Pomiary i modelowanie elementów memrystorowych

Bartłomiej Garda, Piotr Zegarmistrz, Zbigniew Galias

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków

Streszczenie: W artykule badany jest problem modelowania memrystorów. Elementy memrystorowe są zwykle modelowane za pomocą układu równań algebraiczno-różniczkowych wiążących wielkości elektryczne (napięcie i prąd) oraz zmienną wewnętrzną odpowiedzialną za dynamikę elementu. Testowano dwa rodzaje memrystorów wyprodukowanych przez firmę Knowm Inc.: z domieszką węglową i wolframową. Charakterystyki memrystorów badano przy wymuszeniach sinusoidalnych. Do modelowania charakterystyk prądowo-napięciowych memrystorów zastosowano model Strukova, model Biolka oraz model VTEAM. Zaproponowano modyfikacje istniejących modeli memrystorów oraz przetestowano ich działanie. Metoda optymalizacji punktu środkowego z ograniczeniami kostkowymi została wykorzystana do wyznaczenia wartości parametrów modeli memrystorów dających optymalne dopasowanie do danych pomiarowych. Omówiono wyniki procesu optymalizacji dla różnych modeli memrystorów przy różnych parametrach sygnału wymuszającego oraz porównano badane modele pod względem jakości uzyskanych wyników optymalizacji. Zbadano wpływ częstotliwości oraz amplitudy sygnału wymuszającego na zachowanie memrystorów.

Słowa kluczowe: memrystor SDC, modelowanie memrystorów, pomiary memrystorów, model Strukova, okno Biolka, model VTEAM

MEASUREMENT AND MODELING THE MEMRISTOR DEVICES

Abstract: In this paper, the problem of modeling memristors is studied. Memristor devices are usually modeled using a set of algebraic-differential equations linking electrical quantities (voltage and current) and the internal variable responsible for the dynamics of the element. Two types of memristors fabricated by the Knowm Inc. are tested: with carbon and tungsten doping. Memristors have been tested using sinusoidal voltage waves as input signals. The voltage-current characteristics have been modeled using the Strukov model, the Biolek model and the VTEAM model. Modifications of existing models have been proposed and their performance has been tested. The interior-point optimization method with box constrains has been used to optimize parameters of the memristor model that fit best the measurement data. The results of the optimization process for different memristor models and various parameters of the input signal have been discussed. The performance of different models has been compared. The influence of the frequency and the amplitude of the input signal on the dynamics of memristors has been studied.

Keywords: SDC memristor, memristor modeling, memristor measurements, Strukov model, Biolek window, VTEAM model

https://doi.org/10.7494/978-83-67427-15-9_3

1. Wprowadzenie

Zainteresowanie elementami memrystorowymi nasiliło się wraz z odkryciem istnienia rzeczywistych memrystorów w maju 2008 roku przez zespół naukowców z HP Labs, pod kierownictwem R. Stanleya Williamsa (Strukov i in. 2008). Od tego czasu memrystory są przedmiotem zainteresowania wielu badaczy ze względu na ich potencjalne zastosowanie w obliczeniach bezpośrednio w pamięci komputera (*in-memory computations*), w obliczeniach z wykorzystaniem algorytmów neuromorficznych, a także jako elementów pamięci nieulotnej. W opinii niektórych badaczy memrystory mogą zostać wykorzystane do budowy struktur pamięci o większej pojemności i wydajności niż rozwiązania znane dotychczas (Pal i in. 2019). Wykazano, że pamięci oparte na memrystorach mogą mieć gęstości o dwa rzędy wielkości większe niż pamięci RAM. Koncepcja obliczeń *in-memory* jest interesująca z uwagi na problem limitu szybkości przesyłu danych między procesorem a pamięcią RAM znany pod nazwą wąskiego gardła architektury von Neumanna (Nugent i Molter 2014).

Uważa się, że memrystory mogą również znaleźć zastosowanie w układach filtrów analogowych dostrajanych przez zmianę rezystancji memrystorów (Faridi i Ansari 2019), a także w konstrukcji przerzutników oraz rejestrów. Ponadto układy oscylatorów opartych na memrystorach mogą osiągać moc obliczeniową systemów biologicznych ze względu na ich wysoką zdolność scalania oraz możliwość prowadzenia obliczeń równoległych (Corinto i in. 2011). Koncepcja obliczeń z wykorzystaniem algorytmów inspirowanych procesami biologicznymi, w tym zjawiskami zachodzącymi w ludzkim mózgu, wydaje się bardzo atrakcyjna w aspekcie rozwiązywania wielu złożonych zadań wymagających wydajności wyższej niż oferowana przez współczesne systemy komputerowe (Zhang i in. 2020).

Memrystor jest dwukońcówkowym elementem pasywnym mającym zdolność pamiętania swojego stanu. W przypadku braku zasilania lub gdy memrystor jest zasilany sygnałem o małej amplitudzie, zachowuje on swój stan. Zmiana stanu wewnętrznego odpowiada zmianie rezystancji elementu. Pojęcie memrystora zostało wprowadzone przez L.O. Chuę w słynnej pracy opublikowanej w 1971 roku (Chua 1971). Memrystor jest czwartym elementem obwodów elektrycznych, uzupełniającym listę trzech podstawowych pasywnych elementów obwodów, tj. elementów R, L i C. Jedną z kluczowych właściwości memrystora jest istnienie pętli histerezy przechodzącej przez początek układu współrzędnych na płaszczyźnie $i - v$, która powstaje w wyniku zasilania elementu dowolnym dwubiegunowym sygnałem okresowym. Istnienie pętli histerezy wyjaśnia zmienność jego rezystancji. Pętla histerezy jest zawarta w pierwszej i trzeciej ćwiartce układu współrzędnych, co potwierdza, że memrystor jest elementem pasywnym (rozprasza energię). Częstotliwość sygnału zasilającego wpływa na zmianę kształtu pętli histerezy. Jej powierzchnia maleje monotonicznie wraz ze wzrostem częstotliwości

(Sah i in. 2014). Teoretycznie kiedy częstotliwość sygnału zasilającego dąży do nieskończoności, to pętla histerezy jest zbieżna do krzywej przechodzącej przez początek układu współrzędnych. W rzeczywistych memrystorach zjawisko to obserwuje się w zakresie wysokich częstotliwości.

Badacze Laboratorium HP zaproponowali realizację elementu memrystorowego złożonego z wielowarstwowej struktury metal-izolator-metal (MIM). Opisywana struktura ma grubość poniżej 5 nm i składa się z dwóch warstw: warstwy izolacyjnej TiO_2 oraz ubogiej w tlen warstwy TiO_{2-x} o wysokiej przewodności. Ze względu na bardzo niewielkie rozmiary elementu już stosunkowo niskie napięcie jest w stanie wytworzyć silne pole elektryczne w warstwie czynnej, które powoduje, że „dziury tlenowe" przekraczają granicę między warstwami TiO_2 i TiO_{2-x}. Opisany ruch jonów powoduje powstawanie włókien przewodzących w warstwie TiO_2. Przesuwanie linii podziału pomiędzy warstwami ma silny wpływ na zmianę przewodności elektrycznej omawianej struktury. Rozróżnia się dwa stany fizyczne memrystora: stan niskiej rezystancji (LRS) i stan wysokiej rezystancji (HRS).

W późniejszych badaniach zaproponowano realizację elementów memrystorowych opartych na różnych materiałach, takich jak m.in. spintroniczne elementy półprzewodnikowe (Pershin i Ventra 2008), elementy na bazie krzemu amorficznego (Jo i in. 2009) czy ferroelektryczne złącza tunelowe (Chanthbouala i in. 2012).

W niniejszej pracy badane były elementy memrystorowe z kanałem samokierowanym (SDC – *self-directed channel*) (Campbell 2017), których działanie opiera się na przewodnictwie jonowym. Warstwę czynną memrystora stanowi struktura Ge_2Se_3/SnSe/Ag. W przeciwieństwie do wcześniej opisanych struktur jonowo-metalicznych, w których pole elektryczne tworzy przewodzące włókna w strukturze izolatora pomiędzy metalowymi elektrodami, w elementach typu SDC ruch jonów Ag^+ ograniczony jest do chemicznie wytworzonych kanałów. Trwałe kanały przewodzące w strukturach SDC są wytwarzane w wyniku indukcji pola elektrycznego. Przewodność elementu zależy od ilości pierwiastka Ag w kanale przewodzącym (Campbell 2019). Dodatkowo memrystory typu SDC mają warstwę aktywną domieszkowaną w celu poprawy właściwości memrystora. W tej pracy rozważamy memrystory typu SDC z dwoma rodzajami substancji domieszkujących, tj. wolframem oraz węglem. Elementy te produkowane są przez firmę Knowm Inc. w formie 32-końcówkowych chipów zawierających po 16 memrystorów każdy.

2. Modele memrystorów

W badaniach rozważano dwa znane modele matematyczne memrystorów: model Strukova (Strukov i in. 2008) oraz model VTEAM (Kvatinski i in. 2015). W przypadku

modelu Strukova badano dwa rodzaje funkcji ograniczających wartość zmiennej wewnętrznej do zadanego przedziału (*window function*): okno prostokątne oraz okno Biolka. Zaproponowano także modyfikacje rozważanych modeli memrystorów.

2.1. Model Strukova

W modelu Strukova, znanym także jako model linowego dryftu jonów (*linear ion drift model*), przyjmuje się, że prędkość jonów jest liniowo zależna od natężenia pola elektrycznego. Dla tego modelu zależność prądowo-napięciowa wyraża się wzorem:

$$v(t) = \left(R_{on}x(t) + R_{off}\left(1 - x(t)\right)\right)i(t) \tag{1}$$

gdzie $x(t)$ jest zmienną wewnętrzną określającą szerokość względną obszaru niskiej rezystancji. Minimalna i maksymalna wartość rezystancji elementu R_{on} i R_{off} reprezentują stany niskiej i wysokiej rezystancji memrystora. Zmienna wewnętrzna $x(t)$ zmienia się wraz z prądem $i(t)$ zgodnie z zależnością:

$$\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} = kR_{on}i(t),\ x \in [0, 1] \tag{2}$$

Wartość zmiennej wewnętrznej $x(t)$ jest ograniczona do przedziału [0, 1]. Wymaganie, aby $x(t)$ należało do wspomnianego przedziału, realizuje się przez przemnożenie prawej strony równania (2) przez funkcję okna prostokątnego:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0, 1] \\ 0, & x \notin [0, 1] \end{cases} \tag{3}$$

Wartość stałej k w równaniu (2) zależy od właściwości materiału oraz od geometrii (kształtu/struktury) elementu memrystorowego. Model Strukova zawiera trzy parametry: R_{on} i R_{off} oraz k.

2.2. Okno Biolka

Zaproponowana w poprzedniej części funkcja okna prostokątnego nie opisuje poprawnie zjawisk dynamicznych zachodzących w memrystorze. Okazuje się, że dynamika zmiennej wewnętrznej jest wolniejsza, gdy zmienna wewnętrzna $x(t)$ jest bliska wartościom granicznym 0 lub 1. Jednym ze sposobów wprowadzenia korekty uwzględniającej powyższą obserwację jest modyfikacja funkcji okienkowej (3). W literaturze zaproponowano wiele różnych funkcji okien (Biolek i in. 2009, Joglekar i Wolf 2009,

Corinto i Ascoli 2012). W niniejszej pracy rozważano funkcję okna Biolka daną zależnością:

$$f(x, i) = \begin{cases} 1 - \left| x - \mathrm{step}(-i) \right|^{p}, & x \in [0, 1] \\ 0, & x \notin [0, 1] \end{cases} \tag{4}$$

gdzie step(x) = (1 + sgn(x))/2, sgn(x) oznacza funkcję *signum*, zaś p jest liczbą całkowitą dodatnią. Funkcja okna Biolka, zdefiniowana zależnością (4), została zmodyfikowana przez zastąpienie nawiasów symbolem wartości bezwzględnej wokół wyrażenia x – step($-i$). Pozwala to na rozważanie wszystkich całkowitych i dodatnich wartości p, a nie tylko parzystych jak w oryginalnym rozwiązaniu.

2.3. Asymetryczny model Strukova

Rzeczywiste elementy memrystorowe nie są elementami symetrycznymi. Wynika to z faktu, że przebieg zjawiska przełączania stanu rezystancji memrystora zależy od polaryzacji przyłożonego napięcia i kierunku prądu. Powoduje to konieczność modyfikacji modelu (2) opisanego w podrozdziale 2.1 polegającej na użyciu różnych wartości parametrów modelu w zależności od polaryzacji sygnału wejściowego. Przy uwzględnieniu braku symetrii model Strukova jest opisany równaniem:

$$\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} = \begin{cases} k_{on} R_{on} i(t) f_{on}(x, i), & \text{dla } i \geq 0 \\ k_{off} R_{on} i(t) f_{off}(x, i), & \text{dla } i < 0 \end{cases} \tag{5}$$

Parametry k_{on} i k_{off} definiują dynamikę memrystora dla wartości dodatnich i ujemnych natężenia prądu i. Dodatkowo w zmodyfikowanym modelu Strukova występują dwie funkcje okienkowe f_{on} i f_{off}, które również zależą od kierunku prądu. W przypadku okna Biolka oznacza to, że funkcja okienkowa ma dodatkowo dwa różne parametry p, tj. p_{on} i p_{off}.

Reasumując, asymetryczny model Strukova z oknem Biolka określony jest przez sześć parametrów: k_{on}, k_{off}, R_{on}, R_{off}, p_{on} i p_{off}. Pierwsze cztery są parametrami o wartościach rzeczywistych, zaś dwa ostatnie przyjmują wartości całkowite.

2.4. Model VTEAM

W wyniku pomiarów rzeczywistych memrystorów zauważono, że istnieje pewien określony próg prądu (napięcia), poniżej którego wartość zmiennej wewnętrznej nie ulega zmianie, tzn. nie obserwuje się zmian właściwości dynamicznych elementu. Aby zmienić wartość rezystancji memrystora, należy podać sygnał (prąd/napięcie)

o wartości przekraczającej ten próg. Na obserwacji tej bazuje model VTEAM (*Voltage ThrEshold Adaptive Memristor*) (Kvatinsky i in. 2015). W niniejszej pracy zastosowano zmodyfikowany model VTEAM (Garda i Galias 2018) opisany równaniami:

$$v(t) = \frac{R_{on}\left(w_{off} - w(t)\right) + R_{off} w(t)}{w_{off}} i(t) \tag{6}$$

$$\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} = \begin{cases} k_{on}\left(\dfrac{v(t)}{v_{on}} - 1\right)^{\alpha_{on}}, & 0 < v_{on} \le v_s \\ 0, & v_{off} < v < v_{on} \\ k_{off}\left(\dfrac{v(t)}{v_{off}} - 1\right)^{\alpha_{off}}, & v \le v_{off} < 0 \end{cases} \tag{7}$$

Wartości zmiennej wewnętrznej w są ograniczone do przedziału $[0, w_{off}]$. Jeśli napięcie v należy do przedziału (v_{on}, v_{off}), to wartość zmiennej w nie wpływa na przesunięcie wartości progu przełączania memrystora. Sześć parametrów modelu VTEAM (R_{on}, R_{off}, v_{on}, v_{off}, k_{on}, k_{off}) przyjmuje wartości rzeczywiste, podczas gdy dwa z nich (α_{on}, α_{off}) przyjmują wartości całkowite. Warto zauważyć, że zmienna w_{off} odpowiada jedynie za skalowanie rezystancji wypadkowej elementu, więc można ją ustalić na zadanym poziomie i nie brać pod uwagę w procesie optymalizacji modelu. W obliczeniach opisywanych w niniejszej pracy przyjęta została wartość $w_{off} = 10^{-3}$.

3. Badania pomiarowe

W niniejszym rozdziale opisany zostanie układ pomiarowy oraz omówione i porównane zostaną wyniki przeprowadzonych pomiarów.

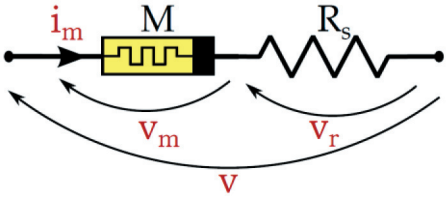
3.1. Układ pomiarowy

Badaniom poddano memrystory typu SDC z domieszkowaniem wolframowym oraz węglowym. W celu uzyskania charakterystyk prądowo-napięciowych każdy badany memrystor połączono szeregowo z rezystorem. Kluczową rolą wspomnianego rezystora jest ograniczenie prądu w memrystorze w celu ochrony badanego elementu. W zależności od domieszkowania badanego memrystora użyto oporników o różnej wartości rezystancji znamionowej. W przypadku memrystorów wolframowych zastosowano opornik o rezystancji $R_s = 5{,}2$ kΩ, co pozwala na ograniczenie prądu w elemencie

do 1 mA dla stosowanych amplitud napięcia wymuszającego. W przypadku memrystorów węglowych zastosowano opornik o rezystancji R_s = 56,1 kΩ w celu uzyskania maksymalnej wartości prądu poniżej 50 μA.

Na rysunku 1 przedstawiono układ pomiarowy. Napięcie v_r mierzone na rezystorze szeregowym jest proporcjonalne do prądu i, co oznacza, że wykonane pomiary pozwalają na wyznaczenie charakterystyki napięciowo-prądowej $v - i$ elementu memrystorowego.

Napięcie wejściowe $v(t)$ zostało wytworzone przez generator RIGOL DG1020. Wartości napięć $v_m(t)$ oraz $v_r(t)$ były mierzone za pomocą oscyloskopu myDAQ National Instruments. Do zebrania danych pomiarowych wykorzystano środowisko LabVIEW.



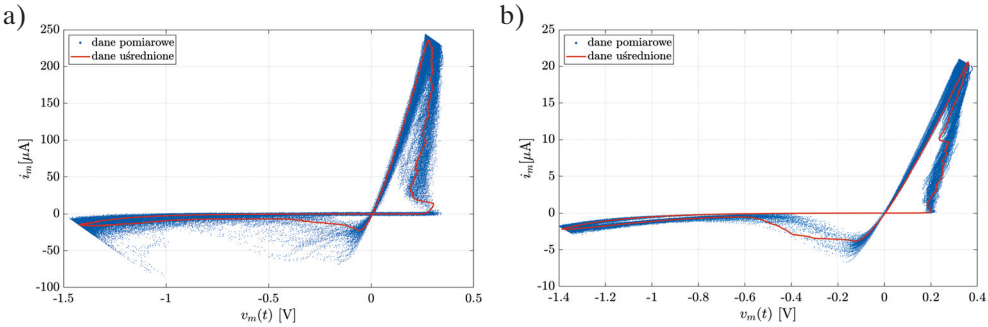
Rys. 1. Schemat układu pomiarowego

Przed rozpoczęciem właściwych pomiarów przeprowadzono proces formowania memrystorów. Polega on na równomiernym zwiększaniu wartości napięcia zasilającego do momentu wytworzenia ścieżek przewodzących w elemencie. Po uformowaniu memrystora układ pomiarowy zasilano napięciem okresowym $v(t) = V_s \sin(2\pi ft)$. Rozważono 18 wersji sygnału $v(t)$ dla różnych kombinacji amplitudy V_s = 0,75 V, 1 V i 1,5 V oraz częstotliwości f = 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 50 Hz i 100 Hz napięcia zasilającego.

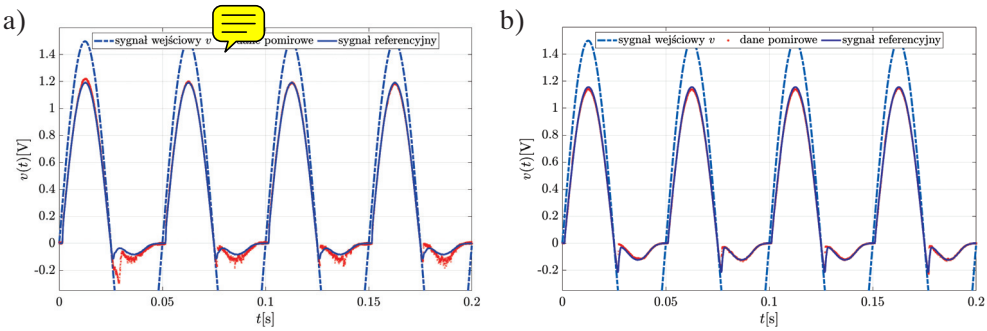
3.2. Wyniki pomiarów

Dla każdej wersji sygnału zasilającego $v(t)$ zebrano dane pomiarowe za czas $100T$, gdzie $T = 1/f$ jest okresem sygnału $v(t)$. W celu redukcji składowych wysokoczęstotliwościowych danych pomiarowych zastosowano filtr Savitzky'ego–Golaya (Savitzky i Golay 1964). W celu uzyskania sygnału referencyjnego o długości jednego okresu uśredniono wyniki pomiarów pochodzące ze wszystkich 100 zapisanych okresów sygnału wejściowego. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki uzyskane dla przypadku V_s = 1,5 V, f = 20 Hz. Kolorem czerwonym oznaczono sygnał referencyjny. Zaobserwowano typową dla układów z elementami memrystorowymi pętlę histerezy. Dwa przecinające się w początku układu współrzędnych liniowe fragmenty charakterystyki odpowiadają stanom niskiej i wysokiej rezystancji. Na rysunku można zauważyć większą stabilność podczas przejścia ze stanu wysokiej do niskiej rezystancji niż w przypadku przejścia

w kierunku przeciwnym. Jest to również widoczne na rysunku 3, gdzie przedstawiono zmierzone napięcia dla czterech pierwszych okresów sygnału zasilającego. Sygnał referencyjny oznaczono kolorem niebieskim.



Rys. 2. Dane pomiarowe (kolor niebieski) i sygnał referencyjny (kolor czerwony) dla dwóch typów memrystorów (V_s = 1,5 V, f = 20 Hz): a) domieszkowanie wolframowe; b) domieszkowanie węglowe



Rys. 3. Sygnał wejściowy, dane pomiarowe oraz sygnał referencyjny dla pierwszych czterech okresów sygnału zasilającego (wykresy odpowiadają wykresom przestawionymi na rysunku 2): a) domieszkowanie wolframowe; b) domieszkowanie węglowe

Na podstawie analizy przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że memrystory z domieszkowaniem węglowym wykazują większą stabilność i powtarzalność zachodzących zjawisk niż memrystory z domieszkowaniem wolframowym (Garda 2022).

4. Procedura optymalizacyjna

Wyniki pomiarów opisanych w rozdziale 3 wykorzystano do optymalizacji modeli memrystorów przedstawionych w rozdziale 2. Celem prowadzonych badań było wyznaczenie wartości współczynników dla modeli Strukova i VTEAM pozwalających na optymalne dopasowanie tych modeli do wyników pomiarów.

4.1. Procedura optymalizacyjna

Jako funkcję celu w procedurach optymalizacyjnych wykorzystano wyrażenie:

$$F(x,y)=\frac{\sum_{k=1}^{n}\left(i_k(x,y)-i_{ref}^{k}\right)^2}{\sum_{k=1}^{n}\left(i_{ref}^{k}\right)^2} \tag{8}$$

gdzie $\boldsymbol{x}$ oraz $\boldsymbol{y}$ są wektorami parametrów wybranego modelu odpowiednio o wartościach rzeczywistych i całkowitych. Szczegółowy opis funkcji celu oraz zastosowanych procedur optymalizacyjnych znajduje się w pracy Gardy (2022).

Podczas jednego przebiegu procedury optymalizacyjnej ustalano wartości parametrów całkowitych i wyznaczano wartości optymalne parametrów należących do wektora $\boldsymbol{x}$, stosując metodę optymalizacji punktu środkowego (*interior-point algorithm*) z ograniczeniami kostkowymi. Przykładowe zakresy zmienności parametrów modeli przedstawiono w tabeli 1. Procedurę optymalizacyjną powtarzano dla wszystkich dopuszczalnych wartości parametrów należących do wektora $\boldsymbol{y}$ (przyjęto możliwe wartości od 1 do 10). Następnie wybrano ten zestaw parametrów ($\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{y}$), który uzyskał najmniejszą wartość funkcji celu. Dla symetrycznego modelu Strukova procedura optymalizacyjna metodą punktu środkowego była zatem przeprowadzana dziesięciokrotnie. Dla niesymetrycznego modelu Strukova oraz modelu VTEAM procedura optymalizacyjna była wykonywana stukrotnie.

Tabela 1
Ograniczenia kostkowe parametrów o wartościach rzeczywistych

Model	R_{on}	R_{off}	k_{on}, k_{off}	v_{on}, v_{off}	x, w
Strukov	10–10^4	10^3–$5 \cdot 10^6$	0,1–100	–	0–1
VTEAM	10^2–10^4	10^3–10^6	0,1–10^3	0–1	0–10^{-3}

4.2. Wyniki optymalizacji

Skuteczność procedury optymalizacyjnej wyznaczenia ekstremum globalnego zależy w dużej mierze od poprawnego wyboru punktu startowego. Dla poszczególnych modeli wstępnie wybrano punkty startowe na podstawie wykonanych zgrubnych eksperymentów optymalizacyjnych. Następnie otrzymane wartości stanowiły punkt startowy dla właściwej procedury optymalizacyjnej.

Optymalizację przeprowadzono dla modelu Strukova w wersji symetrycznej oraz niesymetrycznej z oknem prostokątnym i oknem Biolka oraz dla modelu VTEAM.

Z uzyskanych wyników, przyjmując minimalną wartość funkcji celu jako parametr określający jakość uzyskanych danych, można wysnuć następujące wnioski:

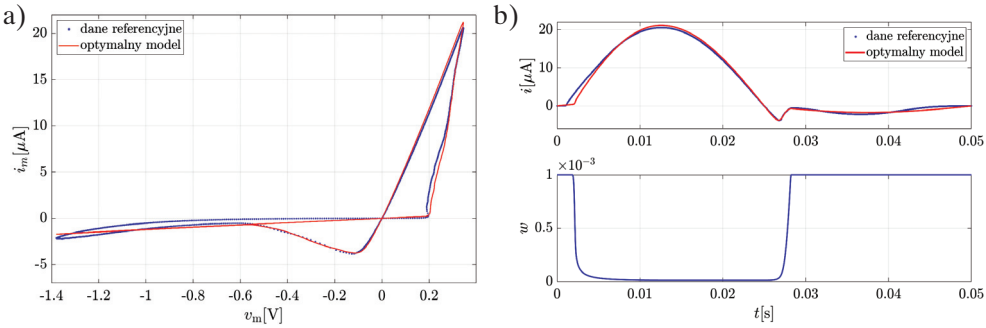
– Asymetryczny model Strukova z oknem prostokątnym pozwala na lepsze dopasowanie do danych pomiarowych niż model symetryczny (wartość funkcji celu jest ponad trzykrotnie mniejsza).
– Asymetryczny model Strukova w oknem Biolka daje lepsze rezultaty niż model symetryczny (wartość funkcji celu jest niższa o 15%).
– Zarówno w przypadku modelu z oknem prostokątnym, jak i z oknem Biolka jakość dopasowania modelu do danych pomiarowych spada wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału wzbudzającego.
– Najlepsze dopasowanie wykazuje model VTEAM. Funkcja celu osiąga wartość kilkukrotnie niższą niż w pozostałych badanych modelach. Obserwacja ta potwierdza się w odniesieniu do obu rodzajów memrystorów przy różnych wartościach amplitudy sygnału zasilającego. Model VTEAM działa również znacznie lepiej w warunkach wyższych częstotliwości.

W tabeli 2 przedstawiono jakość dopasowania parametrów modelu VTEAM (tj. wartość funkcji celu) dla memrystorów o domieszkowaniu wolframowym i węglowym przy różnych parametrach sygnału zasilającego.

Tabela 2
Wartości funkcji celu dla modelu VTEAM

Domieszkowanie	f [Hz]	V_s = 0,5 V	V_s = 1,0 V	V_s = 1,5 V
Wolfram	1	$2{,}02 \cdot 10^{-3}$	$1{,}56 \cdot 10^{-3}$	$1{,}44 \cdot 10^{-3}$
	5	$2{,}81 \cdot 10^{-3}$	$8{,}93 \cdot 10^{-4}$	$1{,}13 \cdot 10^{-3}$
	10	$3{,}02 \cdot 10^{-3}$	$1{,}49 \cdot 10^{-3}$	$7{,}96 \cdot 10^{-4}$
	20	$4{,}20 \cdot 10^{-2}$	$1{,}29 \cdot 10^{-1}$	$1{,}10 \cdot 10^{-3}$
	50	$1{,}69 \cdot 10^{-3}$	$5{,}51 \cdot 10^{-3}$	$8{,}19 \cdot 10^{-3}$
	100	$7{,}25 \cdot 10^{-3}$	$3{,}41 \cdot 10^{-3}$	$2{,}34 \cdot 10^{-2}$
Węgiel	1	$1{,}62 \cdot 10^{-3}$	$3{,}88 \cdot 10^{-3}$	$3{,}20 \cdot 10^{-3}$
	5	$1{,}36 \cdot 10^{-3}$	$3{,}31 \cdot 10^{-3}$	$3{,}24 \cdot 10^{-3}$
	10	$3{,}12 \cdot 10^{-3}$	$2{,}57 \cdot 10^{-3}$	$3{,}83 \cdot 10^{-3}$
	20	$5{,}23 \cdot 10^{-3}$	$4{,}33 \cdot 10^{-3}$	$3{,}36 \cdot 10^{-3}$
	50	$8{,}63 \cdot 10^{-3}$	$4{,}12 \cdot 10^{-3}$	$3{,}27 \cdot 10^{-3}$
	100	$1{,}25 \cdot 10^{-3}$	$4{,}00 \cdot 10^{-3}$	$3{,}36 \cdot 10^{-3}$

Na rysunku 4 przedstawiono wynik optymalizacji dopasowującej dane referencyjne do modelu VTEAM dla przypadku $f = 100$ Hz, $V_s = 1{,}5$ V. Otrzymano następujące parametry modelu: $R_{on} = 4161{,}311378$, $R_{off} = 8{,}15962 \cdot 10^5$, $k_{on} = -998{,}356508$, $k_{off} = 9{,}2 \cdot 10^{-5}$, $a_{on} = 3$, $a_{off} = 2$, $v_{on} = -0{,}310214$, $v_{off} = 0{,}004174$. Wartość funkcji celu wyniosła $F(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) = 3{,}36 \cdot 10^{-3}$. Jest to wynik znacznie lepszy niż w przypadku modelu Strukowa i Biolka, gdzie wartości funkcji celu wynosiły odpowiednio 0,413 i 0,410. Przedstawione wyniki potwierdzają, że model VTEAM przewyższa pozostałe modele pod względem jakości dopasowania.



Rys. 4. Charakterystyki dla modelu VTEAM o parametrach wyznaczonych w wyniku optymalizacji (kolor niebieski) oraz dla sygnału referencyjnego (kolor czerwony). Memrystor domieszkowany węglem, sygnał wejściowy o parametrach $V_s = 1{,}5$ V, $f = 20$ Hz: a) zależność $i - v$ z charakterystyczną pętlą histerezy; b) przebiegi czasowe prądu memrystora oraz zmiennej wewnętrznej w

5. Podsumowanie

Głównym celem przeprowadzonych badań była ocena jakości dopasowania wybranych modeli memrystorów do rzeczywistych danych pomiarowych. Ze względu na szeroki wachlarz możliwych zastosowań memrystorów oczekuje się opracowania modelu matematycznego, który w możliwie uniwersalny sposób będzie modelował zachowanie memrystorów dla różnych typów wymuszeń oraz dla różnych wartości parametrów sygnału zasilającego takich jak częstotliwość i amplituda tego sygnału.

W badaniach rzeczywistych elementów memrystorowych zaobserwowano zjawisko bistabilności. Stwierdzono, że stan przejściowy podczas przełączania memrystora wykazuje silne fluktuacje. Zauważono, że przełączanie ze stanu wysokiej do niskiej rezystancji zachodzi w sposób bardziej stabilny niż w przeciwnym kierunku. Stwierdzono, że memrystory z domieszkowaniem węglowym wykazują większą stabilność podczas przełączania niż memrystory wolframowe.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki eksperymentów optymalizacyjnych wskazują, że model matematyczny memrystora VTEAM umożliwia lepsze dopasowanie do danych pomiarowych niż pozostałe rozważane modele. Wskazanie wartości progowej

prądu (lub napięcia) koniecznego do nastąpienia zmiany stanu memrystora poprawia dokładność modelowania dynamiki memrystora. Zaproponowane modyfikacje wybranych modeli (wersje asymetryczne) w niewielkim stopniu poprawiają skuteczność modelowania. Stwierdzono, że model Strukova działa poprawnie tylko w warunkach niskich częstotliwości, co w dużym stopniu ogranicza możliwość jego stosowania.

W ramach przyszłych prac badawczych planowane są dalsze modyfikacje rozważanych modeli memrystorów oraz zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej w celu zwiększenia dokładności stosowanych modeli w szerszym zakresie częstotliwości. Ponadto planowane są modyfikacje układu pomiarowego w celu eliminacji szumów oraz uzyskania bardziej precyzyjnych danych pomiarowych, w szczególności dla małych wartości mierzonych prądów i napięć.

Literatura

Biolek Z., Biolek D., Biolková V., 2009, *SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift*, Radioengineering, vol. 18, s. 210–214.

Campbell K.A., 2017, *Self-directed channel memristor for high temperature operation*, Microelectronics Journal, vol. 59, s. 10–14. https://doi.org/10.1016/j.mejo.2016.11.006.

Campbell K.A., 2019, *The Self-directed Channel Memristor: Operational Dependence on the Metal-Chalcogenide Layer*, [w:] Chua L., Sirakoulis G., Adamatzky A. (eds.), *Handbook of Memristor Networks*, Springer, Cham, s. 815–842. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76375-0_29.

Chanthbouala A., Garcia V., Cherifi R.O., Bouzehouane K., Fusil S., Moya X., Xavier S. i in., 2012, *Ferroelectric memristor*, Nature Materials, vol. 11, s. 860–864. https://doi.org/10.1038/nmat3415.

Chua L.O., 1971, *Memristor-the missing circuit element*, IEEE Transactions on Circuit Theory, vol. 18(5), s. 507–519. https://doi.org/10.1109/TCT.1971.1083337.

Chua L., 2015, *Everything you wish to know about memristors but are afraid to ask*, Radioengineering, vol. 24, no. 2, s. 319–368. https://doi.org/10.13164/re.2015.0319.

Corinto F., Ascoli A., 2012, *A boundary condition-based approach to the modeling of memristor nanostructures*, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 59(11), s. 2713–2726. https://doi.org/10.1109/TCSI.2012.2190563.

Corinto F., Lanza V., Ascoli A., Gilli M., 2011, *Synchronization in networks of FitzHugh--Nagumo neurons with memristor synapses*, [w:] *2011 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD 2011): Linköping, Sweden, 29–31 August 2011*, IEEE, s. 608–611. https://doi.org/10.1109/ECCTD.2011.6043616.

Faridi J., Ansari M.S., 2019, *Memristor-Based Tunable Analog Filter for Physiological Signal Acquisition for Electrooculography*, [w:] Al-Masri A., Curran K. (eds.), *Smart Technologies and Innovation for a Sustainable Future*, Advances in Science, Technology & Innovation, Springer, Cham, s. 237–242. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01659-3_27.

Garda B., Galias Z., 2018, *Modeling of memristors under sinusoidal excitation with various frequencies*, [w:] *2018 25th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS): Bordeaux, France, December 9–12, 2018*, IEEE, s. 545–548. https://doi.org/10.1109/ICECS.2018.8617926.

Garda B., 2022, *Modeling of memristors under periodic signals of different parameters*, Energies, vol. 14(21), 7264. https://doi.org/10.3390/en14217264.

Jo S.H., Kim K.H., Lu W., 2009, *Programmable resistance switching in nanoscale two-terminal devices*, Nano Letters, vol. 9(1), s. 496–500. https://doi.org/10.1021/nl803669s.

Joglekar Y.N., Wolf S.J., 2009, *The elusive memristor: Properties of basic electrical circuits*, European Journal of Physics, vol. 30(4), s. 661–675. https://doi.org/10.1088/0143-0807/30/4/001.

Kvatinsky S., Ramadan M., Friedman E.G., Kolodny A., 2014, *VTEAM: A general model for voltage-controlled memristors*, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 62(8), s. 786–790. https://doi.org/10.1109/TCSII.2015.2433536.

Nugent M.A., Molter T.W., 2014, *AHaH computing – from metastable switches to attractors to machine learning*, PLoS ONE, vol. 9(2), e85175. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085175.

Pal S., Gupta V., Ki W.H., Islam A., 2019, *Design and development of memristor-based RRAM*, IET Circuits, Devices & Systems, vol. 13, s. 548–557. https://doi.org/10.1049/iet-cds.2018.5388.

Pershin Y.V., Ventra M.D., 2008, *Spin memristive systems: Spin memory effects in semiconductor spintronics*, Physical Review B: Covering Condensed Matter and Materials Physics, vol. 78(11–15), s. 113–127. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.113309.

Sah M.P., Adhikari S.P., Kim H., Chua L.O., 2014, *Fingerprints of a memristor*, [w:] *2014 14th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and Their Applications (CNNA 2014): Notre Dame, Indiana, USA, 29–31 July 2014*, IEEE, pp. 1–2, https://doi.org/10.1109/CNNA.2014.6888655.

Savitzky A., Golay M.J.E., 1964, *Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures*, Analytical Chemistry, vol. 36(8), s. 1627–1639. https://doi.org/10.1021/ac60214a047.

Strukov D.B., Snider G.S., Steward D.R., Williams R.S., 2008, *The missing memristor found*, Nature, vol. 453, s. 80–83. https://doi.org/10.1038/nature06932.

Zhang Y., Wang Z., Zhu J., Yang Y., Rao M., Song W., Zhuo Y. et al., 2020, *Brain-inspired computing with memristors: Challenges in devices, circuits, and systems*, Applied Physics Reviews, vol. 7, 011308. https://doi.org/10.1063/1.5124027.