

STANOWISKO POMIAROWE DO BADAŃ SUPERKONDENSATORÓW

Tomasz POPLAWSKI¹, Sylwia CAŁUS², Piotr CHABECKI³

1. Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny
e-mail: poptom@el.pcz.czest.pl
2. Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny
e-mail: sylwia.calus@el.pcz.czest.pl
3. Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny
e-mail: piotr.chabecki@el.pcz.czest.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono budowę stanowiska pomiarowego w ramach Laboratorium Superkondensatorów (LS) funkcjonującego w Instytucie Elektroenergetyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej, uruchomionego w grudniu 2017r. przy wsparciu ze środków celowych Ministerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki. Stanowisko służy do pomiaru parametrów użytkowych projektowanych superkondensatorów oraz materiałów, z których są budowane. Opisano działania podjęte w celu zapewnienia dużej niezawodności i dokładności aparatury pomiarowej będącej elementem stanowiska.

Słowa kluczowe: superkondensatory, pomiary materiałowe i elektryczne, badania nanostruktur węglowych.

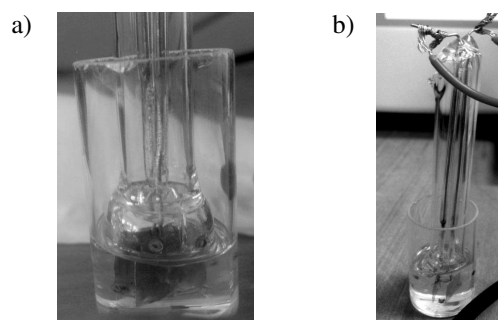
1. WPROWADZENIE

Główną motywacją do zbudowania stanowiska pomiarowego była konieczność wykonania pomiarów komponentów superkondensatorów (takich jak elektrody, folie barierowe) z nanostruktur wytworzonych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej oraz pomiaru parametrów superkondensatorów i magazynów energii budowanych z ich użyciem. W tworzeniu laboratorium wzorowano się na stanowisku badawczym należącym do Drexel NanoMaterials Group (DNG), jednego z najlepszych na świecie ośrodków badawczych w dziedzinie superkondensatorów działającym przy Drexel University.

2. REALIZACJA STANOWISKA POMIAROWEGO

2.1. Stan początkowy

Pierwszych pomiarów dokonano mostkiem Solartron SI 1260 [1]. Komórkę pomiarową przedstawioną na rysunku 1 stanowiły dwie platynowe, płaskie płytki o wymiarach 1 cm na 1 cm oddalone od siebie o 2,35 mm. Płytki umieszczono w szklanej osłonie umożliwiającej napełnianie i opróżnianie przestrzeni pomiędzy i wokół płytek różnymi badanymi substancjami. W celu wyznaczenia pojemności własnej komórki (w warunkach próżni) wykonano dwa pomiary dla znanych substancji wypełniających kondensator testowy: powietrza (jego przenikalność jest niemal równa przenikalności dielektrycznej próżni) i heksanu, którego współczynnik przenikalności dielektrycznej jest stabilny, a jego wartość jest znana i wynosi 1,88.



Rys. 1. Komórka pomiarowa z platyny: a) komórka pomiarowa (zbliżenie), b) podczas wykonywania pomiarów

Pojemność zastępczą komórki wypełnionej powietrzem (widzianą z zacisków mostka) opisuje wyrażenie:

$$c_p = c_0 \cdot \varepsilon_p + c_d \quad (1)$$

gdzie: c_p – zmierzona pojemność dla powietrza, c_0 – pojemność dla próżni, c_d – pojemność doprowadzeń komórki testowej (przewody + styki), ε_p – względna przenikalność elektryczna powietrza równa 1,00054. Natomiast dla heksanu wzór (1) przyjmuje postać:

$$c_h = c_0 \cdot \varepsilon_h + c_d \quad (2)$$

gdzie: c_h – zmierzona pojemność dla heksanu, ε_h – przenikalność heksanu wynosząca 1,88. Na podstawie zależności (1) i (2) uzyskuje się wartość pojemności własnej komórki:

$$c_0 = \frac{c_h - c_p}{\varepsilon_h - \varepsilon_p} = 0,375 \text{ pF} \quad (3)$$

Znając tę wartość oraz współczynniki względnej przenikalności elektrycznej powietrza i heksanu możemy policzyć pojemność doprowadzeń $c_d = 2,5 \text{ pF}$. Uzyskane wartości pojemności komórki wypełnionej badanymi substancjami mają od 6 do 10 rzędów większą wartość pojemności (μF i mF). Dlatego w dalszych obliczeniach pojemność doprowadzeń nie była brana pod uwagę.

Aby obliczyć współczynnik względnej przenikalności elektrycznej (charakterystyczny dla danego materiału) dokonano przekształceń:

$$c = \epsilon_r \cdot \frac{\epsilon_0 \cdot s}{d} \rightarrow c = \epsilon_r \cdot c_0 \quad (4)$$

gdzie: c – pojemność tego samego kondensatora po wypełnieniu badanym dielektrykiem [F], s – powierzchnia elektrod [m^2], d – odległość między elektrodami [m]. Względna przenikalność elektryczna jest opisana zależnością:

$$\epsilon_r = \frac{c}{c_0} \quad (5)$$

W układzie pomiarowym mostka z komórką pomiarową nie było możliwości przeprowadzenia wszystkich badań niezbędnych do analizy wpływu poszczególnych materiałów na parametry superkondensatorów. Dla niektórych materiałów dielektrycznych uzyskiwane przez komórkę wartości pojemności elektrycznej przekroczyły zakres pomiarowy mostka wynoszący 10 mF. Spowodowało to konieczność dalszej modyfikacji opisanego stanowiska.

2.2. Plan modernizacji stanowiska

W celu kontynuowania badań nawiązano współpracę z Drexel University, gdzie członkowie zespołu naukowego WE PCz odbyli staż naukowy w laboratorium NMG. Po zapoznaniu się ze sprzętem, technikami pomiarowymi i interpretacją uzyskiwanych wyników postanowiono zaprojektować, a następnie zbudować własne laboratorium. W tym celu poszerzono współpracę naukową, powiększono zespół naukowy o specjalistów w dziedzinie wytwarzania nanostruktur.

Przyjęto, że nowopowstające Laboratorium Superkondensatorów pod względem dokładności nie powinno ustępować laboratorium w USA, a pod względem funkcjonalnym powinno być efektywniejsze (czas trwania pomiarów, liczba mierzonych niezależnie od siebie komórek superkondensatorowych). Dane pomiarowe będą modyfikowały modele teoretyczne w celu opracowania środowiska do projektowania i budowy superkondensatorów. Stworzy to możliwość przeprowadzania korekt dostępnych modeli teoretycznych przy uwzględnieniu danych pomiarowych uzyskiwanych w laboratorium. Przyspieszy na proces badań oraz opracowywania nowych rozwiązań na podstawie uzyskiwanych wyników pomiarów.

Aby można było wzajemnie uzupełniać dane pomiarowe bez konieczności ich przeliczania i kalibrowania sprzętu podjęto decyzję o zachowaniu kompatybilności obu laboratoriów. Zmieniono komórki pomiarowe na identyczne, jakie używa jednostka DNG. Są to komórki pomiarowe firmy SWAGELOK. Używane przez DNG komórki pomiarowe pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Komórka pomiarowa wykorzystywana przez laboratorium Drexel NanoMaterials Group (DU NMG)

2.3. Parametry funkcjonalne stanowiska

Ze względu na brak na rynku gotowych rozwiązań spełniających przyjęte kryteria, podjęto decyzję o zbudowaniu stanowiska pomiarowego od podstaw. Postawiono na wykorzystanie układu FPGA. Zastosowanie takiego układu zapewnia wykonywanie równoległych pomiarów w czasie rzeczywistym. Wyodrębniona część struktury układu FPGA pozwala sprzętowo wykonywać przypisany jej watek realizujący przetwarzanie danych bez wpływu na pozostałe wątki, a także niezależnie od oprogramowania sterującego pomiarami. Założono możliwość wykonywania, co najmniej, kilkunastu pomiarów równoległe bez wpływu na wydajność i dokładność pomiarową każdego z równoległych wątków (docelowo do 32 komórek pomiarowych jednocześnie).

Wybrany gotowy moduł FPGA firmy NI (National Instruments) gwarantuje powtarzalność pomiarów w przewidzianym czasie eksploatacji modułu z zachowaniem akceptowalnej niepewności. Firma NI udostępnia kody źródłowe, co daje możliwość implementowania własnych rozwiązań (algorytmów pomiarowych).

3. PROJEKT, BUDOWA, URUCHOMIENIE I KALIBRACJA STANOWISKA

3.1. Komponenty zestawu pomiarowego LS

Zestaw pomiarowy składa się z modułów dobieranych w zależności od wykonywanych pomiarów. Wszystkie moduły są sprzęgnięte za pomocą kasety NI PXIe-1062Q firmy National Instruments pokazanej na rysunku 3. Kasetka została wyposażona w moduł adaptera zawierający 96 kanałów cyfrowych obsługujących zarówno układy TTL, jak i CMOS, moduł SMB-2147 (16 wejść analogowych), dwa niezależne moduły arbitralnych generatorów NI PXI-5406 o zakresie od 0 do 40 MHz, modułu NI 5751B (adapter modułu FlexRIO), modułu NI PXIe-7972R NI FlexRIO FPGA (wersja Kintex-7 K325T z wbudowaną pamięcią 2GB RAM). Wymienione podzespoły są sprzężone za pomocą płyty głównej sterowanej ośmiordzeniową jednostką CPU Intel Xeon z 16 GB RAM.



Rys. 3. Kasetka NI PXI 1062Q z wysuniętym modulem NI-RIO

3.2. Zarządzanie pomiarem i danymi pomiarowymi

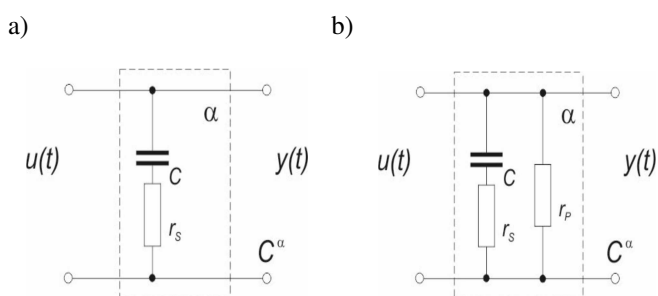
W celu zwiększenia niezawodności systemu pomiarowego i zmniejszenia prawdopodobieństwa wystąpienia błędów wynikających z braku przepustowości systemu pomiarowego rozdzielono procesy pomiaru i transferu danych. Procesami pomiarowymi zarządza układ FPGA, a procesami obsługi danych i ich przetwarzania zajmuje się układ CPU. Uzyskano przepustowość do 3 GB/s dla każdego z wątków pomiarowych oraz 24 GB/s dla

wszystkich wątków łącznie. Producent przewiduje maksymalny transfer na poziomie do 48 GB/s [2]. W LS przepustowość wynosi 24 GB/s ze względu na dublowanie danych w celu ich weryfikacji.

Ze względu na szybkość dysku twardego HDD ograniczoną przy zapisie do 600 MB/s, cały strumień danych musi być zbuforowany w pamięci RAM do czasu zapisu na HDD. W tym celu zwiększono pojemność RAM do 24 GB [2]. Dane pomiarowe po zweryfikowaniu poprawności są zapisywane do bazy danych. Dane można przetworzyć według zadanego algorytmu lub zastosować inny algorytm przetwarzania danych. Rozwiązanie to pozwala przetwarzać dane przy użyciu dowolnej liczby algorytmów bez konieczności ponownego wykonywania pomiarów.

3.3. Przetwarzanie danych i modele superkondensatorów

Dane pomiarowe będzie można porównywać z wynikami uzyskiwanymi symulacyjnie dla wybranych modeli. Podstawowe z nich pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Podstawowy model zastępczy superkondensatora (a), uwzględniający dodatkowo prąd upływu (b)

Planuje się stosowanie różnych modeli i opracowanych dla nich algorytmów przetwarzania danych, wykorzystujących m.in. rachunek różniczkowy rzędu całkowitego i ułamkowego. W pierwszym przypadku proces identyfikacji takiego modelu jest bardzo złożony [4]. Znaczne uproszczenie modelu (praktycznie do trzech parametrów) daje zastosowanie do jego opisu rachunku różniczkowego ułamkowego rzędu (rzędu pochodnej α , pojemności zastępczej C^α i szeregowej pojemności zastępczej r_s) [4]. W takim przypadku ładowanie superkondensatora przez rezystancję szeregową (rys. 4a) można opisać jako [4]:

$$G(s) = \frac{T_2 s^\alpha + 1}{T_1 s^\alpha + 1} \quad (6) \quad G(s) = k \left(1 + \frac{1}{T_s s^\alpha} \right) \quad (7)$$

gdzie: stała czasowa $T_1 = (R + r_s)C$, $T_2 = r_s C$, $k = r_s$ oraz $T = r_s C$.

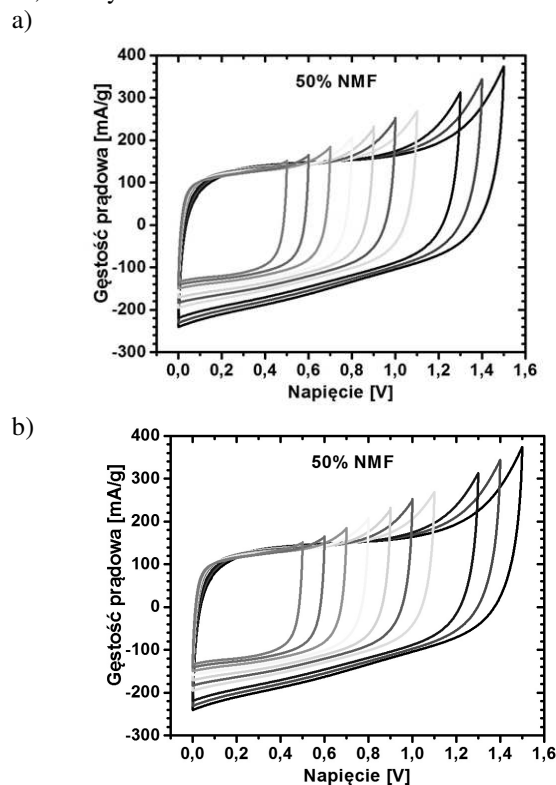
Uzyskane dane pomiarowe można zestawiać z danymi uzyskanymi symulacyjnie dla wybranego modelu, co pozwala na weryfikację stosowanych modeli. Badania symulacyjne pozwalają na zastosowanie znanych modeli, ich modyfikację oraz tworzenie nowych postaci modeli. System dopuszcza dwie metody wyszukiwania zależności między wynikami pomiaru i symulacji. Pierwsza, ręczna realizowana jest przez badacza oraz druga za pomocą sieci neuronowej.

3.4. Kalibracja modułów pomiarowych

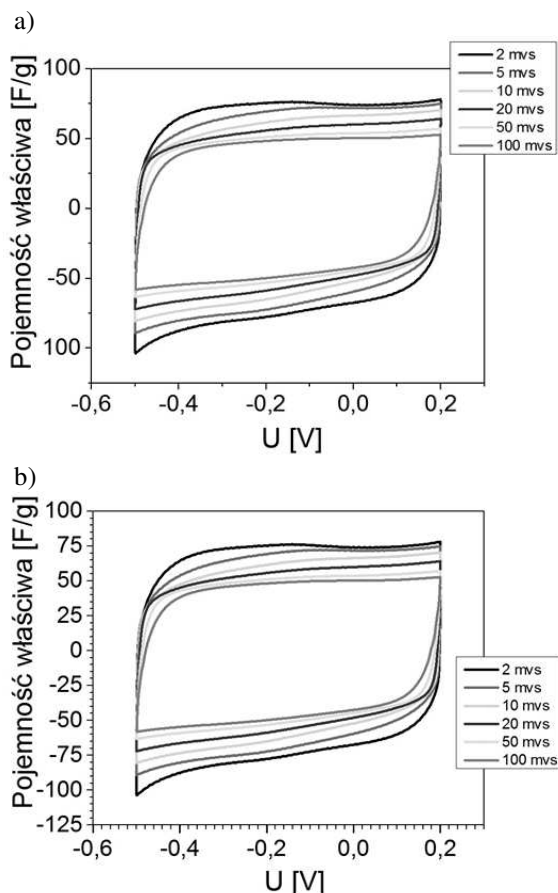
Bezpośredni pomiar modułami NI jest ograniczony do pojedynczych miliamperów. Pomiar komórek super-

kondensatora przy użyciu prądu o takim natężeniu trwa zbyt długo. Biorąc to pod uwagę, zastosowano własny układ kondycjonowania sygnału pozwalający zwiększyć prądy pomiarowe do wartości 10 A, a w przyszłości planowane jest rozszerzenie zakresu do 100 A (NI w pomiarach bezpośrednich, bez ww. układu, może mierzyć w zakresie pojedynczych miliamperów [2]). Obecnie (lipiec 2018r.) trwają prace kalibracyjne i weryfikacyjne uzyskiwanych danych pomiarowych. Jako wzorcowy przyjęto sprzęt w zastosowany w laboratorium w USA (VMP3 i MPG 2 firmy BioLogic). Dane uzyskiwane przez zestaw pomiarowy LS są porównywane z danymi z DNG w zakresie dokonanych tam pomiarów. Po uzyskaniu wstępnej kalibracji, zaczęto zestawiać dane pomiarowe z danymi pochodzącymi z symulacji teoretycznych. Kalibracja systemu pomiarowego nadal trwa. Cały czas trwają również prace nad siecią neuronową pozwalającą wyszukiwać związki między danymi pomiarowymi a wynikami symulacji dla wybranych modeli. Na stanowisku pomiarowym można wykonywać pomiary galwanostatyczne, potencjostatyczne, specyficzne dla spektroskopii impedancyjnej oraz pomiary ładunku przekazywanego do i z superkondensatorów. Ponadto układ w połączeniu z układem kondycjonowania jest programowalnym źródłem prądowym o dającym się kształtować przebiegu prądu z uwzględnieniem charakteru impedancyjnego odbiornika.

Wstępne pomiary przy użyciu opisywanego stanowiska różnią się od wzorcowych mniej niż o 1%. Jako wzorzec przyjęto wartości pomiarowe uzyskane dla tych samych badanych materiałów wykonanych w jednostce DNG, która określa niepewność pomiarową na poziomie 0,1% zakresu pomiarowego. Aktualnie sprawdzone zostały przebiegi wolto-amperometryczne oraz uzyskane za pomocą spektroskopii impedancyjnej w zakresie częstotliwości do 100 kHz. Na rysunku 5 pokazano przebiegi wolto-amperometryczne dla tej samej substancji w postaci 50% roztworu NMF. Na rysunku 5a pokazano przebiegi uzyskane w USA, a na rysunku 5b w LS.



Rys. 5. Wykres wolto-amperometryczny dla 50% roztworu NMF, a) pomiary w DNG, b) pomiary w LS



Rys. 6. Pojemność właściwa kondensatora (komórki pomiarowej) w funkcji napięcia: a) pomiary w DNG, b) pomiary w LS

Na rysunku 6 przedstawiono zależność pojemności właściwej komórki w funkcji napięcia. Na wykresie 6a pokazano przebiegi uzyskane w USA, a 6b w LS. W przypadku tego rodzaju pomiarów różnica pomiędzy danymi uzyskanymi w DNG, a wartościami uzyskanymi w LS, wynosi około 1,5 %, co stanowi prawie dwukrotnie większą wartość, niż w przypadku wyników pomiarów przedstawionych na rysunku 5. Prawdopodobnie jest to związane z ograniczeniami charakterystyki końcówki mocy układu kondycjonowania.

SUPERCAPACITORS TESTING UNIT

The article describes the process of creation of the testing unit in the Supercapacitor Laboratory at the Czestochowa University of Technology, Faculty of Electrical Engineering. This unit has become operational in December 2017 with support from MSWiN (Ministry of Science and Higher Education) special funds. It is used to measure parameters of supercapacitors and materials they are made of. Actions taken to ensure high reliability and accuracy of the measuring apparatus being a part of the unit are described. The measurements were compared with reference values obtained at Drexel NanoMaterials Group USA. The accuracy of measurement carried out CUT FEE was about 1 % of reference value. There is assumed further developing on testing unit leading to selection of the theoretical model best fitted to real measurements. This model should include the most significant behaviours of all components of superconductor.

Keywords: supercapacitors, measurement of electrical and physical properties, carbon nanostructure measurement.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Dotychczasowe prace związane ze stanowiskiem pomiarowym potwierdziły poprawność założeń projektowych oraz działania aplikacji realizującej algorytmy pomiarowe. Dwa rodzaje pomiarów (rodziny charakterystyk) charakteryzują się dokładnością średnio około 1% względem wartości uzyskiwanych w laboratorium referencyjnym DNG. Po zakończeniu kalibracji będzie znana wartość względna i bezwzględna błędów pomiarowych dla poszczególnych pomiarów, a obecne wartości traktowane są jako wstępne.

Otwarta struktura opisanego stanowiska istotnie przyczynia się do poszerzenia jego funkcjonalności, zwłaszcza w aspekcie możliwości badania praktycznie dowolnych modeli superkondensatorów oraz stosowania algorytmów, co wyznacza kierunki prowadzenia przyszłych prac rozwojowych. Zbudowane stanowisko ma cechy unikatowe ze względu na możliwość pełnej kontroli przebiegu pomiarów na wszystkich etapach gromadzenia, przetwarzania i analizy danych.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Frequency Response Analyzer 1260A, <https://www.ameteki.com/products/frequency-response-analyzers/1260a-impedance-analyzer>, data dostępu: 17-07-2018.
2. NI PXIe-8880 User Manual, www.ni.com/pdf/manuals/374684c.pdf, data dostępu: 17-07-2018.
3. Nadeau A., Hassanali M., Sharma G., Soyata T.: Energy awareness for supercapacitors using Kalman filter state-of charge tracking, *Journal of Power Sources* 296 (2015), s. 383–391.
4. Kopka R., Tarczyński W.: Szacowanie rzędu pochodnej modeli superkondensatorów o bardzo dużych pojemnościach, *Poznań University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering*, No 89, s. 3-4, 2017.