

UKŁAD I PROGRAM DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW SCHEMATU ZASTĘPCZEGO SUPERKONDENSATORA

Karol PRZYBYLSKI, Arkadiusz SZEWCZYK

Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
tel.: 347 21 40 e-mail: szewczyk@eti.pg.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono prototyp urządzenia do wyznaczania parametrów schematu zastępczego superkondensatora na podstawie jego charakterystyki ładowania i rozładowania. Urządzenie składa się ze sterowanego źródła prądowego do ładowania i rozładowywania superkondensatora, przetwornika analogowo-cyfrowego do pomiaru prądu i napięcia w trakcie eksperymentu oraz mikroprocesora do sterowania pomiarem i komunikacji z komputerem na którym uruchomiony jest program sterujący. W celu sprawdzenia poprawności działania wykonanego prototypu urządzenia przeprowadzono szereg pomiarów dla wybranych dostępnych w handlu superkondensatorów. Przeprowadzone badania potwierdziły poprawność pracy zaprojektowanego układu. Oszacowane wartości rezystancji szeregowej i pojemności superkondensatorów mieszczą się w zakresach podanych przez producentów w notach katalogowych.

Słowa kluczowe: superkondensator, schemat zastępczy superkondensatora.

1. WPROWADZENIE

Superkondensator jest to kondensator, który jest w stanie przechować dużą ilość energii, typowo 10 do 100 razy więcej na jednostkę masy lub objętości niż kondensator elektrolityczny. Na wykresie Ragone'a pokazującym gęstość mocy w funkcji gęstości energii dla różnych urządzeń, superkondensatory są umieszczone pomiędzy kondensatorami i bateriami chemicznymi [1].

Znacząca popularność superkondensatorów oraz coraz większa ich oferta na rynku wraz z rozwojem układów je wykorzystujących pociąga za sobą konieczność symulowania ich zachowania w najróżniejszych zastosowaniach. Wymaga to opracowania modeli opisujących zachowanie superkondensatorów w różnych warunkach pracy i w różnych aplikacjach oraz opracowania metod i układów pomiarowych pozwalających wyznaczyć wartości parametrów modelu zastępczego.

1.1. Superkondensatory warstwy podwójnej

Obecnie w handlu najczęściej dostępne są superkondensatory elektrycznej warstwy podwójnej, EDLC, z elektrolitem organicznym lub z elektrolitem wodnym.

Superkondensator EDLC zbudowany jest z dwóch elektrod z przepuszczalnym dla jonów separatorem między nimi [2]. Obszar między elektrodami wypełniony jest roztworem elektrolitu. Duże powierzchnie materiału z którego są wykonane elektrody są niezbędne do uzyskania wysokiej pojemności. Ponadto materiał ten musi być blokujący i elektronowo przewodzący. Najpopularniejszymi

materiałami spełniającymi przedstawione wymogi są materiały węglowe.

Obecnie wykorzystywane są dwa rodzaje elektrolitów – organiczne oraz wodne [1]. Superkondensatory z elektrolitem organicznym mogą zwykle osiągać napięcia znamionowe w zakresie 2 – 2,7 V. Elektrolity wodne mają niższe napięcie przebicia – typowo 1,5 V. Mają one jednak większą przewodność elektryczną od elektrolitów organicznych.

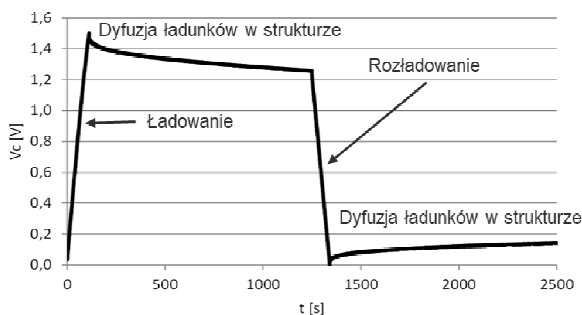
Zasada działania superkondensatora EDLC oparta jest o zjawisko elektrycznej warstwy podwójnej, która powstaje na granicy faz elektroda-elektrolit, kiedy napięcie jest podawane na zaciski superkondensatora. Ładunek elektrostatyczny jest przechowywany przy użyciu odwracalnej adsorpcji jonów elektrolitu na materiale aktywnym elektrod. W wyniku ich polaryzacji następuje separacja ładunków elektrolitu co doprowadza do powstania elektrycznej warstwy podwójnej. Warstwa ta nazywana jest warstwą Helmholtza, od nazwiska niemieckiego fizyka Hermanna von Helmholtz'a, który pierwszy opisał pojęcie elektrycznej warstwy podwójnej w 1853 r. Zamodelował on granicę faz elektroda-elektrolit dwoma powierzchniowymi rozkładami ładunków na elektrodzie stałej i w roztworze elektrolitu. Model ten został uzupełniony na początku XX wieku o model warstwy dyfuzyjnej uwzględniającej rozkład przestrzenny ładunków w elektrolicie.

2. MODEL ZASTĘPCZY SUPERKONDENSATORA

Typowy przebieg napięcia na zaciskach superkondensatora podczas ładowania i rozładowania stałym prądem pokazany jest na rys. 1. Po naładowaniu superkondensatora do napięcia 1,5 V i rozwarciu jego zacisków napięcie na nich spada. Jest to zjawisko znane i będące obiektem wielu badań [3]. Jednymi ze zjawisk odpowiedzialnych za samorozładowanie superkondensatora są prąd upływności, spowodowany przepływem ładunków pomiędzy elektrodami w wyniku niedoskonałej izolacji elektrycznej oraz dyfuzja ładunków (jonów) w objętości elektrolitu powodująca wzrost pojemności elektrycznej, co przy stałej ilości ładunku widoczne jest jako spadek napięcia, zgodnie ze wzorem (1).

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

gdzie: C – pojemność superkondensatora, Q – ładunek zgromadzony w superkondensatorze, U – napięcie na zaciskach superkondensatora.

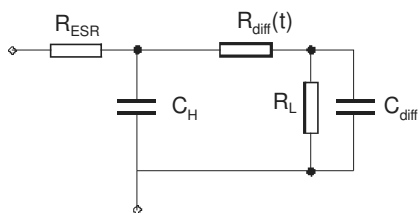


Rys. 1. Przebieg napięcia na zaciskach superkondensatora podczas ładowania i rozładowania stałym prądem. Źródło: opracowanie własne

Po rozładowaniu superkondensatora i rozwarciu jego zacisków obserwuje się na nich wzrost napięcia. On również jest spowodowany dyfuzją ładunków w strukturze superkondensatora.

Opisane zachowanie superkondensatora jest dobrze modelowane przez elektryczny schemat zastępczy pokazany na rys. 2 [4]. Jest to dwugałęziowy schemat zastępczy z zależną od czasu rezystancją dyfuzji.

Rezystancja R_{ESR} reprezentuje rezystancję szeregową superkondensatora, pojemność C_H – pojemność warstwy Helmholtza, C_{diff} – pojemność warstwy dyfuzyjnej, $R_{diff}(t)$ – rezystancję dyfuzji, rozumianą jako rezystancję między pojemnością Helmholtza i pojemnością dyfuzji. Jest ona zależna czasowo i różnie z pierwiastkiem czasu pokrywając malejące prawdopodobieństwo przeniesienia jonów przez dyfuzję [4]. Rezystancja R_L reprezentuje rezystancję upływu. Jako parametry katalogowe producenci podają wartość pojemności całkowitej (suma pojemności C_H i C_{diff}) oraz wartość rezystancji szeregowej R_{ESR} .



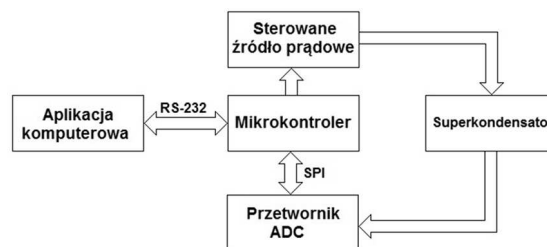
Rys. 2. Schemat zastępczy superkondensatora

Po przyłożeniu napięcia ładowania pojemność C_H ładuje się ze stałą czasową $R_{ESR} \cdot C_H$, natomiast pojemność C_{diff} ze stałą czasową $(R_{ESR} + R_{diff}) \cdot C_{diff}$. Ponieważ wartość R_{ESR} jest dużo mniejsza niż wartość rezystancji R_{diff} , [4] podczas ładowania najpierw naładuje się pojemność C_H . Po osiągnięciu napięcia pracy, źródło napięcia jest odłączane. Po odłączeniu źródła napięcia, ładunek zgromadzony w pojemności C_H będzie przepływał przez rezystor R_{diff} do nie całkowicie naładowanej pojemności C_{diff} , aż do osiągnięcia stanu równowagi. Na rozwartych zaciskach superkondensatora jest to widoczne jako spadek napięcia. Podobnie przy rozładowaniu, najpierw rozładuje się pojemność C_H i napięcie na niej osiągnie wartość bliską 0 V. Po rozwarciu zacisków, ładunek pozostały w pojemności C_{diff} będzie przepływał do pojemności C_H , co będzie widoczne na zaciskach superkondensatora jako wzrost napięcia.

3. UKŁAD POMIAROWY

W celu wyznaczenia wartości elementów schematu zastępczego superkondensatora pokazanego na rys. 2, opracowano sterowany komputerowo układ pomiarowy. Umożliwia on ładowanie i rozładowanie badanego superkondensatora stałym prądem z pomiarem napięcia, oraz pomiar napięcia na rozwartych zaciskach (bez przepływu prądu). zakres mierzonych napięć wynosi 0 – 3 V a zakres prądów ładowania/rozładowania 0 – 4 A, co wystarcza do pomiarów pojedynczych superkondensatorów z elektrolitem wodnym (maksymalne napięcie pracy 1,5 V) i elektrolitem organicznym (maksymalne napięcie pracy poniżej 3 V).

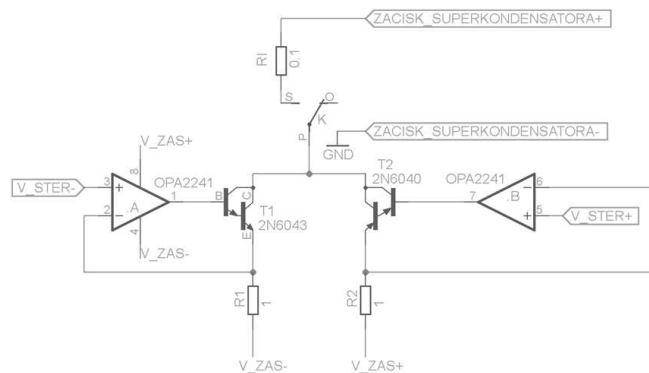
Schemat blokowy układu pomiarowego pokazany jest na rys. 3.



Rys. 3. Schemat blokowy urządzenia do wyznaczania parametrów schematu zastępczego superkondensatora

Urządzenie jest sterowane przez mikrokontroler Atmega16. Mikrokontroler steruje prądem ładowania/rozładowania superkondensatora, odczytuje dane z przetwornika analogowo-cyfrowego oraz komunikuje się przez interfejs RS-232 z aplikacją komputerową.

Elementem wykonawczym jest sterowane źródło prądowe, którego schemat ideowy pokazany jest na rys. 4.



Rys. 4. Schemat ideowy sterowanego źródła prądowego

Źródło zbudowane jest z dwóch komplementarnych gałęzi pozwalających na generowanie prądu ładującego bądź rozładowującego superkondensator. Praca źródła prądowego sterowana jest dwoma napięciami podawanymi na wejścia nieodwracające wzmacniaczy operacyjnych. Na wejścia odwracające podawany jest sygnał proporcjonalny do płynącego przez źródło prądu. Wzmacniacze operacyjne wysterowują bazy tranzystorów tak by na rezystorach $R1$ i $R2$ wystąpiły odpowiednie spadki napięcia. Sterowanie odbywa się w taki sposób, że zawsze co najmniej jeden z tranzystorów jest w stanie zatkania i wymuszony prąd ładuje lub rozładowuje dołączony superkondensator. Wartość rezystorów $R1$ i $R2$ ustalono na 1 Ω , dzięki czemu prąd generowany przez źródło prądowe jest równy w amperach co do wartości napięciu podanemu na wejście

nieodwracające wyrażonemu w woltach. Zakres podawanych napięć na wejście nieodwracające wynosi od -8 V do -12 V i od 8 V do 12 V odpowiednio dla gałęzi prądu ujemnego (rozładowującego) i dodatniego (ładującego). Pozwala to na uzyskanie prądów z zakresu odpowiednio od -4 A do 0 i od 0 do 4 A. Ponieważ rzeczywisty sygnał sterujący, będący uśrednionym sygnałem PWM z mikroprocesora, nie uzyskuje wartości 0 V, przez źródło prądowe zawsze płynie nawet niewielki prąd. Aby zapobiec ciąglemu doładowywaniu/rozładowywaniu superkondensatora, w układzie zamontowano przełącznik odłączający go po naładowaniu/rozładowaniu.

Napięcia sterujące źródłem prądowym generowane są z impulsów o modulowanej szerokości, PWM (ang. Pulse-Width Modulation). Mikrokontroler Atmega16 posiada dwa odrębne wyjścia PWM, użyte do wysterowania obu gałęzi źródła prądowego. Sygnał PWM jest podawany na filtr dolnoprzepustowy z wtórnikiem napięciowym w celu uśrednienia i wygenerowania napięcia stałego. Uzyskane napięcie stałe może maksymalnie osiągać wartość bliską 5 V, co nie jest wystarczające do poprawnego sterowania źródłem prądowym. Aby uzyskać regulację napięcia w zakresie od 8 V do 12 V oraz od -12 V do -8 V wygenerowane napięcie odejmowane jest od odpowiednio dodatniego i ujemnego napięcia zasilania układu, przy czym dla napięć ujemnych, wygenerowane napięcie jest odwracane przed operacją odejmowania.

W trakcie pomiaru w układzie mierzone jest napięcie na zaciskach superkondensatora oraz jego prąd ładowania/rozładowania. Użyty jest do tego 14-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowego MAX1035. Posiada on 4 kanały o programowalnych zakresach, z czego wykorzystane zostały dwa z zakresem pomiarowym od ujemnej wartości napięcia referencji do dodatniej wartości napięcia referencji. Jako źródło napięcia referencyjnego wykorzystano układ MAX6341, które generuje napięcie referencyjne o wartości 4,096 V.

Wejścia wykorzystanych kanałów przetwornika podłączone są przez wtórniki napięciowe do dodatniego zacisku superkondensatora i do wyjścia źródła prądowego. Pierwsze z napięć odpowiada napięciu superkondensatora, drugie służy do wyznaczenia prądu ładowania/rozładowania, wyliczanego jako spadek napięcia na rezystorze pomiarowym R_I na rys. 3, do jego wartości, która wynosi 0,1 Ω .

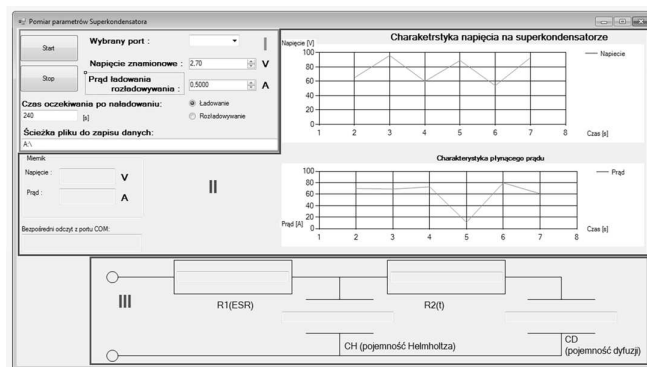
Przetwornik analogowo-cyfrowy połączony jest z mikroprocesorem przez interfejs SPI. Pomiar napięcia i prądu wykonywany jest co 40 ms. Dane pomiarowe przesyłane są w postaci dwóch bajtów (14 bitów zmierzonej wartości i 2 bity uzupełnienia do pełnego bajtu).

Układ pomiarowy zasilany jest z dwóch akumulatorów 12 V połączonych szeregowo, co pozwoliło na uzyskanie symetrycznego napięcia +/- 12 V. Zasila ono bezpośrednio źródło prądowe, wzmacniacze operacyjne oraz źródło napięcia referencji. W celu uzyskania stabilnego napięcia o wartości 5 V do zasilania części cyfrowej układu, wykorzystano stabilizator 7805.

Układ pomiarowy komunikuje się z programem komputerowym, którego okno pokazane jest na rys. 5.

Na rys. 5 zaznaczono 3 obszary: obszar I służy do sterowania pomiarem, ustalania wartości prądu ładowania/rozładowania, napięcia pracy i wyboru, czy superkondensator ma być ładowany, czy rozładowywany; obszar II służy do prezentacji aktualnych wartości napięcia i prądu superkondensatora oraz ich przebiegu w czasie, dane

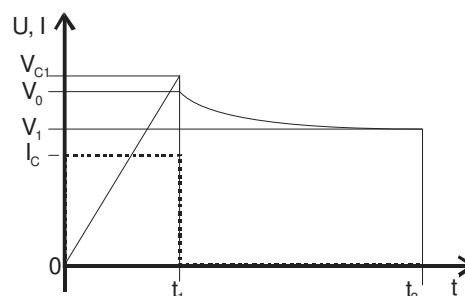
te są aktualizowane w czasie rzeczywistym; w obszarze III wyświetlane są wyznaczone wartości elementów schematu zastępczego.



Rys. 5. Okno aplikacji komputerowej

4. WYZNACZANIE WARTOŚCI ELEMENTÓW SCHEMATU ZASTĘPCZEGO

Wartości elementów schematu zastępczego superkondensatora wyznaczone są w programie komputerowym na podstawie wyników pomiaru prądu i napięcia przesłanych przez układ pomiarowy. Przebieg napięcia (linia ciągła) i prądu (linia kropkowana) w cyklu pomiarowym pokazane są na rys. 6.



Rys. 6. Przebieg prądu i napięcia w trakcie wyznaczania parametrów schematu zastępczego. Źródło: opracowanie własne.

Na rys. 6 zaznaczono charakterystyczne wartości prądów i napięć zmierzone w czasie pomiaru i niezbędne do wyznaczenia wartości parametrów schematu zastępczego.

Przy założeniu, że po naładowaniu superkondensatora prądem I_C w czasie t_1 , cały zgromadzony w nim ładunek znajduje się w pojemności C_H , jej wartość można wyznaczyć z zależności (1), która przyjmuje postać:

$$C_H = \frac{I_C \cdot t_1}{V_0} \quad (2)$$

Po rozwarciu wyprowadzeń superkondensatora w chwili t_1 , napięcie na nich zaczyna spadać w wyniku przepływu ładunku z C_H do C_{diff} . Po pewnym czasie napięcie ustala się na pewnym poziomie, oznaczonym jako V_1 . Na jego podstawie można wyznaczyć całkowitą pojemność superkondensatora, C_T :

$$C_T = \frac{I_C \cdot t_1}{V_1} \quad (3)$$

Ponieważ całkowita pojemność superkondensatora jest sumą pojemności C_H i C_{diff} , pojemność C_{diff} można wyznaczyć jako:

$$C_{diff} = C_T - C_H \quad (4)$$

W trakcie ładowania, prąd ładowania I_C przepływa przez rezystancję R_{ESR} i wywołuje na niej spadek napięcia. po zaniku prądu, zanika również to napięcie, co jest widoczne na przebiegu z rys. 5 jako różnica napięć ($V_{C1} - V_0$). Wartość R_{ESR} jest zatem równa stosunkowi tej różnicy napięć do prądu, który ją wywołał:

$$R_{ESR} = \frac{(V_{C1} - V_0)}{I_C} \quad (5)$$

Wartość rezystancji R_{diff} wyznaczana jest przez przybliżenie fragmentu przebiegu napięcia pomiędzy punktami t_1 i t_2 równaniem (6):

$$V = V_1 + (V_0 - V_1)e^{-\sqrt{\frac{L}{\tau}}} \quad (6)$$

w którym τ jest stałą czasową układu $R_{diff} C_{diff}$.

5. POMIARY TESTOWE

W celu sprawdzenia poprawności działania wykonanego prototypu i programu sterującego zmierzono charakterystyki ładowania i dyfuzji wybranych, dostępnych w handlu superkondensatorów. Na podstawie otrzymanych charakterystyk wyznaczono parametry modelu zastępczego i porównano z parametrami dostępnymi w notach katalogowych elementów.

Badaniom poddano 3 superkondensatory: 1. Samxon DRL106S0TI25RR o pojemności 10 F i napięciu znamionowym 2,7 V, 2. Nesscap ESHSR-0010C0-002R7 o pojemności 10 F i napięciu znamionowym 2,7 V oraz 3. Cap-XX HS130 o pojemności 2,4 F i napięciu znamionowym 2,75 V. Pomiar wykonano dla 3 wartości prądu ładowania: 0,48 A 0,73 A oraz 0,98 A.

Wyznaczone wartości R_{ESR} i pojemności całkowitej (suma pojemności C_H i C_{diff}) zestawione z wartościami katalogowymi dla poszczególnych superkondensatorów zestawiono w tablicy 1. Parametry modeli były obliczane na podstawie charakterystyk z przyjętym czasem oczekiwania po naładowaniu wynoszącym $(t_2 - t_1) = 840$ s.

Oszacowane wartości R_{ESR} i pojemności superkondensatorów w większości przypadków mieszczą się w zakresach podanych przez producentów w notach

katalogowych, co wskazuje na prawidłowe działanie układu pomiarowego i programu sterującego.

Tablica 1. Zestawienie danych pomiarowych i producenta

Superkondensator	Szeregowa rezystancja zastępcza, R_{ESR} [mΩ]			
	Pomiar 0,48 A	Pomiar 0,73 A	Pomiar 0,98 A	Dane producenta
Samxon DRL 10 F	40,9	51,3	52,9	< 140
Nesscap 10 F	40,0	47,0	52,0	< 30
Cap-XX 2,4 F	10,2	28,8	44,3	16 – 24
Pojemność [F]				
Samxon DRL 10 F	11,15	10,56	10,66	8 – 12
Nesscap 10 F	10,18	9,75	10,06	9 – 12
Cap-XX 2,4 F	3,25	3,15	3,04	1,92 – 2,88

6. PODSUMOWANIE

Wykonane pomiary pokazują, że system pomiarowy (układ pomiarowy i program sterujący) spełnia założenia projektowe i pozwala na oszacowanie parametrów schematu zastępczego superkondensatora. Wyznaczone parametry mieszczą się w zakresie wartości podawanych przez producentów elementów.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Sharma P., Bhatti T.S.: A review on electrochemical double-layer capacitors, Energy Conversion and Management, Nr 51, 2010, s. 2901–2912.
2. Spyker R.L., Nelms R.M.: Classical Equivalent Circuit Parameters for a Double-Layer Capacitor, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol 36, Nr 3, 2000.
3. Kaus M., Kowal J., Sauer D.U.: Modelling the effects of charger distribution during self-discharge of supercapacitors, Electrochimica Acta, Nr 55, 2010, s 7516–7523.
4. Sedlakova V., Sikula J., Majzner J., Sedlak P., Kuparowitz T., Buegler B., Vasina P.: Supercapacitor equivalent electrical circuit model based on charges redistribution by diffusion, Journal of Power Sources, Nr 286, 2015, s. 58–65.

SET-UP FOR ESTIMATION OF PARAMETERS OF SUPERCAPACITOR EQUIVALENT CIRCUIT

The paper presents the measurement set-up for estimation of supercapacitor's equivalent circuit parameters based on its charging and discharging characteristics. The designed set-up consists of a controlled current source for charging and discharging the supercapacitor under test, an analog-to-digital converter for measuring current and voltage during the experiment and a microprocessor for controlling the measurement and for communication with the computer on which the control program is running. The program allows to set measurement parameters and presents the results of calculations of equivalent circuit parameters.

The supercapacitor equivalent circuit consists of two parallel RC branches. The first one represents the series resistance and the capacity of the Helmholtz layer, while the second one relates to the diffusion of charges.

In order to check the correctness of the operation of the measurement set-up, a series of measurements was carried out on commercially available supercapacitors. Their characteristics were measured for different values of charging current. Based on the obtained characteristics, the electrical parameters were determined and compared with manufacturers data. The estimated values of series resistance and capacitance are within the ranges given by datasheet.

Keywords: supercapacitor, supercapacitor equivalent circuit.