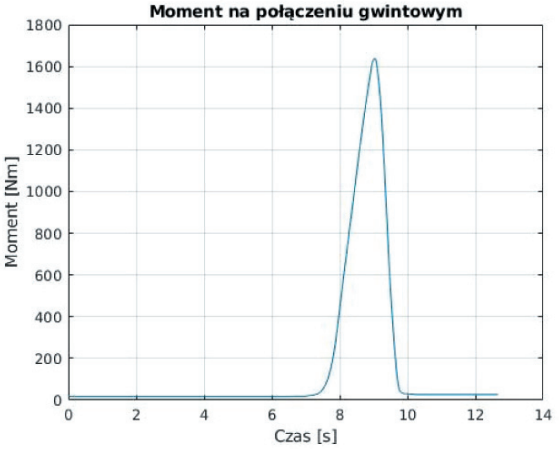
Rys. 9. Typowa konstrukcja skręcana z wykorzystaniem zakrętarek elektromechanicznych (a) oraz zakrętarka elektromechaniczna (b)
Źródło: zdjęcia udostępnione przez firmę OSSA

Typowa zakrętarka jest zbudowana z silnika, przełącznika biegów oraz wielostopniowej przekładni planetarnej. Szybkość dokręcania oraz wykorzystanie wielostopniowej przekładani o przełożeniach rzędu 4000 powoduje, że kontrola procesu dokręcania nie jest problemem trywialnym. Główne problemy, które zidentyfikowano w procesie sprężania połączeń śrubowych tymi urządzeniami, to: dotrzymanie wymaganej normami dokładności zakręcenia, utrzymanie powtarzalności dokręcenia oraz zapewnienie bezpieczeństwa i ergonomii pracy operatora. Zakrętarki elektromechaniczne służą do przykręcania śrub o wymiarach M30 i większych momentem siły powyżej 1000 Nm (zob. rys. 10).

Badania nad układami sterowania inteligentnych narzędzi były prowadzone w ramach prac Zespołu Sterowania Cyfrowego Katedry Automatyki i Robotyki AGH

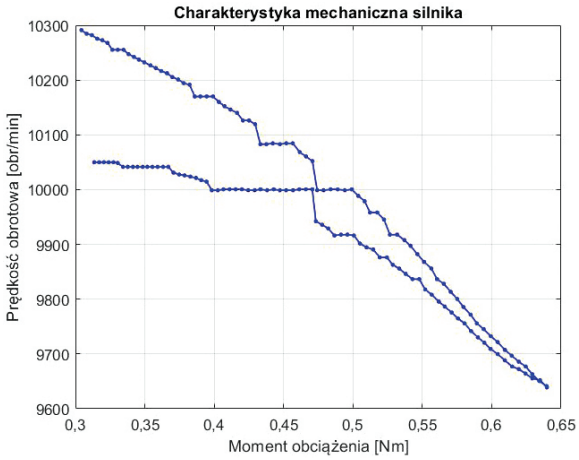
w kooperacji z Zakładem Budowy Maszyn OSSA oraz Instytutem Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. Dotychczas zrealizowano dwa projekty współfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju: inteligentna zakrętarka elektromechaniczna (SETT – *smart electric torque tool*) oraz bezszczotkowa wysokomomentowa zakrętarka elektromechaniczna (BETT – *brushless electric torque tool*).

Prace w ramach projektu SETT zaowocowały powstaniem zakrętarki elektromechanicznej z bezpośrednim pomiarem momentu, napędzanej silnikiem uniwersalnym oraz sterowanej w pełni cyfrowym sterownikiem. Konstrukcja układu sterowania tej zakrętarki wraz metodą sterowania jest chroniona patentem (Ossa i in. 2021).



Rys. 10. Przykładowy przebieg momentu zakręcania mierzony na połączeniu gwintowym

Prace prowadzone w ramach projektu BETT miały na celu zbadanie możliwości wykorzystania silników bezszczotkowych w zakrętarkach elektromechanicznych. Zbudowano odpowiednie stanowiska badawcze, m.in. hamownię, eksperymentalne sterowniki wraz z układami energoelektronicznymi oraz opracowano metody sterowania (Tutaj i in. 2018a). Testy przeprowadzone na hamowni pozwoliły na wykrycie interesującego zjawiska występującego, gdy częstotliwość modulacji PWM jest całkowitą wielokrotnością częstotliwości komutacji sześciokrokowej. Układ napędowy zachowuje się wówczas jak pasożytnicza pętla fazowa (PLL), która przy stałym współczynniku wypełnienia utrzymuje stałą prędkość kątową silnika, w stosunkowo szerokim zakresie, mimo zmieniającego się obciążenia mechanicznego (Tutaj i in. 2018b). Widać to na przykładowej charakterystyce mechanicznej pokazanej na rysunku 11. Zjawisko to wpływa na pogorszenie jakości regulacji. Trwają obecnie prace nad skompensowaniem jego wpływu przez odpowiednią modyfikację metod połączonej modulacji i komutacji.



Rys. 11. Charakterystyka mechaniczna badanego układu napędowego z widocznymi odcinkami, na których prędkość pozostaje stała mimo zmieniającego się obciążenia mechanicznego
Źródło: opracowanie własne na podstawie Tutaj i in. (2018a)

Kontynuacją działań prowadzonych w projektach są trwające obecnie prace na konstrukcją układu sterowania oraz algorytmami sterowania akumulatorowej zakrętarki elektromechanicznej oraz nad urządzeniami do pomiaru i kontroli momentu dokręcania.

5. Podsumowanie

Prace zespołu koncentrują się w przeważającej mierze na wykorzystaniu w praktyce otrzymanych analitycznie rezultatów teoretycznych. Przejście od teorii do praktyki na ogół nie jest łatwe w związku z: występującymi w świecie fizycznym zakłóceniami mierzonych sygnałów, technicznymi problemami z wiernym odwzorowaniem w praktyce abstrakcyjnego pojęcia sygnału (funkcji) i wreszcie nie zawsze wystarczająco dokładnym modelem matematycznym symulującym przebieg zjawisk fizycznych.

Literatura

Firlit A., Kołek K., Piątek K., 2017, *Heterogeneous active power filter controller*, [w:] Muštra M., Vitas D., Zovko-Cihlar B. (eds.), *Proceedings of Elmar-2017: 59th International Symposium: 18–20 September 2017, Zadar, Croatia*, University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Zagreb, s. 241–244. https://doi.org/10.23919/ELMAR.2017.8124477.

Gorczyca P., Knapik D., Kołek K., Rosół M., 2013, *Rapid development of real-time applications for ARM Cortex A9*, [w:] Trybus L., Mastalerz M.W. (eds.), *Design, Development and Implementation of Real-Time Systems*, Polish Information Processing Society, Warszawa, s. 145–155.

Hölttä V., Palmroth L., Eriksson L., 2004, *Rapid control prototyping tutorial with application examples*. https://www.researchgate.net/publication/228977687_Rapid_control_prototyping_tutorial_with_application_examples.

Knapik D., Kołek K., Rosół M., Turnau A., 2019, *Autonomous, reconfigurable mobile vehicle with rapid control prototyping functionality*, IFAC-PapersOnLine, vol. 52(8), s. 13–18. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.041.

Kołek K., Firlit A., 2021, *A New Optimal Current Controller for a Three-Phase Shunt Active Power Filter Based on Karush–Kuhn–Tucker Conditions*, Energies, vol. 14, 6381. https://doi.org/10.3390/en14196381.

Ossa J., Zawada Ł., Ossa B., Piątek P., Piłat A., Pauluk M., Marchewka D., Baranowski J., Dziwiński T., 2021, *Układ sterowania zakrętarki* [*Torque tool control arrangment*]. EP 3450107 B1.

Pauluk M., 2020, *Nowoczesne technologie projektowania systemów automatyki*, PAR Pomiary Automatyka Robotyka, R. 24, nr 4, s. 85–91. https://doi.org/10.14313/PAR_238/85.

Tutaj A., Drabek T., Dziwiński T., Baranowski J., Piątek P., 2018a, *Unintended synchronisation between rotational speed and PWM frequency in a PM BLDC drive unit*, [w:] *MMAR 2018: 23rd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics: 27–30 August 2018, Międzyzdroje, Poland: abstracts*, ZAPOL Sobczyk Sp.j., Szczecin, s. 959–964.

Tutaj A., Drabek T., Dziwiński T., Piątek P., Baranowski J., 2018b, *Automatyczne stanowisko pomiarowe do badań wysokoobrotowych silników elektrycznych małych mocy*, Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe, nr 2 (118), s. 59–65.

Zagorski P., Bangert P., Gallina A., 2017, *Identification of the orbit semi-major axis using frequency properties of onboard magnetic field measurements*, Aerospace Science and Technology, vol. 66, s. 380–391. https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.03.024.

Zagorski P., Dziwinski T., Tutaj A., 2018, *Steepest descent quaternion attitude estimator*, Aerospace Science and Technology, vol. 77, s. 1–10. https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.01.030.

Zagórski P., Król P., Gallina A., 2020, *Batch Algorithm for Balancing the Air Bearing Platform*, [w:] Bartoszewicz A., Kabziński J., Kacprzyk J. (eds.), *Advanced, Contemporary Control: Proceedings of KKA 2020 – the 20th Polish Control Conference: [14–16 October 2020], Łódź, Poland*, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1196, Springer, Cham, s. 736–746. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50936-1_62.