

Układ stabilizacji temperaturowej z akumulatorowym podtrzymaniem zasilania

W artykule przedstawiono rozwiązanie układu stabilizacji temperaturowej stosowanego w podzespołach urządzeń pomiarowych, wymagających utrzymywania stabilnej temperatury. Układ został wykorzystany w układzie kondensatorów przełączanych (UKP), przeznaczonym do badań nieliniowości indukcyjnych dzielników napięcia i układów próbkujących (samplerów), wykorzystywanych w cyfrowych komparatorach impedancji. W układzie stabilizacji zastosowano również system akumulatorowego podtrzymania napięcia zasilającego oraz układ BMS (ang. Battery Management System), służący do estymacji ilości energii zgromadzonej w akumulatorze zasilającym. Przedstawiono również problemy związane z projektowaniem elementów grzejnych, umieszczonych na laminacie z podłożem aluminiowym.

Abstract. The article presents a solution of the temperature stabilization system used in subassemblies of measuring devices that require maintaining a stable temperature. The circuit was used in a system of switched capacitors (UKP), designed for testing nonlinearities of inductive voltage dividers and samplers used in digital impedance comparators. The stabilization system also uses a battery voltage supplying system and a Battery Management System (BMS), used to estimate the amount of energy available in the supply battery. Problems related to the design of heating elements placed on a laminate with an aluminum substrate are also presented. (**Temperature stabilization system with battery backup**)

Słowa kluczowe: stabilizacja temperatury, estymacja energii, komparacja impedancji, kondensatory permutowane.

Keywords: temperature stabilization, energy estimation, impedance comparison, permuting capacitors.

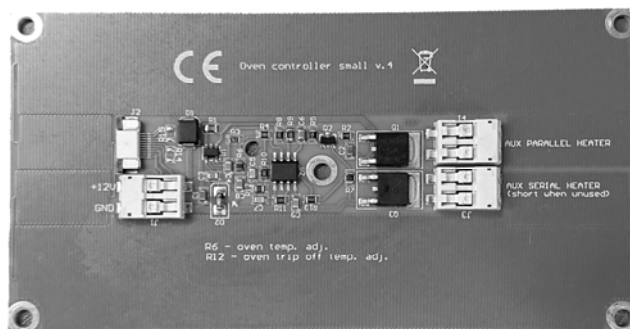
Wprowadzenie

Temperatura jest jednym z parametrów środowiskowych posiadających istotny wpływ na właściwości narzędzi pomiarowych i obiektów pomiaru. Utrzymywanie stałej temperatury jest często nazywane termostatyzacją, a urządzenia służące do tego celu – termostatami. Termostatywowaniu podlegają niekiedy całe pomieszczenia, urządzenia pomiarowe, podukłady tych urządzeń, wzorce i inne elementy składowe systemów pomiarowych. Termostatywacja ma za zadanie nie tylko ograniczenie dryftu lub niestabilności temperaturowej, spowodowanych zmianami temperatury otoczenia, lecz także umożliwia zmniejszenie wpływu histerezy temperaturowej. Wpływ tego ostatniego zjawiska jest szczególnie istotny w przypadku wzorców wielkości elektrycznych, a zwłaszcza wzorców napięcia stałego, wykorzystujących podpowierzchniowe diody Zenera. Równie ważne jest termostatywanie wzorców impedancji. Termostatywacja zmniejsza zmienność parametrów wzorców pomiędzy kolejnymi pomiarami lub kalibracjami. Układ stabilizacji temperaturowej wzorców powinien być wyposażony w system podtrzymania zasilania z wbudowanego akumulatora w przypadku braku możliwości zasilania termostatu z sieci elektroenergetycznej, np. podczas transportu. W niniejszym artykule autorzy prezentują konstrukcje termostatów zintegrowanych z elementami grzejnymi, wykonanych na miedzianym laminacie z podłożem aluminiowym i przeznaczonych do stabilizowania temperatury wzorców i precyzyjnych podukładów aparatury pomiarowej.

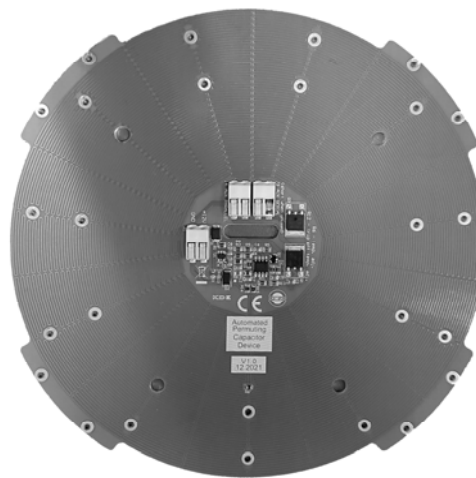
Termostaty zintegrowane z elementem grzejnym

Podstawowym komponentem termostatu jest element grzejny (grzejnik), którego zadaniem jest wytwarzanie energii cieplnej podczas przepływu prądu elektrycznego. We wczesnych konstrukcjach termostatów stosowanych w aparaturze pomiarowej rolę elementu grzejnego pełnił często drut oporowy, wykonany np. z kanthalu. W starszych wersjach kalibratorów firmy Fluke grzejniki miały postać rezystorów o mocy kilku watów, umieszczonych wewnątrz płaskowników aluminiowych, przykręconych do płytki z obwodem drukowanym [1]. Tego rodzaju konstrukcje są dość skomplikowane i charakteryzują się relatywnie dużą

masą oraz gabarytami. Z tego powodu w nowszych kalibratorach firmy Fluke zastosowano elementy grzejne termostatów w postaci płytek ceramicznych z jednostronnie naniesionym meandrem z nichromu, zintegrowanych z układem elektronicznym termostatu [2]. Niestety obwody drukowane na podłożach ceramicznych są dość kosztowne.

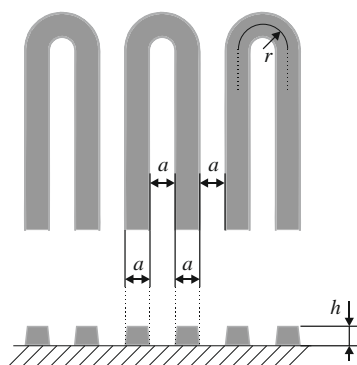


Rys. 1. Wygląd prototypu termostatu zintegrowanego z grzejnikiem, stosowanego w cyfrowych źródłach wzorcowego napięcia przemienneego



Rys. 2. Wygląd termostatu zintegrowanego z grzejnikiem zaprojektowanego dla układu kondensatorów przełączalnych

Dostępność i niska cena laminatów miedzianych na podłożu aluminiowym skłoniła autorów do opracowania układu termostatów zintegrowanych z elementem grzejnym na takim właśnie podłożu. Istotne obniżenie kosztu takiego termostatu zapewnia wykonanie elementu grzejnego w formie ścieżek miedzianych o kształcie meandra. Obwód drukowany (ang. Printed Circuit Board, PCB) takiego termostatu może być zaprojektowany przy wykorzystaniu standardowego oprogramowania do projektowania PCB. Technologia wykonania takiego obwodu jest dobrze opanowana przez firmy produkujące obwody drukowane, a koszt obwodu jest relatywnie niski. Na rysunku 1 przedstawiono prototypową płytkę termostatu zintegrowanego z grzejnikiem, stosowanego w cyfrowych źródłach wzorcowego napięcia przemiennego, a na rysunku 2 – płytkę termostatu zaprojektowanego dla układu kondensatorów przełączalnych [3,4].



Rys. 3. Fragment meandra ścieżki miedzianej elementu grzejnego termostatu

Problem z uzyskaniem zakładanej rezystancji grzejnika

Autorzy zrealizowali kilka projektów zintegrowanych termostatów na laminacie miedzianym o podłożu aluminiowym. Zaobserwowano duże odchylenie wartości uzyskanej rezystancji grzejnika od wartości zakładanej. Co więcej, uzyskana rezystancja była zawsze większa niż projektowana. Przyczyną tej rozbieżności jest proces technologiczny produkcji obwodów drukowanych na laminatach z podłożem aluminiowym, w wyniku którego kształt poprzecznego przekroju ścieżki nie jest prostokątny, lecz trapezowy. Efekt ten powstaje w wyniku podtrawienia bocznych krawędzi ścieżek. Dodatkowo w początkowym procesie produkcji obwodów drukowanych warstwa miedzi (standardowo o grubości 35 μm) jest czyszczona za pomocą szczotek, co powoduje zmniejszenie jej grubości. Ponieważ producenci obwodów drukowanych niechętnie zgadzają się na modyfikowanie procesu technologicznego, zdecydowano się na opracowanie metody projektowania elementu grzejnego w taki sposób, aby uzyskana wartość rezystancji elementu grzejnego była bliska wartości zakładanej. W tym celu wykonano kilka projektów elementów grzejnych, a następnie zmierzono rezystancje wykonanych na ich podstawie obwodów drukowanych.

Tabela 1. Porównanie rezystancji projektowanej oraz rzeczywistej grzejników dla $h = 0,035$ mm.

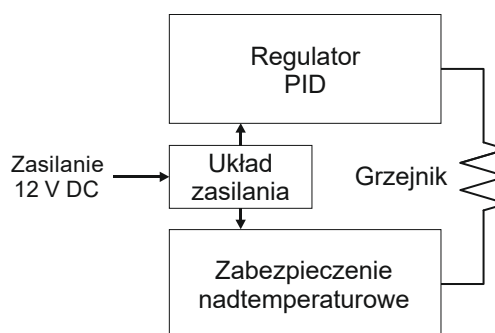
Długość meandra (mm)	Szerokość ścieżki a (mm)	Rezystancja projektowana (Ω)	Rezystancja uzyskana (Ω)	Względny błąd rezystancji (%)
10611,4	0,254	20,4	27,1	33%
14045,2	0,18	38,0	54,5	43%
19774,5	0,31	31,1	42,8	38%

Umożliwiło to oszacowanie względnej zmiany rezystancji grzejnika względem wartości założonej. Wartość średnia oszacowanej w ten sposób wartości wynosi około 38% i silnie zależy od liczby łuków meandry grzejnika oraz ich promienia r (rysunek 3). Im większa liczba tych łuków oraz ich promień, tym większa jest względna zmiana rezystancji.

W tabeli 1 zestawiono parametry ścieżek elementów grzejnych trzech modeli fizycznych płytek termostatów.

Układ stabilizacji temperatury grzejnika

Układ stabilizacji temperatury termostatu, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 4, zrealizowano w oparciu o układ precyzyjnego analogowego regulatora PID pracującego w trybie liniowym (ciągłym). Tryb ciągły pracy umożliwia istotne zmniejszenie energii zaburzeń elektromagnetycznych, które mogą przenikać do układu pomiarowego. Istotnym elementem układu regulatora jest mostek, którego ramię stosunkowo zrealizowano w oparciu o scalone precyzyjne źródła napięcia stałego.

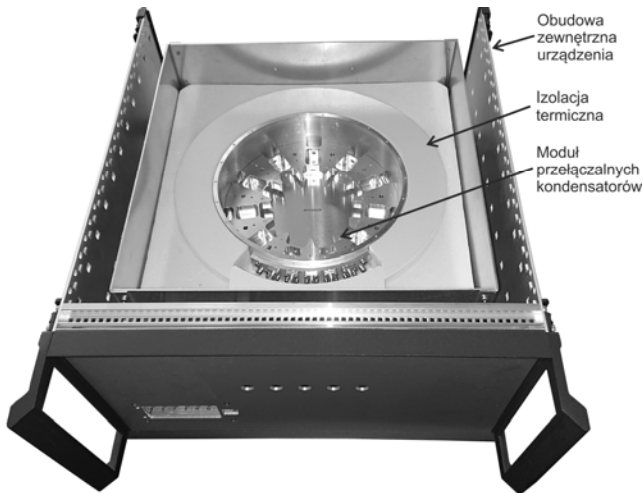


Rys. 4. Schemat blokowy układu stabilizacji temperatury grzejnika

Temperatura pracy grzejnika nastawiana jest przez zmianę wartości rezystora znajdującego się w ramieniu pasywnym mostka. W ramieniu tym umieszczono również czujnik temperatury, w postaci termorezystora Pt100 w obudowie do montażu powierzchniowego. Czujnik jest przylutowany bezpośrednio do miedzianych pół kontaktowych na powierzchni płytki drukowanej termostatu, co zapewnia dobry kontakt termiczny czujnika z podłożem termostatu. W przypadku termostatu przeznaczzonego do układu kondensatorów przełączalnych, wartość stabilizowanej temperatury ustawiono równą około 28 $^{\circ}\text{C}$. Parametry regulatora PID zostały dobrane empirycznie. Układ stabilizacji temperatury wyposażony jest w zabezpieczenie przed nadmiernym wzrostem temperatury, które odłącza grzejnik od napięcia zasilania, gdy zostanie przekroczona temperatura 45 $^{\circ}\text{C}$. Termostat zasilany jest napięciem stałym z przedziału od 11 do 14 V.

Izolacja termiczna

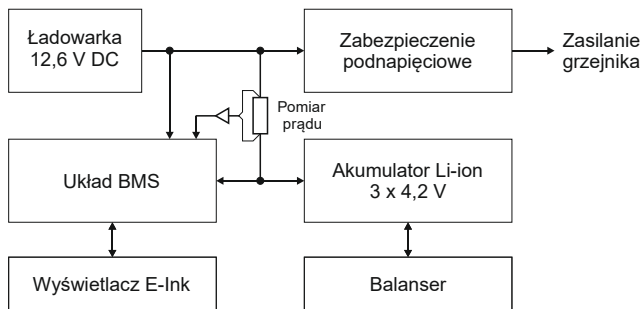
W celu zmniejszenia energii pobieranej przez termostat oraz w celu zmniejszenia wpływu zmian temperatury otoczenia na termostatyzowany układ został on zaizolowany cieplnie izolacją z polistyrenu ekstrudowanego, o nazwie handlowej styrodur. Materiał uformowano do wymaganego kształtu za pomocą frezarki sterowanej numerycznie CNC lub przez cięcie i klejenie odpowiednich jego fragmentów. Materiał ten posiada bardzo dobre właściwości izolacyjne: współczynnik przewodzenia ciepła zastosowanej płyty styroduru o grubości 5 cm wynosi $\lambda_D < 0,033$ W/(m·K), a opór cieplny jest równy $R_D = 1,5$ m²K/W. Na rysunku 5 przedstawiono widok termostatu UKP z izolacją termiczną.



Rys. 5. Wygląd izolacji termicznej dla układu kondensatorów przełączalnych

Układ BMS i podtrzymania zasilania

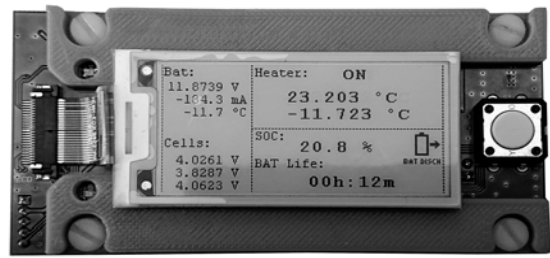
Układ BMS służy do monitorowania i estymacji ilości dostępnej energii w zastosowanym w układzie akumulatorze litowo-jonowym (Li-ion). Jego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 6. Wykorzystano w nim mikrokontroler ADuCM362 firmy Analog Devices, wyposażony w 24-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy (A/D) oraz 16-bitowy przetwornik cyfrowo- analogowy (D/A). Przetwornik A/D realizuje pomiar napięcia na wejściu układu oraz na poszczególnych ogniwach akumulatora. Ponadto przetwornik wykorzystywany jest do pomiaru prądu przepływającego przez akumulator oraz do pomiaru temperatury akumulatora i elementu grzejnego. Przetwornik D/A służy do korekcji błędu przesunięcia zera, powstającego przy pomiarze prądu. Wyniki pomiarów są wyświetlane na wyświetlaczu typu E-Ink o bardzo niskim poborze energii.



Rys. 6. Schemat blokowy układu BMS

W mikrokontrolerze zaimplementowany został algorytm estymacji energii dostępnej w akumulatorze [5,6]. Algorytm ten, na podstawie napięć występujących na poszczególnych ogniwach akumulatora oraz prądu przepływającego przez akumulator, oblicza stopień naładowania akumulatora (ang. State Of Charge, SOC). Na tej podstawie dokonywana jest predykcja czasu pracy układu podczas zasilania z akumulatora. Na rysunku 7 przedstawiono prototyp układu BMS, zastosowanego w UKP.

Układ BMS pełni również rolę układu zabezpieczającego przed nadmiernym rozładowaniem akumulatora zasilającego grzejnik. Gdy napięcie na zaciskach pakietu akumulatorów spadnie poniżej 9,6 V, wówczas zasilanie termostatu zostaje wyłączone. Stan ten trwa do chwili naładowania akumulatora do napięcia o wartości minimum 11,6 V.



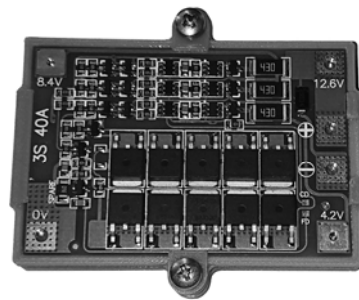
Rys. 7. Prototyp układu BMS zastosowanego w UKP

Do budowy pakietu akumulatorów zastosowano ogniwa litowo-jonowe typu NCR18650GA firmy Panasonic, połączone w konfiguracji 3S3P. Elektrody poszczególnych ogniw zostały ze sobą spojone za pomocą profesjonalnej zgrzewarki. Ogniwa umieszczono w koszyczku wykonanym z tworzywa sztucznego technologią druku 3D. Rysunek 8 przedstawia wygląd opisanego akumulatora.



Rys. 8. Akumulator zastosowany w UKP

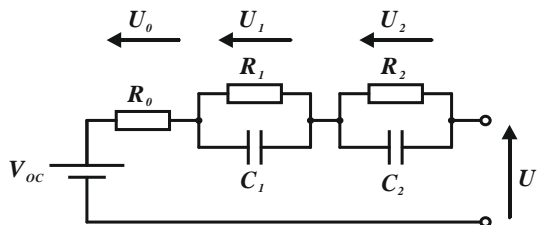
W celu zabezpieczenia pakietu akumulatorów zastosowano układ zabezpieczający z balanserem dedykowanym dla akumulatorów litowo-jonowych. Użycie balansera jest wymagane w celu utrzymywania jednakowego napięcia na zaciskach poszczególnych ogniw pakietu akumulatorów podczas ładowania celem wydłużenia ich żywotności. Dodatkowo balanser zabezpiecza pakiet akumulatorów przed nadmiernym rozładowaniem, jak również ogranicza maksymalny prąd pobierany z akumulatora np. podczas niezamierzonego zwarcia ich zacisków. Prototyp układu balansera przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Prototyp układu balansera

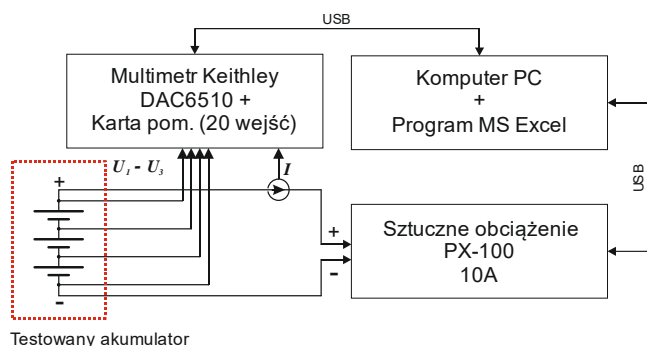
Algorytm estymacji energii dostępnej w akumulatorze

Algorytm estymacji energii dostępnej w akumulatorze oparty został na adaptacyjnym rozszerzonym filtrze Kalmana (ang. Adaptive Extended Kalman Filter, AEKF). Aby algorytm pracował poprawnie należy przeprowadzić proces identyfikacji parametrów schematu zastępczego modelu akumulatora litowo-jonowego, który przedstawiono na rysunku 10. Proces identyfikacji obejmuje wartości parametrów R_0 , R_1 , C_1 , R_2 , C_2 oraz postaci funkcji nieliniowej opisującej źródło napięcia $V_{oc}(SOC)$.

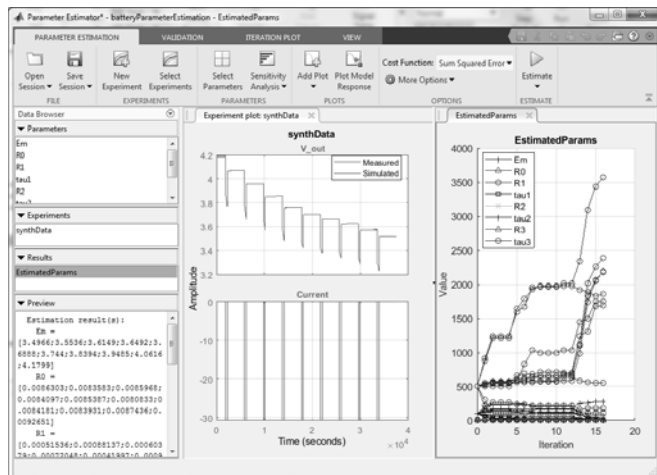


Rys. 10. Schemat zastępczy modelu akumulatora litowo-jonowego

Zdeterminowanie elementów schematu zastępczego modelu akumulatora jest realizowane w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 11. Układ składa się z multimetru Keithley DAC6510, sterowanego cyfrowo sztucznego obciążenia oraz komputera sterującego, który steruje procedurą pomiaru napięcia na poszczególnych ogniwach, napięcia całkowitego i prądu pobieranego z akumulatora. Program sterujący napisano w programie Visual Basic for Applications (VBA), dostępnym w środowisku MS Excel, przy wykorzystaniu bibliotek Keysight IO Libraries Suite.



Rys. 11. Schemat blokowy układu pomiarowego



Rys. 12. Wynik estymacji parametrów akumulatora

Pomiary wykonywane są dla trzech wartości temperatury akumulatora: 5, 25 i 45 °C. Zgromadzone dane muszą przejść przez proces estymacji parametrów dla każdej wartości temperatury. Estymacja wykonywana jest w oprogramowaniu Matlab. Na rysunku 12 przedstawiono wynik estymacji parametrów akumulatora. Otrzymane dane, w postaci stabilizowanych współczynników, wprowadzane są do oprogramowania układu BMS, które zostało napisane w języku C w środowisku Keil dla mikrokontrolerów ARM z rdzeniem Cortex-M. Sam algorytm estymacji wygenerowany został za pomocą środowiska Matlab w postaci funkcji składowych opartych również na języku C, które zostały zaimportowane do oprogramowania układu BMS.

Podsumowanie

Opisany w artykule układ stabilizacji temperatury z akumulatorowym podtrzymaniem zasilania został wykorzystany w układzie kondensatorów przełączanych, przeznaczonym do badań nieliniowości indukcyjnych dzielników napięcia i układów próbkujących, wykorzystywanych w cyfrowych komparatorach impedancji. W układzie zastosowano układ BMS, służący do estymacji ilości energii zgromadzonej w akumulatorze oraz predykcji czasu pracy termostatu przy zasilaniu z akumulatora. Omówiono proces estymacji parametrów zastępczych modelu akumulatora i zaprezentowano układ służący do ich wyznaczenia. Zaprezentowane układy mogą być stosowane do stabilizacji temperatury wzorców i krytycznych podukładów urządzeń pomiarowych.

Praca została częściowo sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki [projekt o nr 2020/37/B/ST7/00057]

Autorzy: mgr inż. Kordian Dudzik, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: Kordian.Dudzik@polsl.pl; prof. dr hab. inż. Marian Kampik, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: Marian.Kampik@polsl.pl; dr inż. Krzysztof Musioł, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: Krzysztof.Musiol@polsl.pl;

LITERATURA

- [1]. 5440B / AF Direct Voltage Calibrator, Service Manual, P/N 804005, John Fluke Mfg. Co. Inc., December 1986
- [2]. 5700A/5720A Series II Multi-Function Kalibrator, Service Manual, PN 601630, Fluke Corporation, June 1996 Rev. 2, 3/05
- [3]. Hsu J.C., Gong J., Huang C., An automated permuting capacitor device for calibration of IVDs, IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, September 2014, Vol. 63, No. 9,
- [4]. Waltrip B., A Programmable Capacitor for Inductance Measurements, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, June 2017, Vol. 66, No. 6
- [5]. Guo Y., Zhao Z., Huang L., SoC Estimation of Lithium Battery Based on AEKF Algorithm, 8th International Conference on Applied Energy, ICAE2016, 8-11 October 2016, Beijing, China
- [6]. Pang H., Zhang F., Experimental Data-Driven Parameter Identification and State of Charge Estimation for a Li-Ion Battery Equivalent Circuit Model, Energies 2018, 11(5), 1033, MDPI