

Wektorowy falownik napięciowy z pomiarem rzeczywistego napięcia wyjściowego

Rafał Nowak, Piotr Chudzik, Tomasz Sobieraj

1. Wstęp

W napędach o dużych wymaganiach dynamicznych bardzo ważną rolę pełnią wektorowe regulatory prądów. Ich szczególne znaczenie wynika z bezpośredniego wpływu odpowiednich składowych wektora na wartość momentu i strumienia maszyny. Najpopularniejszym układem do kształtowania wartości prądu w napędach przemysłowych jest struktura składająca się z regulatora prądu wyznaczającego na podstawie uchybu między jego wartością zadaną i rzeczywistą odpowiednią wartość wektora napięcia, którą powinien wytworzyć na swoich zaciskach falownik tranzystorowy. Gdy falownik nie wykonuje powierzonego mu zadania w sposób dokładny, pojawia się dodatkowe zakłócenie, które musi skompensować układ regulacji prądów. Dla syntezy tego układu bardzo ważną informacją jest charakter zakłócenia wnoszonego przez falownik. W celu wykonania badań pozwalających na stworzenie nowych struktur regulacji prądu podjęto decyzję o wykonaniu układu falownika z precyzyjnym pomiarem rzeczywistej wartości napięcia wyjściowego.

W artykule zaprezentowano przekształtnik skonstruowany w Instytucie Automatyki Politechniki Łódzkiej przeznaczony do badań silników synchronicznych z magnesami trwałymi. Omówiono przyjęte założenia projektowe, ze szczególnym uwzględnieniem modułu pomiarowego napięć wyjściowych falownika. Przedstawiono algorytmy działania urządzenia i zamieszczono wybrane przebiegi w charakterystycznych stanach pracy układu.

2. Błędy w kształtowaniu napięcia w układzie falownika 6T

Falownik jest układem o charakterze dyskretnym, zatem zadanie wytworzenia określonej wartości napięcia jest w nim realizowane poprzez załączenie określonej sekwencji sygnałów sterujących kluczami falownika. Każdy ze stanów kluczy tranzystorowych odpowiada zwieraniu odpowiedniej fazy silnika do dodatniego lub ujemnego zacisku obwodu zasilania. W zależności od użytych elementów tranzystorowych, posiadających określone parametry przewodzenia (rezystancje w przypadku tranzystorów MOSFET lub spadek napięcia w tranzystorach IGBT) oraz ograniczenia związane z czasami ich załączania i wyłączenia, rzeczywiście realizowana fala napięciowa odbiega od tej która została zadana na przykład przez układ regulacji prądu.

Niepożądane zniekształcenia wartości zadanej powstają również na skutek zastosowania danego algorytmu mo-

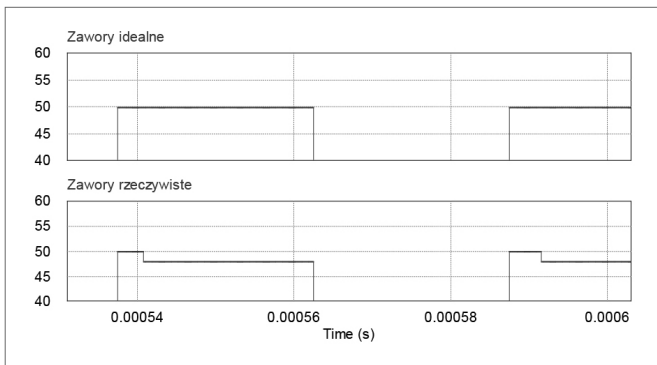
Streszczenie: W artykule przedstawiono wektorowy falownik napięciowy zaprojektowany w Instytucie Automatyki Politechniki Łódzkiej, przeznaczony do badań laboratoryjnych silników synchronicznych z magnesami trwałymi. Główną cechą prezentowanego urządzenia jest możliwość elastycznej konfiguracji jednostki sterującej wyposażonej zarówno w mikrokontroler z rdzeniem ARM, jak również układ rekonfigurowalny FPGA. Dzięki takiemu rozwiązaniu uzyskano możliwość testowania algorytmów sterowania napędami przeznaczonymi zarówno do stosowania w układach sekwencyjnych (mikrokontrolery), jak również w układach programowalnych (FPGA). Zaletą urządzenia jest możliwość synergicznego podziału realizacji algorytmu pomiędzy te dwie obecnie najpowszechniej wykorzystywane architektury obliczeniowe. Opisano specjalnie zaprojektowany układ pomiarowy napięcia wyjściowego falownika. To autorskie rozwiązanie pozwala nie tylko zmniejszyć wymagania co do parametrów podzespołów analogowych użytych do budowy toru pomiarowego, ale również w znaczący sposób odciążać jednostkę obliczeniową układu sterującego. W artykule omówiono przyjęte założenia projektowe oraz algorytmy działania urządzenia. Zamieszczono również wybrane przebiegi w charakterystycznych stanach pracy układu.

Słowa kluczowe: mikrokontroler z rdzeniem ARM, układ programowalny FPGA, falownik tranzystorowy, modulacja wektorowa, silnik synchroniczny z magnesami trwałymi

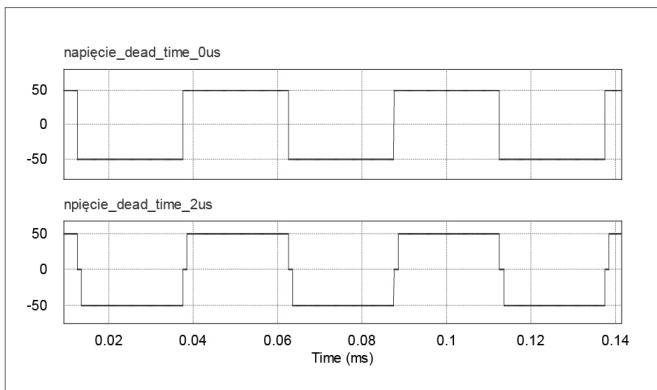
🇬🇧 VOLTAGE INVERTER WITH TRUE OUTPUT VOLTAGE MEASUREMENT SYSTEM

Abstract: The paper presents a power converter designed in the Institute of Automatic Control Lodz University of Technology intended for laboratory tests PMSM motors. The main feature of the presented device is the ability to flexibly configure the control unit that contains both the ARM microcontroller core and the reconfigurable FPGA system. This solution achieved the possibility of testing the drive control algorithms intended for use in both the sequential circuits (MCUs), as well as programmable circuits (FPGA). Advantage is the possibility of synergistic implementation of the algorithm, the division between the two currently most widely used computing architectures. Describes the specially designed true output voltage measurement system. This proprietary solution allows not only to reduce the demands on the performance of analog components used in the construction of the measuring circuit, but also significantly relieve the unit of account by the control system. The paper contains a discussion of the assumptions and algorithms design performance. It also provides selected waveforms in typical operating conditions of the system.

Keywords: ARM microcontroller, field-programmable gate array (FPGA), transistor inverter, vector modulation, PMSM motor



Rys. 1. Zniekształcenia napięcia wyjściowego falownika spowodowane spadkami napięcia na kluczach



Rys. 2. Zniekształcenia napięcia wyjściowego falownika wywołane czasem martwym

dulacji, wprowadzenia stref martwych (ang. *dead-time*), czy też pracy w tzw. obszarze nadmodulacji [1, 2].

Wszystkie opisane powyżej czynniki mają wpływ na jakość sterowania silników posiadających trójfazowe uzwojenie stojana, ponieważ każdy z algorytmów sprowadza się, w końcowej fazie, do wyliczenia wektora napięcia, jakim należy go zasilić, a następnie jego realizacji przy zastosowaniu falownika wyposażonego w modulator szerokości impulsów.

3. Konstrukcja przekształtnika

Przekształtnik skonstruowany w Instytucie Automatyki Politechniki Łódzkiej przeznaczony jest do współpracy z kartą pomiarowo-sterującą DSpace, która pełni rolę nadrzędnego układu sterowania. Laboracyjny falownik napięciowy jako układ podrzędny realizuje na wyjściach napięcie w postaci trójfazowej fali napięciowej z modulacją VPWM. W zależności od wybranego trybu pracy na wejścia analogowe falownika pracujące w zakresie ± 10 V podawana jest wartość zadana wektora napięcia V_d_zad i V_q_zad , które reprezentują składowe wektora napięcia we współrzędnych wirujących synchronicznie z wirnikiem silnika, wartość zadana wektora prądu I_d_zad i I_q_zad , które reprezentują składowe wektora prądu we współrzędnych wirujących synchronicznie z wirnikiem silnika, bądź też wartość zadana prędkości kątowej wału. Informacja o położeniu wirnika uzyskiwana jest z inkrementalnego przetwornika położenia umieszczonego na wale silnika i jest dostarczana w po-

staci sygnałów cyfrowych w standardzie TTL. Sterownik jako informację zwrotną do karty pomiarowej wytwarza sygnały analogowe V_d_pom , V_q_pom , będące reprezentacją wektorową mierzonego napięcia falownika, I_d_pom , I_q_pom , będące reprezentacją wektorową mierzonego prądu falownika oraz Θ_1 , Θ_2 , będące funkcjami sinus i kosinus aktualnego kąta położenia wirnika.

Podczas konstruowania przekształtnika uwzględniono nie tylko dopuszczalne zakresy wartości elektrycznych użytych podzespołów energoelektronicznych, ale również ograniczenia narzucone od strony silnika [3]. Aby sprostać tym wymaganiom, urządzenie wyposażono w kartę SD zawierającą zarówno informacje o dołączonej maszynie, jak również nastawy regulatorów prądu oraz dopuszczalne zakresy wartości skutecznych napięcia oraz prądu doprowadzanych do zacisków silnika.

Falownik jest układem o strukturze modułowej. Składa się z:

- modułu mocy, zawierającego mostek tranzystorowy 6T, z tranzystorem rezystora hamowania (czoper), drivery tranzystorów mocy z możliwością sterowania statycznego oraz układy pomiarowe sygnałów analogowych;
- modułu sterownika, zawierającego w zależności od wybranej konfiguracji układ mikroprocesorowy Silica Xynergy Board, wyposażony w mikrokontroler STM32F217 oraz układ rekonfigurowalny FPGA Xilinx Spartan 6 lub zestaw uruchomieniowy FPGA KC705 Evaluation Kit.

Moduł sterownika składa się z:

- układów interfejsu analogowo-cyfrowego umożliwiającego podłączenie sterownika do nadrzędnej karty sterującej DSpace;
- układów szybkich przetworników analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych;
- złącza sterownika mikroprocesorowego/FPGA;
- analogowego układu pomiaru wartości napięcia metodą całkowania;
- dwóch szybkich kanałów pomiaru napięcia międzyfazowego zrealizowanych na wzmacniaczach różnicowych.

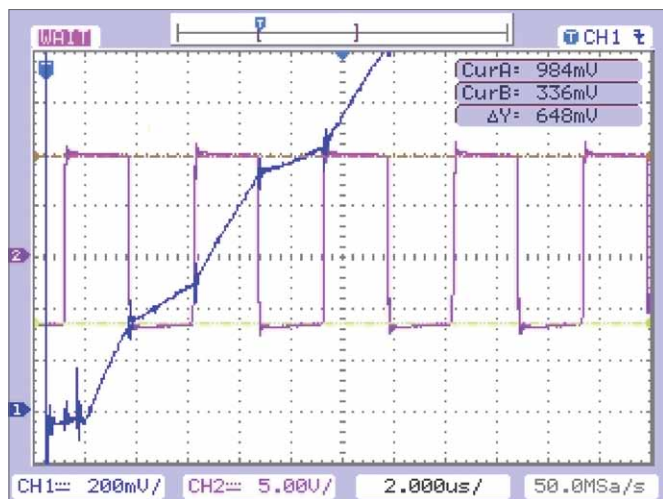
Głównym założeniem konstrukcyjnym urządzenia jest możliwość elastycznej konfiguracji sterownika w dwóch wariantach pracy, różniących się jednostką wykonującą algorytmy modulacji wektorowej napięcia zadawanego.

4. Układ pomiaru napięcia wyjściowego falownika

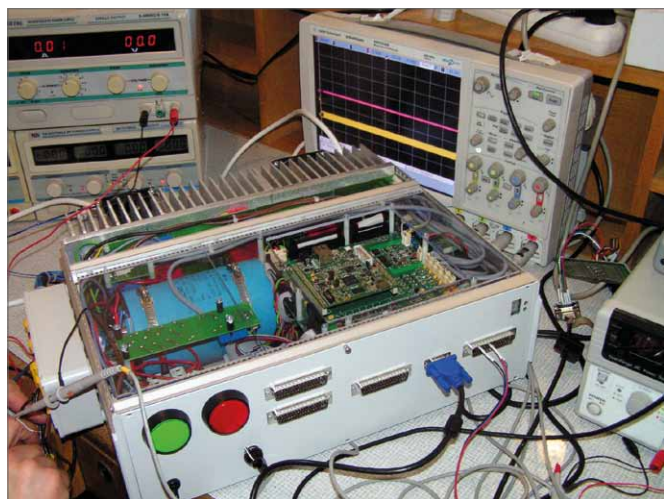
Dokonywanie pomiaru napięcia wyjściowego falownika jest rzeczą dość skomplikowaną, ze względu na zbliżony do prostokątnego kształt tego przebiegu, duże stromości zboczy i specyfikę układu trójfazowego.

Najprostsze rozwiązanie, polegające na bezpośrednim zastosowaniu przetworników pomiarowych typu LEM, nie spełnia w takim przypadku oczekiwań, gdyż przetworniki wprowadzają znaczne ograniczenia częstotliwości sygnału i eliminują część harmonicznych.

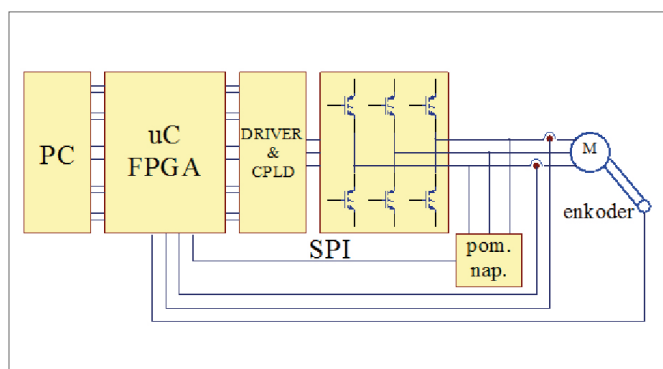
Jednym ze sposobów wyznaczania napięcia wyjściowego układu falownikowego jest przyjęcie założenia o poprawnej realizacji zadanego wektora przez układ kluczy tranzystorowych. Określanie wartości napięcia międzyfazowego na podstawie stanu zaworów falownika może jednak prowadzić, w najbardziej niekorzystnych warunkach, do znacznych błędów pomiarowych [4].



Rys. 3. Oscylogram przedstawiający zasadę działania układu pomiarowego

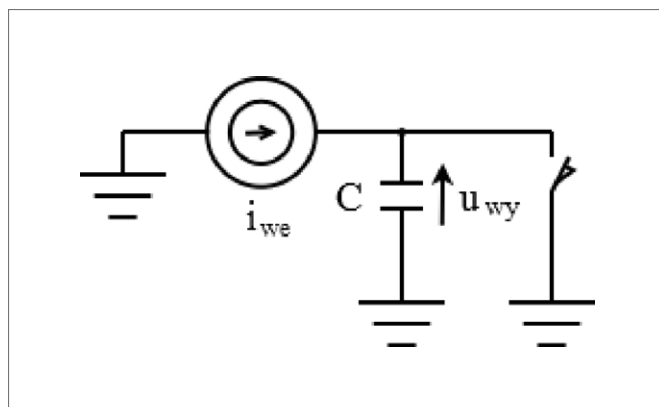


Rys. 4. Zdjęcie falownika



Rys. 5. Schemat blokowy całego falownika

Najdokładniejszym, ale jednocześnie najbardziej złożonym obliczeniowo sposobem jest zastosowanie nadpróbkowania sygnału mierzonego. Wiąże się to z koniecznością zastosowania szybkich przetworników analogowo-cyfrowych o dużej rozdzielczości, które dokonują bezpośredniego pomiaru fali prostokątnej napięcia międzyprzewodowego. Przeprowadzenie obróbki dużej ilości danych generuje potrzebę zastosowania silnej jednostki obliczeniowej i nie zapewnia pokrycia obszarem pomiaru szybkich impulsowych zmian napięcia.



Rys. 6. Schemat blokowy układu pomiaru napięcia międzyfazowego

Ze względu na znaczenie tej metody pomiaru podjęto decyzję o wyposażeniu jednostki sterującej falownika w dwa szybkie kanały pomiarowe, składające się ze wzmacniaczy różnicowych oraz szesnastobitowych przetworników analogowo-cyfrowych.

Prezentowany w artykule falownik zawiera ponadto układ pomiarowy, który pozwala na uzyskanie informacji o wartości napięcia wyjściowego średniego mierzonego za okres modulacji falownika.

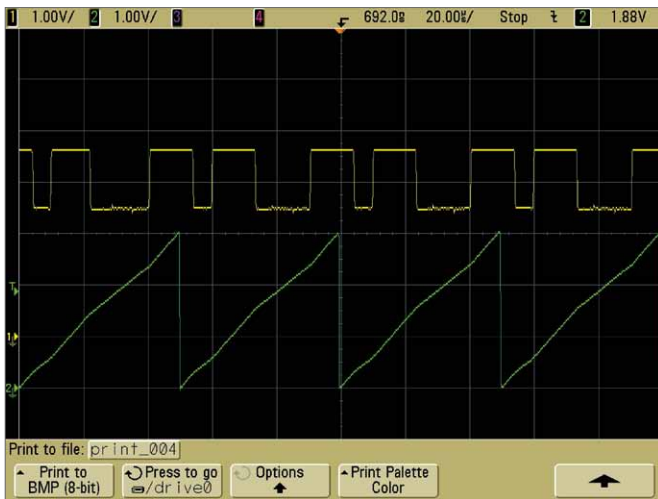
Z myślą o przeprowadzaniu tego typu pomiarów został skonstruowany specjalny układ pomiarowy, którego schemat blokowy zaprezentowano na rysunku 6. Wystarczające jest, aby wartość chwilowa prądu wytwarzanego przez źródło prądowe była proporcjonalna do mierzonego napięcia międzyprzewodowego. Jednakże ze względu na zastosowanie przetwornika analogowo-cyfrowego dostosowanego do napięć wejściowych mieszczących się w przedziale od 0 do 5V oraz konstrukcję obwodu rozładowującego kondensator pomiarowy, złożoną z pojedynczego tranzystora typu MOSFET, wartość napięcia zostaje przesunięta o pewien offset, dzięki czemu prąd i_{we} przyjmuje tylko wartości dodatnie. Kondensator pomiarowy jest ładowany w czasie trwania pojedynczego okresu przebiegu PWM, wynoszącego 50 μ s, po czym wartość napięcia występująca na nim jest odczytywana przez przetwornik analogowo-cyfrowy i kondensator jest rozładowywany (w czasie ok. 400 ns).

$$i_{we}(t) = k_1(k_2 u_{vw}(t) + v_{offset}) \quad (1)$$

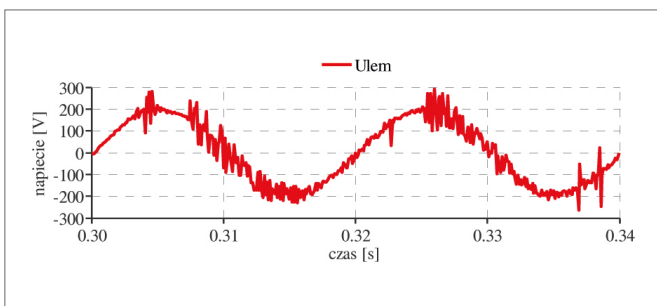
$$u_{wy}(t) = k_3 \frac{1}{C} \int i_{we}(t) dt - v_{offset} \quad (2)$$

5. Charakterystyczne stany pracy falownika

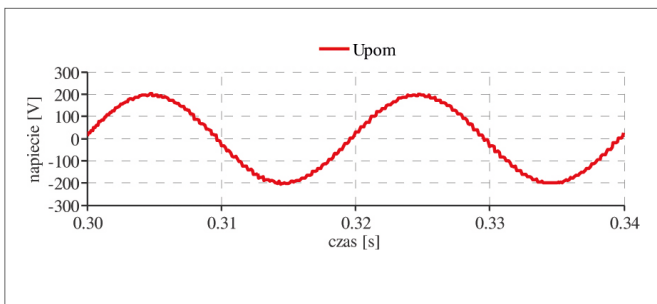
W celu weryfikacji poprawności działania układu pomiarowego przeprowadzono test. Polegał on na doprowadzeniu do wejścia Vd_zad przebiegu sinusoidalnego, natomiast do wyjść falownika podłączono zewnętrzny układ pomiarowy, składający się z filtra dolnoprzepustowego stanowiącego połączenie kondensatora o pojemności 470 nF i rezystora 2 k Ω . Wyniki pomiarów uzyskanych przy jego użyciu skonfrontowano z wynikami uzyskanymi ze specjalnie zaprojektowanego układu pomiaru napięcia wyjściowego falownika.



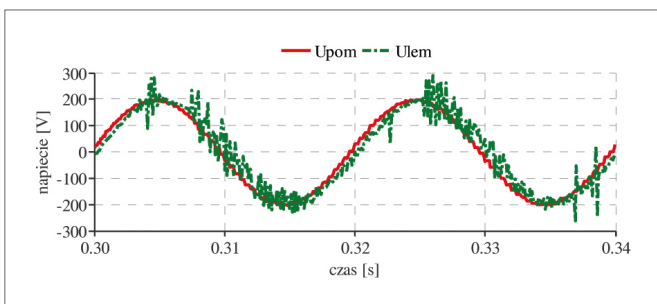
Rys. 7. Oscylogram przedstawiający przebieg jednego z sygnałów PWM oraz napięcia wyjściowego układu pomiaru napięcia międzyfazowego



Rys. 8. Przebieg napięcia wyjściowego falownika uzyskany z zewnętrznego przetwornika typu LEM podłączonego do wyjść falownika poprzez filtr dolnoprzepustowy



Rys. 9. Przebieg napięcia wyjściowego falownika uzyskany z układu pomiaru napięcia wyjściowego



Rys. 10. Porównanie przebiegu napięcia wyjściowego falownika uzyskanego z zewnętrznego przetwornika typu LEM, podłączonego do wyjść falownika poprzez filtr dolnoprzepustowy, z przebiegiem napięcia wyjściowego falownika uzyskanego z układu pomiaru napięcia wyjściowego

Rysunek 7 obrazuje zasadę działania układu pomiarowego opisanego w punkcie 4.

Analizując rysunek 8, przedstawiający przebieg napięcia wyjściowego falownika uzyskanego z zewnętrznego przetwornika typu LEM podłączonego do wyjść falownika poprzez filtr dolnoprzepustowy, widać, że występują w nim szумы pomiarowe o znacznej wartości wynikające z braku synchronizacji pomiędzy sterowaniem kluczy falownika a chwilą dokonywania rejestracji poszczególnych próbek napięcia mierzonego. Wady tej pozbawiony jest wewnętrzny układ pomiarowy. Warto zauważyć również (rysunek 10), że w przypadku wykorzystania filtra dolnoprzepustowego do przebiegu mierzonego zostaje wprowadzone opóźnienie fazowe.

6. Podsumowanie

Opisany wektorowy falownik napięciowy z układem pomiarowym rzeczywistego napięcia wyjściowego umożliwia prowadzenie badań laboratoryjnych mających na celu opracowanie algorytmów regulatorów prądu wyposażonych w tor korekcji napięcia wyjściowego. Szczególnie ważnym obszarem zastosowań takich regulatorów są układy napędowe pracujące przy biegu jałowym.

7. Literatura

- [1] BEN-BRAHIM L.: *The analysis and Compensation of dead-time effects in three phase PWM inverters*. IEEE 0-7803-4503-7/98, 1998, s. 792–797.
- [2] JONG WOO CHOI, SUNG IL YONG, SEUNG KI SUL: *Inverter Output Voltage Synthesis Using Novel Dead Time Compensation*. IEEE 0-7803-1456-5/94, 1994, s. 100–106.
- [3] DĘBOWSKI A., NOWAK R.: *Wyznaczanie dopuszczalnego obszaru pracy trakcyjnego napędu asynchronicznego*. „Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)”, nr 4b, 2012, s. 47–52.
- [4] KRAWIECKI M., SOBIERAJ T.: *Analiza błędów wyznaczania wartości napięcia międzyfazowego na podstawie stanu zaworów falownika*. Konferencja SENE 2001.



mgr inż. Rafał Nowak – Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, e-mail: nowy@plusnet.pl



dr inż. Piotr Chudzik – Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, e-mail: piotr.chudzik@p.lodz.pl



dr inż. Tomasz Sobieraj – Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, e-mail: tomasz.sobieraj@p.lodz.pl