

Wojciech CZUCHRA, Marek ŻYTKA, Bogdan ANKUDOWICZ

POLITECHNIKA KRAKOWSKA,
Warszawska 24, 31-155 Kraków

Mikroprocesorowy system do wyznaczania prądu psfometrycznego pojazdu trakcyjnego

Dr inż. Wojciech CZUCHRA

Adiunkt w Katedrze Trakcji i Sterowania Ruchem Politechniki Krakowskiej. Obszar naukowy obejmuje Kompatybilność Elektromagnetyczną (EMC) w transporcie. Autor licznych publikacji z zakresu EMC pojazdów i systemów trakcyjnych. Działalność dydaktyczna prowadzona na studiach I-go i II-go stopnia w zakresie przedmiotów z tematyki EMC.



e-mail: wczuchra@pk.edu.pl

Inż. Marek ŻYTKA

Urodzony w 1989 roku w Sanoku. Student studiów stacjonarnych II stopnia Politechniki Krakowskiej na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, kierunek elektrotechnika, specjalność Systemy Trakcji Elektrycznej. Członek Koła Naukowego Techniki Cyfrowej Politechniki Krakowskiej.



e-mail: zmarek89@gmail.com

Inż. Bogdan ANKUDOWICZ

Urodzony 1989 roku w Bielsku-Białej. Student studiów stacjonarnych II stopnia Politechniki Krakowskiej na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, kierunek elektrotechnika, specjalność Systemy Trakcji Elektrycznej. Członek Koła Naukowego Techniki Cyfrowej Politechniki Krakowskiej.



e-mail: bogdan.ankudowicz@gmail.com

Streszczenie

Badania homologacyjne nowych i modernizowanych pojazdów trakcyjnych wymagają m.in. pomiaru prądu psfometrycznego według PN-EN 50121-3-1. W artykule przedstawiono układ do wyznaczania tej wielkości, zbudowany w oparciu o mikrokontroler. System charakteryzuje się szybkim uzyskaniem wyniku podawanego w sposób ciągły, np. podczas całego przejazdu badanego pojazdu trakcyjnego oraz dodatkowo łatwością obsługi i małymi gabarytami.

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, trakcja elektryczna, prąd psfometryczny, mikrokontroler.

The microcontroller system for the traction vehicle's psophometric current determination

Abstract

Many high power electronic devices working as main drive and auxiliary inverters are being installed in traction vehicles. It requires to pay particular attention to electromagnetic compatibility (EMC) of traction systems. Certification tests for new and modernized traction vehicles require among others the measurement of psophometric current according to PN-EN 50121-3-1. A system used for determination of this value, built on the basis of microcontroller is shown in the article. The task of this device is to measure (record) vehicle's supply current, its FFT analysis and calculation of psophometric current in frequency range from 50Hz to 5kHz. Determined parameter has been defined and details related to normative measurement conditions have been specified. Individual blocks of presented system have been discussed, including with current measurement converter (Rogowski coil). Description and remarks related to configuration of used microcontroller were presented as well. Possibilities of using program libraries for FFT scope have been provided and results of initial test have been shown. Possibilities of system presented in the article facilitate significantly determining of measured value in heavy conditions of test site. System is characterized by fast result acquiring delivered continuously e.g. during the whole ride of tested vehicle and additional by service easiness and small gauge.

Keywords: electromagnetic compatibility, electric traction, psophometric current, microcontroller.

1. Wstęp

W pojazdach trakcyjnych instaluje się obecnie wiele urządzeń energoelektronicznych dużej mocy, pracujących jako przekształtniki napędów głównych i pomocniczych. Wymaga to zwrócenia szczególnej uwagi na aspekt kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) systemów trakcyjnych. Zakłócenia generowane przez układy energoelektroniczne mogą negatywnie oddziaływać na obwody sterowania ruchem, systemy łączności oraz układy automatyki. Obecnie dopuszczalne poziomy zakłóceń definiowane są m.in. poziomem prądu płynącego w torach w szerokim zakresie częstotliwości, co jest tematem wielu artykułów [1, 2].

Tematem artykułu jest mikroprocesorowy układ do wyznaczania prądu psfometrycznego pojazdu trakcyjnego według normy PN-EN 50121-3-1 [5]. Zadaniem tego urządzenia jest pomiar (rejestracja) prądu zasilania pojazdu, jego analiza FFT i obliczenie wartości prądu psfometrycznego w zakresie częstotliwości od 50Hz do 5kHz. Cechą tego systemu jest jego autonomiczność i możliwość łatwego zastosowania przez użytkownika bez korzystania z dodatkowych urządzeń obliczeniowych. Układ ma wyjście, które umożliwia także ciągły zapis wyznaczonego prądu psfometrycznego przy pomocy zewnętrznego układu rejestrującego. W artykule przedstawiono także wskazówki dotyczące konfiguracji zastosowanego układu mikrokontrolera, możliwości wykorzystania bibliotek programowych oraz wyniki badań testowych. Zwrócono uwagę na ściśle sprecyzowane w normie warunki pomiaru. System może znaleźć zastosowanie w pomiarach zakłóceń generowanych do sieci trakcyjnej tj. przy badaniu przekształtnikowych pojazdów trakcyjnych według normy PN-EN 50121-3-1 lub przy badaniu podstacji trakcyjnych wyposażonych w prostowniki generujące wyższe harmoniczne.

2. Prąd psfometryczny

Standardowy telekomunikacyjny kabel miedziany w pobliżu zelektryfikowanej linii kolejowej podlega zakłóceniom elektromagnetycznym powodowanym przez wyższe harmoniczne prądu w sieci kolejowej. Głównym źródłem generowania harmonicznych są przekształtniki w systemach napędowych pojazdu trakcyjnego oraz podstacje trakcyjne zawierające prostowniki. Pomiar zakłóceń dokonuje się za pomocą filtrów psfometrycznych, a ich dopuszczalny poziom w standardowych liniach telefonicznych jest określony przez Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny ITU-T (International Telecommunication Union).

Związek pomiędzy prądem pobieranym przez pojazd trakcyjny, a zakłóceniami w linii telekomunikacyjnej zależy od wielu czynników: topologii sieci telekomunikacyjnej i kolejowej, systemu zasilania sieci trakcyjnej, oraz harmonicznych w prądzie pojazdu trakcyjnego [5].

Prąd psfometryczny jest ekwiwalentem prądu zaburzeń, który reprezentuje efektywne zaburzenia widma prądu w obwodzie zasilającym wobec linii telefonicznej. Prąd psfometryczny zdefiniowany jest wzorem [5]:

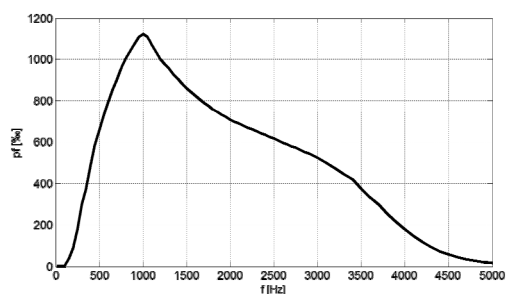
$$I_{ps0} = \frac{1}{p_{800}} \sqrt{\sum (p_f I_f)^2} \quad (1)$$

gdzie: I_f - składowa prądu o częstotliwości f w prądzie zasilania pojazdu, p_f - współczynnik ważkości psfometrycznej dla częstotliwości f , p_{800} - współczynnik ważkości psfometrycznej dla częstotliwości odniesienia dla torów telefonicznych $f_0 = 800$ Hz.

Wartość współczynnika p_f podana jest w Dyrektywie ITU-T [4]. Współczynnik ważkości określa się wzorem:

$$p_f = \frac{U_{800}}{U_f} \quad (2)$$

gdzie: p_f - współczynnik ważkości, U_{800} - napięcie o częstotliwości $f=800$ Hz, U_f - napięcie o danej częstotliwości, które daje ten sam efekt co U_{800} .



Rys. 1. Współczynnik ważkości psfometrycznej w funkcji częstotliwości
Fig. 1. Psophometric significance factor vs. the frequency

Norma PN-EN-50121-3-1 podaje, że do obowiązku nabywcy pojazdu trakcyjnego należy określenie maksymalnej wartości prądu psfometrycznego oraz warunków, dla których został zdefiniowany. Dotyczy to warunków pracy normalnych i złagodzonych (jeden lub więcej przekształtników wyłączonych). Przy ocenie pojazdu trakcyjnego należy uwzględnić udział prostowników i filtrów podstacji oraz odległości pomiędzy pojazdem trakcyjnym i podstacją. W czasie badań prąd psfometryczny I_{ps0} należy mierzyć na pokładzie pojazdu trakcyjnego silnikowego. Pomiaru dokonuje się psfometrem lub innym odpowiednim urządzeniem zawierającym filtr zgodny z psfometrycznym współczynnikiem ważonym p_f . Interpretacja wyników pomiarowych powinna uwzględniać wpływ warunków pracy jak również zmiany indukcyjności przewodów i zmiany napięcia zasilania. Przy ocenie nie należy uwzględniać skutków stanów przejściowych tj. procesów łączeniowych, odskoków pantografów itp. [5].

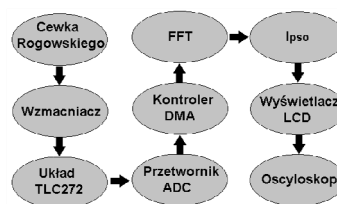
3. Opis układu pomiarowego

Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy układu do wyznaczenia prądu psfometrycznego.

Jako przetwornik prądu zastosowano cewkę Rogowskiego. Rozpina budowa cewki pozwala na nałożenie jej na przewód i łatwy pomiar prądu przy zapewnieniu izolacji galwanicznej. W cewce indukuje się siła e_t proporcjonalna do pochodnej natężenia mierzonego prądu [3].

$$e_t = - \frac{\mu_0 N r^2}{2R_0} \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

gdzie: μ_0 - przenikalność magnetyczna, N - liczba zwojów cewki, r - promień zwoju, R_0 - promień cewki.

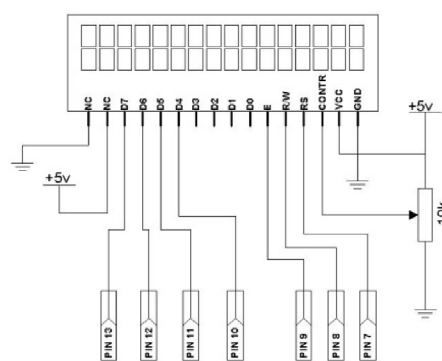


Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego
Fig. 2. Block scheme of the measurement system

W układzie pomiarowym zastosowano cewkę CWT 1NB 20 mV/A. Ze względu na niską wartość składowej przemiennej prądu mierzonego w układzie laboratoryjnym, do układu został dołączony wzmacniacz o wzmocnieniu 10. Przelicznik napięcia wyjściowego na prąd jest więc równy 200 mV/A. W przypadku pomiaru większych wartości prądów, gdzie wartość napięcia przekracza 3 Vpp należy pomiar przeprowadzać bez dodatkowego wzmacniacza. Sygnał z cewki Rogowskiego wymagał przekonwertowania do zakresu 0-3,3 V ze względu na zakres pracy przetwornika analogowo-cyfrowego w mikrokontrolerze STM32F4. Jako układ dopasowujący zastosowano wzmacniacz TLC272.

Głównym narzędziem pomiarowym użytym w układzie jest mikrokontroler STM32F4-DISCOVERY firmy ST Microelectronics. Oferowane mikrokontrolery posiadają obecnie rdzenie o prędkości taktowania 168MHz, do 1MB pamięci FLASH, do 192kB pamięci SRAM. Zasilane napięciem 2,0-3,6V, kompatybilne Pin-to-Pin i dostępne są w obudowach QFN, LQFN, BGA. Mikrokontrolery rodziny STM32 charakteryzują się bardzo dobrze rozwiniętymi peryferiami, co umożliwia wykorzystanie ich w wielu aplikacjach. Konfiguracja mikrokontrolera obejmuje: konfigurację portów wejściowych, konfigurację przetwornika analogowo-cyfrowego ADC, konfigurację kontrolera DMA oraz konfigurację timera wyzwalającego przetwornik AC [6].

W układzie został zamontowany standardowy alfanumeryczny wyświetlacz LCD 2x16 podświetlany, zasilany napięciem +5 V. Sterownik wyświetlacza jest zgodny z biblioteką HD44780, która została załączona do programu głównego.



Rys. 3. Schemat podłączenia wyświetlacza LCD do układu STM32F4
Fig. 3. Scheme of connection between LCD display and STM32F4 system

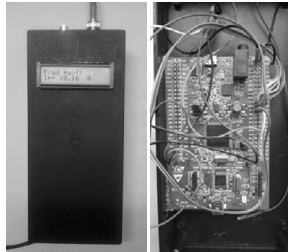
4. Uruchomienie układu i badania testowe

W układzie wykorzystano przetwornik ADC3 pracujący z częstotliwością próbkowania 10 kHz wyzwalany za pomocą zegara TIM3. Sprawdzenie przetwornika zostało przeprowadzone dla różnych częstotliwości za pomocą generatora, a wynik odczytywano bezpośrednio z komórek pamięci przy wykorzystaniu debugera programu Keil uVision4.

Najpopularniejszym algorytmem do wyznaczenia harmonicznych, stosowanym w układach wbudowanych jest FFT (Szybka transformata Fouriera).

Jedną z udostępnionych przez firmę STM bibliotek jest *STM32F4xx DSP and Standard Peripherals Library*. Jest to kompletny pakiet, składający się ze sterowników do wszystkich stan-

dardowych urządzeń peryferyjnych. Ta biblioteka jest pakietem oprogramowania, który zawiera zbiór procedur, struktur danych i makra obejmujące cechy peryferii STM32F4. Zawiera opis sterowników urządzeń oraz zestaw przykładów dla każdego urządzenia peryferyjnego. Biblioteka ta zawiera również *CMSIS Software Library DSP*, które wyposażone są w zestaw popularnych funkcji przetwarzania sygnałów. Biblioteka jest napisana w C i jest w pełni zgodna z CMSIS. [7].



Rys. 4. Widok wykonanego urządzenia pomiarowego
Fig. 4. The view of manufactured measurement device

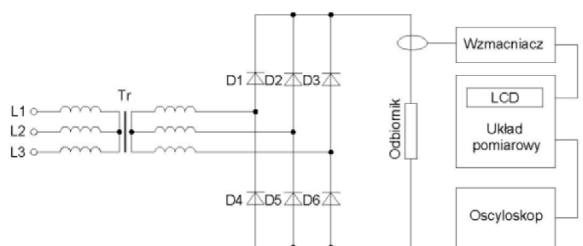
Jedną z bibliotek DSP jest biblioteka wykorzystująca algorytm FFT o nazwie *Complex 16-bit radix-4 FFT*. Dyskretna transformata Fouriera (DFT) przekształca N zespolonych wartości z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości. Aby algorytm działał poprawnie wszystkie próbki sygnału wyjściowego muszą być zapisane w systemie danych 32-bitowych. Każda liczba zawiera 16-bitową część rzeczywistą oraz 16-bitową część urojoną. DSP oferuje trzy 16-bitowe złożone funkcje FFT:

- `cr4_fft_64_stm32` - funkcja FFT do obliczenia 64 punktów,
- `cr4_fft_256_stm32` - funkcja FFT do obliczania 256 punktów
- `cr4_fft_1024_stm32` - funkcja FFT do obliczenia 1024 punktów.

Ta ostatnia została użyta w programie.

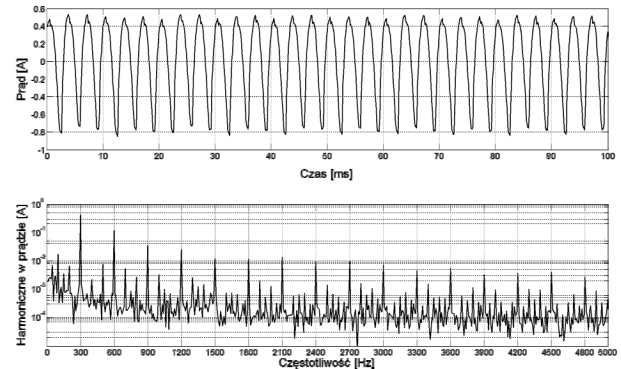
Do sprawdzenia poprawności działania zastosowanego algorytmu FFT wykorzystano testowe przebiegi, wstawione w tablice zmiennych. Każdy z przebiegów poddano wcześniej analizie FFT, w celu późniejszego porównania z wynikiem z algorytmu układu. Z uwagi na fakt, że funkcja zastosowana w programie liczy dla 1024 próbek, zmieniono częstotliwość próbkowania do 10240 Hz aby otrzymać okno analizy 100 ms i krok wyznaczanej częstotliwości 10 Hz.

Badanie jak i sprawdzenie kompletnego układu zostało zrealizowane w warunkach laboratoryjnych. Stanowisko pomiarowe składało się z transformatora trójfazowego TE610/05, 6-pulsowego prostownika diodowego oraz rezystorów pełniących rolę obciążenia. Do układu pomiarowego dołączono wzmacniacz o wzmacnieniu 10, aby zwiększyć sygnał z Cewki Rogowskiego. Ustawiony zakres pomiarowy układu wynosił od -3,75 A do 3,75 A. Do wyjścia BNC dzięki, któremu można obserwować i rejestrować aktualną wartość wyznaczanego prądu psfometrycznego, podłączono oscyloskop.



Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego
Fig. 5. Scheme of measurement site

W celu sprawdzenia poprawności działania prezentowanego układu jednoczesny pomiar został przeprowadzony dodatkowym 24 bitowym przetwornikiem DEWE 43, a wynik obliczono w programie Matlab.



Rys. 6. Przebieg składowej przemiennej prądu i jego widmo częstotliwości
Fig. 6. Chart of current's alternating component and its frequency spectrum

Dla pomiaru wykonanego dla prądu obciążenia $I_{dc}=7$ A wartość prądu psfometrycznego mierzona opisanym układem wyniosła $I_{ps0}=0,160$ A, natomiast prąd zmierzony układem kontrolnym $I_{ps0}=0,165$ A. Z pomiaru dla prądu $I_{dc}=15$ A wartość prądu psfometrycznego mierzona opisanym układem wyniosła $I_{ps0}=0,340$ A, natomiast prąd zmierzony układem kontrolnym $I_{ps0}=0,335$ A.

5. Podsumowanie

Obecnie produkowane pojazdy trakcyjne, ze względu na zastosowanie w nich energoelektronicznych urządzeń przekształtnikowych są poddawane badaniom z zakresu EMC. Wymagane jest uzyskanie kompatybilności elektromagnetycznej pojazdu z otaczającą infrastrukturą kolejową. Jednym z parametrów wyznaczanych podczas badań jest prąd psfometryczny zakłóceń [5].

W artykule zaprezentowano autonomiczny, mikroprocesorowy system do wyznaczania prądu psfometrycznego pojazdu. Wykorzystany mikrokontroler jest jednym z bardziej oszczędnych i szybszych od innych urządzeń obecnie dostępnych na rynku. Każdy blok układu i programu urządzenia pomiarowego, został indywidualnie przebadany i sprawdzony na etapie uruchamiania. Poprawność działania układu została potwierdzona na podstawie badań kontrolnych przeprowadzonych za pomocą dodatkowego systemu pomiarowego z oddzielną obróbką obliczeniową mierzonego sygnału. Możliwość zaproponowanego w artykule systemu w znacznym stopniu ułatwiają wyznaczenie mierzonej wielkości w trudnych warunkach poligonu pomiarowego. Układ charakteryzuje się szybkim uzyskaniem wyniku podawanego w sposób ciągły np. podczas całego przejazdu badanego pojazdu trakcyjnego. Dodatkową zaletą jest łatwa obsługa i małe gabaryty.

6. Literatura

- [1] Skarpetowski G., Zajac W., Czuchra W.: Analytical Calculation of Supply Current Harmonics Generated by Train Unit. 12th International Conference EPE-PEMC, Portorož, s.1378-1384, 2006.
- [2] Coccia A., Del Pizzo A., De Marco G., Porzio M.: Secondary currents filtering by means of a properly sized winding in a multicore traction transformer for high power applications to limit Psophometric Currents. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, s. 1874-1880, 2004.
- [3] Metwally I. A.: Self-Integrating Rogowski Coil for High-Impulse Current Measurement. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 59, No. 2, s.353-360,2010.
- [4] Directive ITU-T: Concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electrical power and electrified railway lines. Volume VI: Danger and disturbances.
- [5] Norma PN-EN 50121-3-1: Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 3-1: Tabor pociąg i kompletny pojazd.
- [6] Dokumentacja Techniczna STM32F4.
- [7] Dokumentacja Techniczna STM32F10x DSP library M0585.