



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

**Факултет Автоматика
Катедра Теоретична Електротехника**

маг. инж. Иван Димитров Зайков

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРОННИ ВЕРИГИ
С МЕТАЛ-ОКСИДНИ МЕМРИСТОРИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен

"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2 Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Теоретична електротехника

Научен ръководител: Проф. дн Валери Младенов

СОФИЯ, 2022 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Теоретична електротехника“ към Факултет Автоматика на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 15.07.2022 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 14.11.2022 г. от 13.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-64/27.07.2022 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. доц. д-р инж. Снежана Димитрова Терзиева – председател
2. доц. д-р инж. Николай Любославов Хинов – научен секретар
3. проф. д-р инж. Елисавета Димитрова Гаджева
4. проф. дн инж. Галина Петкова Чернева
5. проф. д-р инж. Георги Митков Павлов

Рецензенти:

1. проф. дн инж. Галина Петкова Чернева
2. доц. д-р инж. Николай Любославов Хинов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет Автоматика на ТУ-София, блок № 2, кабинет № 2340.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Теоретична електротехника“ на факултет Автоматика. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Иван Зайков

Заглавие: Изследване на електронни вериги с метал-оксидни мемристори

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Мемристорът представлява нелинеен, пасивен двуполюсен елемент със запаметяващи и комутационни свойства. Базиран е върху оксиди на преходни метали, като титан (Ti), хафний (Hf), ниобий (Nb), тантал (Ta) и др. Съществуват и полимерни, фероелектрически и др. видове мемристори. Основните преимущества на метал-оксидните мемристори по отношение на традиционните CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) елементи са значително по-ниската консумация на енергия, по-малките размери в нанометровия диапазон, добри запаметяващи и превключващи свойства и съвместимост с технологиите за производство на CMOS интегрални схеми със свръх-висока степен на интеграция. В определени участъци от своята волт-амперна характеристика мемристорът има отрицателно диференциално съпротивление (ОДС), което го прави подходящ за приложение в генераторни схеми. Благодарение на своите полезни свойства, мемристорът има приложения в различни електронни устройства, като енерго-независими памети, невронни мрежи, интегриращи и диференциращи вериги, филтри, генератори и др. Ключов момент при проектирането на електронни устройства с метал-оксидни мемристори е тяхното компютърно моделиране и симулиране в среда на SPICE (Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis). Това изисква използването на мемристорни модели с висока точност и бързодействие.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Мотивацията за създаването на настоящия дисертационен труд е частично компенсиране на някои липси и недостатъци на съществуващите в литературата класически метал-оксидни мемристорни модели, свързани с тяхната значителна сложност и непълното отразяване на поведението на метал-оксидните мемристори в електрическо поле.

Основната цел на дисертационния труд е модифициране и подобряване на някои от съществуващите мемристорни модели, чрез апроксимиране и опростяване на аналитичните изрази, чрез въвеждане на модифицирани и подобрени прозоречни функции, използване на гладки и диференцируеми сигмоидални функции, вместо класическата единична функция на Хевисайд и др., като по такъв начин се подобрява сходимостта на изчислителните процеси при изследване на електронни схеми в среда на SPICE. За реализация на целите на дисертацията са формулирани следните **задачи** за изпълнение:

1. Модифициране и подобряване на някои от най-използваните съществуващи мемристорни модели, като се създават нови библиотечни модели, чрез апроксимиране и опростяване на аналитичните изрази, чрез въвеждане на модифицирани и подобрени прозоречни функции, използване на гладки и диференцируеми сигмоидални функции, вместо класическата не-диференцируема и прекъсната единична функция на Хевисайд и др., като по такъв начин се подобрява сходимостта на изчислителните процеси при изследване и симулации на мемристорни електронни схеми в среда на SPICE.

2. Приложение на метал-оксидни мемристори в аналогови и реконфигурируеми електронни схеми, като генератори, филтри, диференциращи и интегриращи електронни вериги, анализ и потвърждаване на тяхната работоспособност в среда на LTSPICE.

3. Приложение на метал-оксидни мемристори в невронни мрежи и енерго-независими памети, анализ в среда на LTSPICE.

4. Съпоставка на моделите при тяхното функциониране в различни електронни устройства съгласно някои от най-важните и основни критерии за сравнение – бързодействие, превключващи свойства, сложност, точност, нелинейност, работна честота, отразяване на граничните ефекти и др.

Научна новост

Предложените шест модифицирани и подобрени метал-оксидни мемристорни модели, базирани върху класическите модели на Струков-Уилямс, Йоглеркер, Биолек и Лехтонен-Лайхо имат по-високо бързодействие, опростени аналитични изрази, добра точност, малко по-ниска, но близка до тази на модела на Лехтонен-Лайхо, при тези нови модели са избегнати някои от недостатъците на класическите мемристорни модели, има въведени прагове на активиране, и включена диференцируема сигмоидална функция, подобряваща сходимостта в среда на LTSPICE.

Практическа приложимост

Генерираните шест модифицирани метал-оксидни мемристорни модели са достъпни за използване на следния адрес в Интернет:

<https://github.com/mladenovvaleri/Advanced-Memristor-Modeling-in-LTSpice>.

Апробация

Дисертационният труд е написан в Технически университет – София, Факултет Автоматика, катедра Теоретична електротехника.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 7 статии, от които една самостоятелна. Една от статиите е публикувана в списание с импакт-фактор, 3 са в базата данни IEEE, и три – в годишника на Технически университет – София.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 136 страници, като включва увод, 5 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 127 литературни източници, като 123 са на латиница и 4 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 64 фигури и 1 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР. ВЪВЕДЕНИЕ В МЕМРИСТОРИТЕ, БАЗИРАНИ НА РАЗЛИЧНИ ВИДОВЕ МАТЕРИАЛИ

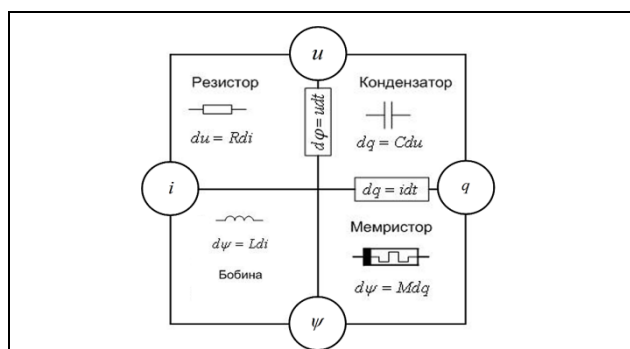
В глава първа се дават общите сведения за мемристорите, техните основни свойства, устройство и принцип на действие. Разгледани са най-често използваните модели - тези на Струков-Уилямс, Йоглеркер, Биолек и Лехтонен-Лайхо. Разгледани са основните приложения на мемристорите – в реконфигурируеми електронни устройства (филтри, генератори, интегриращи и диференциращи вериги), енерго-независими памети и невронни мрежи. Във връзка с някои недостатъци на класическите мемристорни модели са формулирани мотивацията, целите и задачите на дисертацията.

1.1. Общи сведения за метал-оксидните мемристори

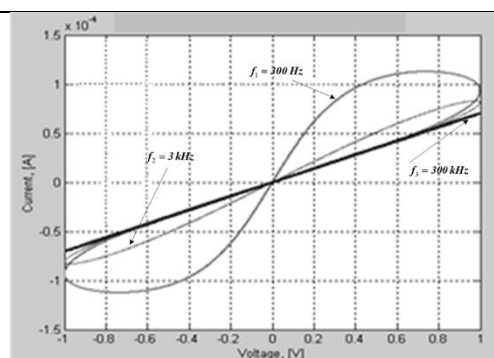
През 1971 г. Леон Чуа развива идеята си за съществуването на липсващия четвърти основен двуполусен елемент – мемристора, описан от Чуа [8], даващ следната нелинейна зависимост между потока Ψ и заряда q :

$$\psi(q) = f[q(t)] \quad (1.1)$$

На Фиг. 1.1 са дадени връзките на основните електрически величини.



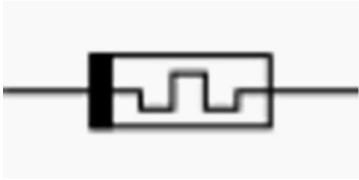
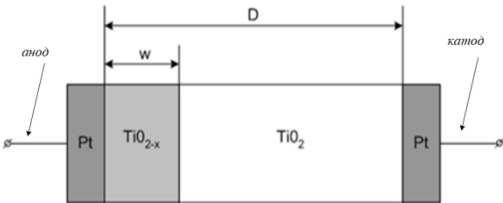
Фиг. 1.1. Основни зависимости между базовите електрически величини



Фиг. 1.3. ВАХ на мемристор, при напрежение с различни честоти

Съпротивлението R дава връзката между напрежението и тока (характеристика напрежение-ток – ХТН), индуктивността L - между тока и магнитния поток (характеристика ток-поток), кондензаторът C - между напрежението и заряда (характеристика напрежение-заряд) и мемристорът дава последната зависимост - между магнитния поток и електрическия заряд [1] – [4] (характеристика поток-заряд, наричана още вебер-кулонова характеристика - ВКХ). Чуа установява неговите основни свойства, а именно запамятаването на количеството заряди, и способността му да запазва съпротивлението си след изключване на напрежението. Мемристорът е един качествено нов пасивен елемент, тъй като той не може да бъде моделиран само чрез комбинация от пасивни елементи. ВАХ на мемристора при синусоидален режим представлява усукана хистерезисна крива, която се свива с повишаване на честотата на приложения сигнал. Дадени са хистерезисни криви на мемристор при различни честоти на фиг.1.3. В продължение на повече от 30 години разработката на мемристорите остава само теоретична. Едва през 2008 г. в лабораториите на Hewlett-Packard Грегъри

Шнайдер, Дмитри Струков, Дънкан Стюърт и Стенли Уилямс реализират превключваеми резисторни елементи, които имат характеристики, подобни на мемристора на Чуа, като използват титанов диоксид, легиран с кислородни ваканции – описано от Уилямс [11]. Забелязва се, че при ВАХ съществува зона с отрицателно диференциално съпротивление, което определя нарастване на тока при понижаване на напрежението и предполага приложения на мемристорите в генератори. Съхраняваната в него информация може да бъде запазена след прекъсване на захранването. На фиг. 1.5. е показан символът на мемристора [11].

	
Фиг. 1.5 Схематично изображение на мемристора в електронните схеми	Фиг. 1.6. Структурна схема на титаново-диоксиден мемристор на Уилямс

1.2. Метал-оксидни мемристори - видове

Най-често използваните материали, от които се създават мемристори са: метални оксиди, полимерни съединения, феро-електрически и спин-базирани магнитни материали. С широко приложение са мемристорите от оксиди на преходни метали – титан, хафний, тантал, ниобий.

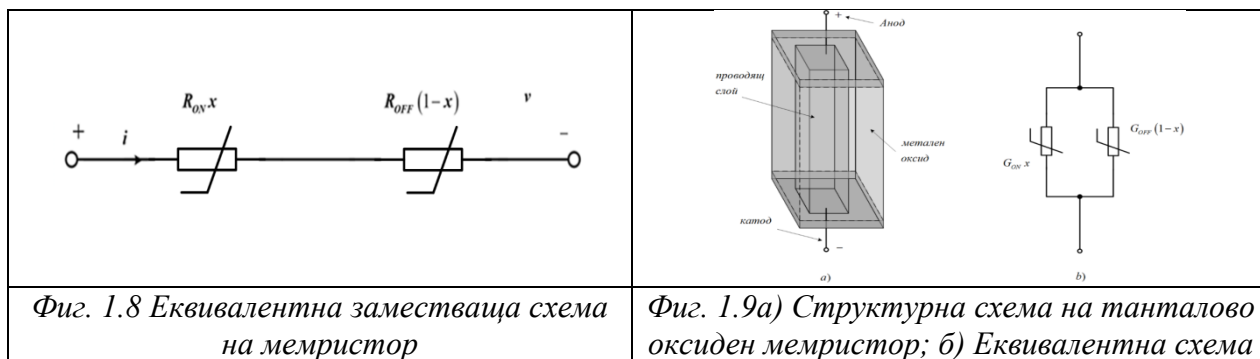
1.2.1. Титаново-диоксиден мемристор

Схематична структура на титаново-диоксидният мемристор на Уилямс [11] е дадена на Фиг. 1.6. Той има два електрода – анод и катод. Между електродите е разположен тънък филм от титанов диоксид. Първият слой има стехиометрична формула TiO_{2-x} , $/x = 0.01 - 0.05/$ и е наситен с кислородни ваканции, т.е. в него има недостиг на кислород. Неговата текуща дължина е означена с w и той има ниско съпротивление. Кислородните ваканции имат положителен фиктивен заряд. Ако към получената структура се приложи напрежение в права посока, т.е. „+“ на анода, кислородните ваканции започват движение към катода, навлизат в зоната на слоя от чист титанов диоксид и еквивалентното съпротивление на елемента намалява. При прекъсване на напрежението кислородните ваканции спират движението, но остават включени в слоя, така мемристорът „запаметява“ последната стойност на съпротивлението си. Съпротивлението в затворено състояние е около $R_{ON} = 100 \Omega$, в отворено $R_{OFF} = 16 k\Omega$. Мемристорът се управлява чрез напрежение и има поведение на електронен ключ [11]. Еквивалентната заместваща схема на мемристор е дадена на Фиг. 1.8. Йонната подвижност на кислородните ваканции при напрежения до 1 V има постоянна стойност, докато при по-високи напрежения нараства по експоненциален закон.

1.2.2. Хафниево-диоксиден мемристор

Хафният е химичен елемент от същата 4-та вторична група на периодичната система, към която принадлежи и титанът. В общи линии, с изключение на по-малкият йонен радиус, хафният има сходни свойства с тези на титана.

Структурната схема на хафниево-оксидния мемристор е аналогична на тази на титаново-оксидния мемристор. За хафниево-оксидните мемристори могат да се използват същите модели [36], [37].



1.2.3. Танталово-оксиден мемристор

При тези мемристори се използва моделиране чрез два паралелно разположени канала, чието сечение зависи от напрежението. Структурна схема на такъв мемристор е показана на Фиг. 1.9 а). Еквивалентната заместваща схема на танталово-оксиден мемристор е дадена на Фиг. 1.9 б). Променливата на състоянието се определя като отношение на площта на централния проводящ участък a_1 и тази на цялото сечение на мемристора a_2 :

$$x = a_1 \cdot a_2^{-1} \quad (1.8)$$

Понеже $a_1 \leq a_2$, променливата на състоянието на мемристора се намира в ограничени интервал $[0, 1]$. Зависимостта между тока и напрежението е:

$$i = [G_{ON} x + G_{OFF} (1 - x)] \cdot u \quad (1.9)$$

1.2.4. Ниобиево-оксиден мемристор

През последните години, все по-голяма популярност придобиват ниобиево-оксидните мемристори. При тях е силно изразено т. нар. отрицателно диференциално съпротивление (ОДС) в определени области от характеристиката напрежение-ток. Ниобиевите мемристори имат метални електроди, между които е формиран тънък слой от нестехиометричен ниобиев оксид (NbO_x). Ниобият и танталът са от една и съща група на периодичната система, съответните оксиди имат сходни отношения.

1.3. Моделиране на мемристори – основни положения

За да се анализира поведението на мемристорите в електрическо поле е важно създаването на модели, които да позволяват прецизно изследване чрез компютърни симулации, като за целта използваните модели трябва да имат, от една страна, висока точност, а от друга – да бъдат опростени, с минимално време за симулация. Основните понятия, използвани при моделирането на мемристори са: *Линеен мемристорен модел* – при него съществува линейна зависимост между производната на променливата на състоянието на мемристора по времето и тока (напрежението). *Нелинеен мемристорен модел* – той се описва с определена нелинейна зависимост между производната на променливата на състоя-

нието по отношение на времето и тока (напрежението) в уравнението на състоянието. *Нелинейно йонно отместване (НЙО)* – определя нелинейната зависимост между скоростта на движение на кислородните ваканции в мемристора и приложеното напрежение, както и различните скорости на движение на зарядите в централната част и в периферията на мемристора. *Праг на активиране на мемристора – (ПА)* – представлява напрежението, до достигането на което мемристорът има поведение на линеен резистор, при съответстваща неизменна стойност на променливата на състоянието. При надхвърляне на прага на активиране, променливата на състоянието на мемристора се променя пропорционално на еквивалентния поток, характеристиката напрежение-ток описва усукан хистерезисен цикъл. *Начини на свързване на мемристора* - в права посока – на анода е подаден положителен потенциал, на катода – отрицателен, и в обратна посока на свързване, когато на катода е приложен положителен потенциал спрямо този на анода. *Гранични ефекти* – свързани са с изменението на променливата на състоянието при достигане на своите гранични стойности – нула и единица. *Превключване на мемристора* – в зависимост от диапазона на промяна на променливата на състоянието, съществуват два основни режима – т. нар. меко превключване и твърдо превключване. При мекото превключване, променливата на състоянието не достига своите гранични стойности. Състоянието на мемристора се описва със система, съдържаща две уравнения. Първото изразява характеристиката напрежение-ток, второто дава връзката между производната на променливата на състоянието по отношение на времето и тока (напрежението).

1.3.1. Мемристорен модел на Strukov u Williams [11]

Системата уравнения, описваща този мемристорен модел е (1.10):

$$\begin{aligned} u &= i \cdot [R_{ON}x + R_{OFF}(1-x)] \\ \frac{dx}{dt} &= k \cdot i \cdot x(1-x) \end{aligned} \quad (1.10)$$

където изразът $f_{sw}(x) = x(1-x)$ е прозоречната функция на Strukov-Williams.

1.3.2. Мемристорен модел на Joglekar [16]

Мемристорният модел на Йоглекер е описан със система уравнения (1.11). Диференциалното уравнение на състоянието на мемристора, при използване на прозоречната функция на Joglekar - $f_J(x) = 1 - (2x-1)^{2p}$, със зависимостта ток-напрежение е описано със система уравнения (1.11) [16]:

$$\begin{aligned} u &= i \cdot [R_{ON}x + R_{OFF}(1-x)] \\ \frac{dx}{dt} &= k \cdot i \cdot [1 - (2x-1)^{2p}] \end{aligned} \quad (1.11)$$

1.3.3. Мемристорен модел на Biolek [17]

Класическият модел на Биолек е представен със система уравнения (1.12). Изразът в квадратните скоби представлява прозорецът на Биолек.

$$\begin{aligned}
 u &= i \cdot [R_{ON} x + R_{OFF} (1-x)] \\
 \frac{d x}{d t} &= k \cdot i \cdot \left[1 - (x - \text{stp}(-i))^{2p} \right]
 \end{aligned}
 \tag{1.12}$$

1.3.4. Мемристорен модел на Lehtonen-Laiho

Моделът на Лехтонен-Лайхо се описва със системата уравнения:

$$\begin{cases}
 i = \beta \cdot x^n \cdot \sinh(\alpha \cdot v) + \chi [\exp(\gamma v) - 1] \\
 \frac{d x}{d t} = a \cdot f_B(x) \cdot v^m
 \end{cases}
 \tag{1.13}$$

където χ , γ , β , α , m , a , и n са параметри за настройка на модела, а $f_B(x)$ е прозоречната функция на Биолек. Разглежданите класически модели имат както редица преимущества, така и някои недостатъци, като сравнително ниска точност или голяма сложност.

1.4. Полимерни мемристори

Полимерният мемристор е описан от Виктор Ерохин и Марко Фонтана и обикновено се изработва от проводящ органичен материал – PANI (Polyaniline - Полианилин). Принципът на действие на този вид мемристори се основава на факта, че проводимостта на полианилина се променя при извършване на окислително-редукционни процеси в него, под въздействието на приложено електрическо поле.

1.5. Фероелектрически мемристори

Принципът на действието му се основава на т. нар. електро-резистивен тунелен ефект, който се появява при прилагане на напрежение върху елемента, което води до промяна на неговото съпротивление в широк диапазон. Чрез подаване на напрежение в права или обратна посока се осъществява смяна на поляризацията на фероелектричния материал, което определя промяната на съпротивлението в широк диапазон.

1.6. Мемристори, базирани на спина на електроните

Тези мемристори се основават на промяната на съпротивлението, поради наличието на области с различна ориентация на спина на електроните. В тях съществува граница между две области с различна ориентация на спина на електроните, където се създава и съответното съпротивление.

1.7. Мемристор, основан на магнитен тунелен преход

При този елемент промяната на съпротивлението се определя от намагнитването на материала, разположен между електродите при магнитен тунелен преход. В зависимост от времето за протичане на тока през прехода и съответстващото количество заряд, се определя и съответната промяна на съпротивлението на елемента.

1.8. Приложения на мемристорите в електронни схеми и устройства

Основните приложения, както се забелязва от съществуващите публикации по мемристорни електронни вериги са: в енерго-независими памети, нев-

ронни мрежи, филтри, интегриращи вериги, усилватели, генератори и други аналогови и цифрови устройства.

1.8.1. Енерго-независими памети

Благодарение на своите добри запамятаващи свойства, мемристорът може да бъде използван в енерго-независими памети за съхраняване на логическа информация при бинарни сигнали.

1.8.2. Невронни мрежи

Невронните мрежи се използват за решаване на разнообразни проблеми, най-често при наличие на големи обеми от данни. Те са изградени от определен брой неврони и свързващи синапси, за реализирането на които успешно се използват мемристори. Високата плътност на монтаж позволява съществено да се увеличи броят на синапсите между невроните.

1.8.3 Мемристорни генератори и филтри

Благодарение на появата на отрицателно диференциално съпротивление (ОДС) в определени области на волт-амперната характеристика на мемристорите, както и на възможността за промяна на техните характеристики чрез импулси, мемристорите могат да бъдат използвани в генераторни схеми. Изследвана е възможността за използване на мемристорите в разнообразни схеми на различни видове филтри.

1.8.4. Диференциращи и интегриращи вериги с мемристори

Диференциращите и интегриращите вериги представляват модули от радиоелектронни схеми. Те се базират на резистори, кондензатори и операционни усилватели и служат за обработка на импулси. При замяна на резисторите с мемристори, веригите имат подобрени характеристики.

1.9. Мотивация, цел и задачи на дисертационния труд

Основни проблеми и липси, забелязани в научната литература върху метал-оксидни мемристори и схеми са: използването на специфични модели за различните типове мемристори, сравнително ниската точност на някои от тях, значителната сложност други модели, както и проблеми, свързани със сходимостта в среда на SPICE. Това е основната причина и **мотивацията** за настоящата дисертация – частично компенсиране на някои недостатъци и липси, свързани с голяма сложност на мемристорните модели или тяхната недостатъчна точност.

Целта на дисертацията е подобряване на някои съществуващи мемристорни модели, чрез опростяване на техните аналитични изрази, въвеждане на подходящи прозоречни функции, използване на гладки и диференцируеми функции, с което се подобрява сходимостта.

Задачи за изпълнение: 1. Модифициране и подобряване на някои от най-използваните съществуващи мемристорни модели. 2. Приложение на метал-оксидни мемристори в аналогови реконфигурируеми електронни схеми. 3. Приложение на оксидни мемристори в невронни мрежи и енерго-независими памети. 4. Съпоставка на моделите при тяхното функциониране в електронни устройства.

ГЛАВА 2. МОДИФИЦИРАНИ МОДЕЛИ НА МЕТАЛ-ОКСИДНИ МЕМРИСТОРИ

В глава втора се разглеждат няколко модифицирани модела на метал оксидни мемристори, с цел подобряване на съществуващите модели – основно тяхното опростяване, с оглед приложение при симулация на сложни мемристорни схеми. Това се налага, поради някои недостатъци на съществуващите модели, които се оптимизират. Предложените мемристорни модели имат по високо бързодействие, малко по-ниска, но съизмерима с класическите модели точност, лесна реализация в среда на LTSPICE.

2.1. Общи сведения

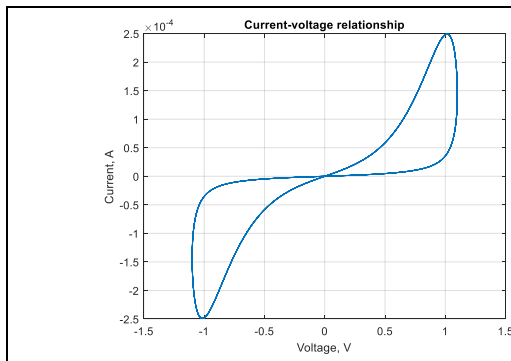
Поради някои забелязани недостатъци на съществуващите мемристорни модели - голяма сложност на уравненията – Лехтонен-Лайхо, невъзможност за отразяване на граничните ефекти – Йоглекер, Уилямс-Струков, липса на прагове на активиране – Биолек, Йоглекер, сравнително ниска точност – Уилямс, Йоглекер, Биолек, се налага модифицирането им, с оглед опростяване. Предложените модели имат добра точност, близка до тази на модела на Лехтонен-Лайхо, добри превключващи свойства, и работят при високи честоти. Предложените модели са означени със $C_1 - C_6$.

2.2. Модифициран титаново диоксиден мемристорен модел, базиран на модела на Лехтонен-Лайхо и експоненциална прозоречна функция (модел C_1) [авторска публикация A_1]

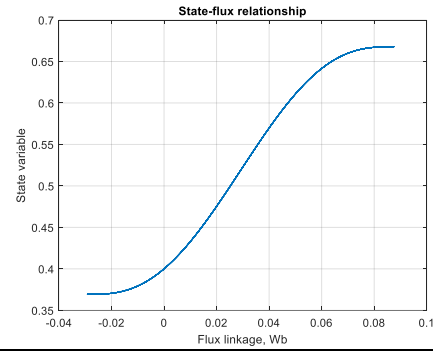
Предложеният модифициран модел за хафниево диоксиден мемристор се основава на модела на Lehtonen-Laiho, подробно описан в 1.3.4 – (1.13). Прозоречната функция на Биолек съдържа функцията на Хевисайд, която е сложна и често създава проблеми със сходимостта. Модифицираният модел е представен чрез (2.1). Приложената прозоречна функция се основава на комбинация от две експоненциални функции. Тя е гладка и диференцируема и осигурява плавен преход между различните състояния на мемристора.

$$\begin{cases} i = b \cdot x^n \cdot \sinh(a \cdot u) + c [\exp(g \cdot u) - 1] \\ \frac{dx}{dt} = a \cdot u^m \cdot \left[\frac{1}{1 + \exp(-k \cdot x)} \cdot \frac{1}{1 + \exp[k \cdot (x - 1)]} \right] \end{cases} \quad (2.1)$$

където $a, m, k, \beta, n, \alpha, \chi, \gamma$ са параметри за настройка. Процедурата по настройка е реализирана в среда MATLAB и прилагане на процедура за оценка на параметрите. Изведените стойности на тези параметри са: $\beta = 150 \mu A$, $\alpha = 3,55 V^{-1}$, $\chi = 50 \mu A$, $\gamma = 0,07 V^{-1}$, $a = 3,34$, $k = 100$, $m = 5$, $n = 5$. Съответната ВАХ е представена на фиг. 2.3. Тя е симетрична крива. С увеличаване на честотата, ВАХ се свива до еднозначна права линия, което доказва правилното поведение на предложения модел на мемристор. Съответната зависимост състояние-поток е представена на фиг. 2.4.



Фиг. 2.3 Характеристика напрежение-ток съгласно мемристорния модел C_1



Фиг.2.4 Характеристика състояние-поток съгласно мемристорния модел $C1$

2.3. Модифициран метал-оксиден мемристорен модел, базиран на модела на Уилямс, Лехтонен-Лайхо и прозоречната функция на Йоглекер (модел C_2) [авторска публикация A_2]

Предложеният модел на метал-оксиден мемристор е базиран върху модела на Уилямс за танталово-оксидни мемристори, описан в 1.2.3 – (1.9), модела на Лехтонен-Лайхо – (1.13), и прозоречната функция на Йоглекер – (1.11). Поради сложността на зависимостта напрежение-ток на модела на Лехтонен-Лайхо, тя е представена с уравнението:

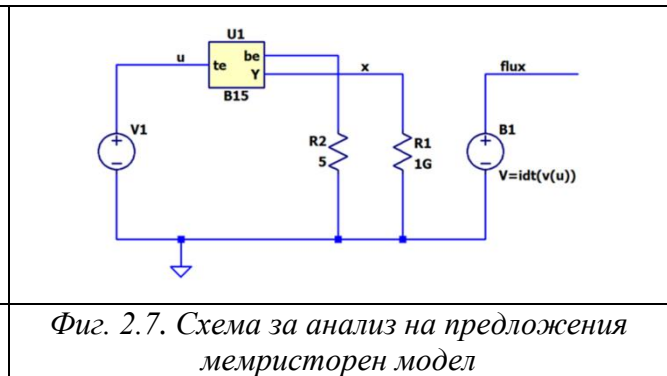
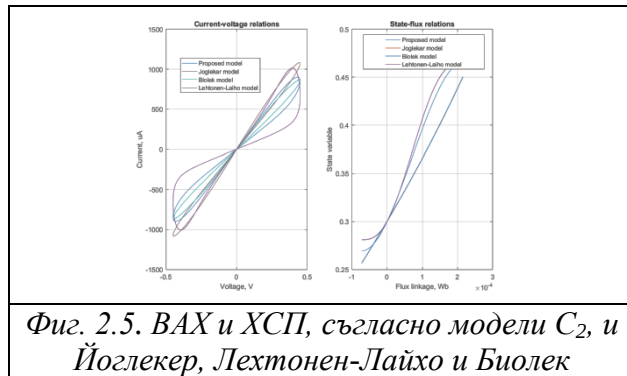
$$i = G(x)v = [G_{ON}x + G_{OFF}(1-x)]v$$

Пълният модел е представен от (2.2). Проводимостта при включено и изключено състояние се означават с G_{ON} и G_{OFF} . Коефициентите k_1 и k_2 се прилагат в модела на мемристор за неговата настройка.

$$\begin{cases} i = G(x)v = [G_{ON}x + G_{OFF}(1-x)]v \\ \frac{dx}{dt} = 0, \quad |v| < v_{thr} \\ \frac{dx}{dt} = k_1(k_2v)^3 f_J(x), \quad |v| \geq v_{thr} \\ f_J(x) = 1 - (2x - 1)^{2p} \end{cases} \quad (2.2)$$

Второто отношение съдържа прага на активиране (чувствителност) v_{thr} и според този израз променливата на състоянието x има постоянна стойност, когато напрежението е по-ниско от това ниво. Третият израз в (2) свързва времевата производна на x и напрежението. Изразът $k_2 \cdot v_3$ е включен за приблизително представяне на нелинейното движение на легиращия компонент. Включеният в (2) прозорец на Joglekar ограничава променливата на състоянието в интервала $[0, 1]$. Стойностите на коефициентите са: $k_1 = 715.3$, $k_2 = 1.49$, $m = 1.03 \cdot 10^{-7}$, $x_0 = 0.43$, $G_{ON} = 0.011$, $G_{OFF} = 0.00013$, $v_{thr} = 0.11$, $p = 10$. Характеристиката напрежение-ток и състояние-поток на предложения модел са представени на фиг. 2.5. Моделите на мемристорите работят в режим на меко превключване и поведението на моделите Joglekar и Biolek е почти идентично. Времето за симулация на предлагания модел е около 18.4 ms, за модела Lehtonen-Laiho е около 19.7 ms,

за модела Joglekar [16] – 16.1 ms и за модел Biolek – 16.6 ms. Съответните грешки са: 2,74 % за предложения модел, 2,66 % за модела Lehtonen-Laiho, 3,62 % за модела Joglekar и 3,46 % за модела Biolek. Представеният мемристорен модел има добра точност, близка до тази на модела на Лехтонен-Лайхо, и е с по-малко време за симулация. Въз основа на уравненията на предложения модел се създава съответният LTSPICE мемристорен библиотечен модел. Моделът LTSPICE е включен във верига за анализ на неговото поведение, дадена на фиг. 2.7. Източникът V_1 създава сигнал, пропорционален на потока. В авторската статия разгледаният мемристорен модел е означен с B_{15} , а в дисертацията е отразен като C_2 . Характеристиките са дадени на фиг. 2.5.



2.4. Модифициран метал-оксиден мемристорен модел, базиран на модела на Струков-Уилямс, Лехтонен-Лайхо и прозоречна функция на Биолек (модел C_3) [авторска публикация A_3]

Предложеният мемристорен модел е базиран на моделите Biolek – (1.12) и Lehtonen-Laiho – (1.13). Заради сложността на зависимостта напрежение-ток на модела на Лехтонен-Лайхо, тя е представена с:

$$u = [R_{ON}x + R_{OFF}(1-x)] i$$

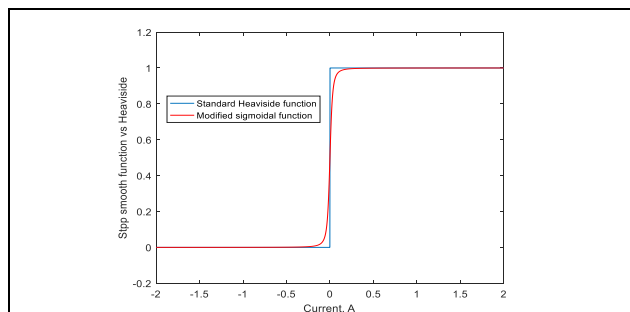
а функцията на Хевисайд е заменена със сигмоидална гладка функция:

$$stpp(i) = 0.5 \cdot \left[1 + (i^2 + s)^{-0.5} \cdot i \right]$$

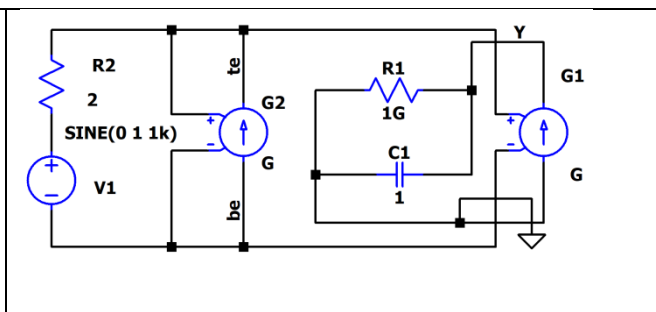
Предложеният модел на мемристор е описан от (2.3). Коефициентите k_1 и k_2 са параметри за настройка. Първото уравнение е съставено съгласно модела на Биолек и представлява зависимостта между напрежението v и тока i . Второто и третото уравнения в (2.3) изразяват производната по време на x .

$$\begin{cases} v = i \cdot [R_{ON}x + R_{OFF}(1-x)] \\ \frac{dx}{dt} = 0, |v| < v_{thr} \\ \frac{dx}{dt} = k_1 \cdot (k_2 \cdot v)^3 \cdot f_{BM}(x, i), |v| \geq v_{thr} \\ f_{BM}(x, i) = 1 - [x - stpp(-i)]^{2p} \\ stpp(i) = 0.5 \cdot \left[1 + (i^2 + s)^{-0.5} \cdot i \right] \end{cases} \quad (2.3)$$

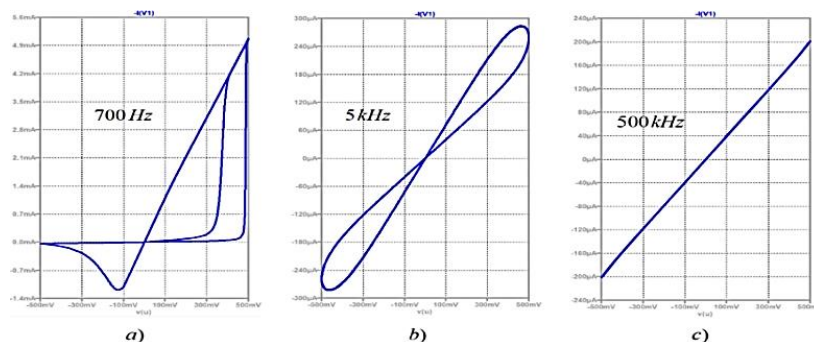
Изразът $(k_2.v)^3$ се използва за апроксимация на нелинейния дрейф на легиращата добавка. Използваният прозорец $f_{BM} [A_3]$ е подобрена версия на стандартната функция на прозореца на Biolek. Оптималните стойности на параметрите са: $k_1 = 2855.4$; $k_2 = 1,0554$; $m = 0,000101$; $x_0 = 0,8544$; $R_{ON} = 132,15$; $R_{OFF} = 1738,24$; $v_{thr} = 0,1054 \text{ V}$; $p = 9$. Еквивалентната схема на LTSPICE мемристорен модел е показана на фиг. 2.9. Променливата на състоянието x е свързана с напрежението $V(Y)$ на кондензаторния елемент $C_1 [A_2]$. Токът му е равен на производната по време на x . Четириполюсният зависим от напрежението източник на ток G_2 изразява проводимостта на мемристора. Вътрешното съпротивление на източника на напрежение V_1 се изразява чрез резистора R_2 . Резисторът R_1 , свързан паралелно към кондензатора C_1 , защитава схемата от проблеми със сходимостта. Основните изводи на мемристора са горният електрод (te) и долният електрод (be). Електродът Y се използва за измерване на променливата на състоянието x . На фиг. 2.8 са дадени графиките на единичната функция на Хевисайд (със син цвят), приложена в класическите мемристорни модели на Биолек и Лехтонен-Лайхо, и модифицираната сигмоидална функция, използвана в този и следващите мемристорни модели. Стръмността на приложената сигмоидална функция може да бъде управлявана, така че да се подобрява сходимостта в среда на SPICE. Съответните ВАХ са показани на фиг. 2.11. Ако честотата се повиши, площта на усукания хистерезисен цикъл намалява. Времето за симулация на предлагания модел мемристор е около 17,4 ms. По отношение на класическия модел на Lehtonen-Laiho, този модел има по-висока работна скорост. Точността му е много близка до модела на Лехтонен-Лайхо.



Фиг. 2.8 Сравнение между единична функция на Хевисайд и нейният аналог



Фиг. 2.9 Еквивалентна схема на LTSPICE мемристорния модел C_3



Фиг. 2.11 Волт-амперни характеристики на модел C_3 , при една и съща амплитуда на напрежението и при различни честоти а) $f_1 = 700 \text{ Hz}$; б) $f_2 = 5 \text{ kHz}$; в) $f_3 = 500 \text{ kHz}$

2.5. Модифициран метал-оксиден мемристорен модел, базиран на модела на Уилямс и прозоречна функция на Биолек с допълнителен синусоидален компонент (модел C₄) [авторска публикация A₄]

Приложеният модифициран модел на мемристор от титанов диоксид е базиран на класическия модел Biolek, но с включване на няколко промени и подобрения. Неговата модифицирана прозоречна функция е линейна комбинация от стандартния прозорец на Biolek и претеглена синусоидална компонента, приложена за увеличаване на нелинейността [A₄]. Променливата на състоянието x се изразява така [A₄]:

$$x = a_1 \cdot a_2^{-1} \quad (2.5)$$

където Ψ е магнитния поток, изразен като времеви интеграл от напрежението на мемристора v , a_1 представлява началната площ на легираната област на мемристора. Пълното описание на предложения модел е:

$$\begin{aligned} i &= v \cdot [G_{ON} x + G_{OFF} (1 - x)] \\ \left| \frac{dx}{dt} \right| &= k \cdot i \cdot \left\{ \left[1 - (x - stpp(-i))^{2p} \right] + \left[m (\sin^2(\pi x)) \right] \right\} \frac{1}{m+1}, |v| \geq v_{thr} \\ \frac{dx}{dt} &= 0, |v| < v_{thr} \\ stpp(i) &= 0.5 \left[i(i^2 + n)^{-0.5} + 1 \right] \end{aligned} \quad (2.8)$$

Тук p е положителен целочислен степенен показател, обикновено между 1 и 50, v_{thr} е прагът на активиране (чувствителност) на мемристора, k е константа, зависима от физическите параметри на мемристора, а m е коефициент за настройка на модела. Установено е, че разглежданият модел работи успешно както при меко, така и при твърдо превключване. В сравнение с другите софтуерни SPICE продукти, LTSPICE е лесен за използване, безплатен и много полезен софтуерен продукт, поддържан от Analog Devices Corporation. Често се използва за анализ, проектиране и симулации на електронни схеми и устройства. Почти не се забелязват проблеми със сходимостта. Предпочитан е за използване от много учени и инженери. Той може да бъде изтеглен и инсталиран от: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html#>. Описаният модел на мемристор е включен в унифицирана и отворена библиотека, свободно достъпна за използване на уеб сайта: <https://github.com/mladenovvaleri/Advanced-Memristor-Modeling-in-LTSpice>.

2.6. Модифициран метал-оксиден мемристорен модел, базиран на модела на Лехтонен-Лайхо и прозоречна функция на Биолек (C₅) [A₅]

Тъй като зависимостта между тока и напрежението при модела на Лехтонен-Лайхо е доста сложна – (1.13), тук тя е апроксимирана с полиним от ниска степен. Пълният модифициран модел е изразен с (2.9). За настройка на модела се използват коефициентите k_1 , k_2 , k_3 и k_4 . Изразът $k_3(k_4 \cdot v)^3$ се прилага за приблизително представяне на нелинейния дрейф на йонната добавка. Изведените стойности на параметрите са: $k_1 = 0.11$, $k_2 = 0.13$, $k_3 = 803.2$, $k_4 = 1.52$, $m = 1.03 \cdot 10^{-7}$, $x_0 = 0.3$, $v_{thr} = 0.1$, $p = 10$. Времето за симулация на предложения модел е око-

ло 17,3 ms, за модела Lehtonen-Laiho е около 16,9 ms, за модела Biolek – 16,4 ms, а за модела Joglekar – 16,1 ms. Съответните грешки са: 2,71 % за предложениния модел, 2,63 % за модела Lehtonen-Laiho, 3,46 % за модела Biolek и за модела Joglekar – 3,71 %. Предлагаият мемристорен модел има добра точност.

$$\left\{ \begin{array}{l} i = (k_1 v^5 + k_2 v) x^5 \\ \frac{dx}{dt} = 0, \quad |v| < v_{thr} \\ \frac{dx}{dt} = k_3 (k_4 v)^3 f_{BM}(x, i), \quad |v| \geq v_{thr} \\ f_{BM}(x, i) = 1 - [x - stpp(-i)]^{2p} \\ stpp(i) = \frac{1}{2} \cdot \left[(i^2 + s)^{-0.5} i + 1 \right] \end{array} \right. \quad (2.9)$$

2.7. Модифициран титаново-диоксиден мемристорен модел, базиран на модела на Струков-Уилямс и прозоречна функция на Биолек с допълнителен параболичен компонент (модел C₆) [авторска публ. A₆]

Пълното описание на предложениния модел е формула (2.11). Прозоречната функция е комбинация от прозорците на Biolek и Williams.

$$\left\{ \begin{array}{l} v = i \cdot [R_{min} x + R_{max} (1 - x)] \\ \frac{dx}{dt} = k \cdot i \cdot m \left\{ \left[\frac{1 - (x - stpp(-i))^{2p}}{4x(1-x)} \right] \right\}, \quad |v| \geq v_{thr} \\ \frac{dx}{dt} = 0, \quad |v| < v_{thr} \\ stpp(i) = 0.5 \cdot \left[1 + i(i^2 + n)^{-0.5} \right] \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Представената модифицирана прозоречна функция в сравнение с други прозоречни функции, като тези на Йоглекер и Биолек се променя в широк диапазон и води до правилна работа на модела високочестотни сигнали.

2.8. Изводи към глава 2

След литературния обзор и забелязани недостатъци на класическите модели на Йоглекер, Струков-Уилямс, Биолек и Лехтонен-Лайхо, са направени модификации, с цел засилване на нелинейността и въвеждане на прагове на активиране, позволяващи на моделите да функционират при различни режими. Направена е модификация на модела на Биолек с добавяне на допълнителен синусоиден компонент, засилващ нелинейността на йонното отместване, и допълнителна модификация чрез мащабиращ множител за разширяване обхвата на прозоречната функция и отгук – осигуряване на възможност за изменението на състоянието в широк диапазон, което позволява работата при високи честоти. В предложените модели се използват прозоречните функции на Йоглекер и Биолек, с участието на подобрен аналог на единичната функция на Хевисайд. Приложената функция е диференцируема и подобрява сходимостта. Генерираните LTSPICE модели са анализирани при синусоиден и импулсен режим, като е потвърдена тяхната работоспособност.

ГЛАВА 3. СИНТЕЗ И АНАЛИЗ НА РЕКОНФИГУРИРУЕМИ ЕЛЕКТРОННИ УСТРОЙСТВА С МЕМРИСТОРИ

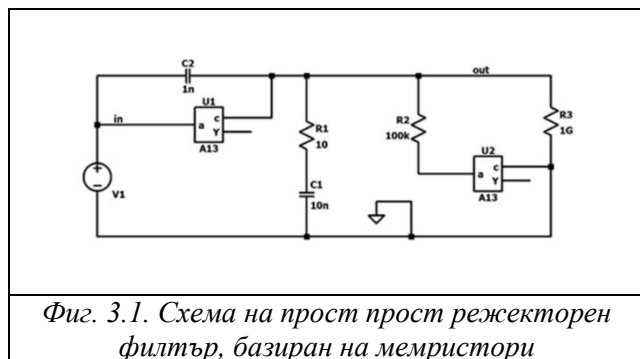
Тук се разглеждат аналогови реконфигурируеми електронни устройства (нискофреkwотни, високочестотни, лентови и режекторни филтри, генератори, интегриращи и диференциращи вериги), базирани на метал-оксидни мемристори (титанов диоксид, хафниев оксид, танталов оксид и др.). Изследваните електронни схеми са аналози на класическите резисторно-кондензаторни устройства, като резисторите, определящи основните честотни и времеви характеристики са заменени с мемристори. Тяхното съпротивление се променя под въздействие на външни импулси с високо ниво и продължителност. Анализите потвърждават коректното функциониране на мемристорите и са предпоставка за проектиране на схеми със свръхвисока степен на интеграция.

3.1. Общи сведения

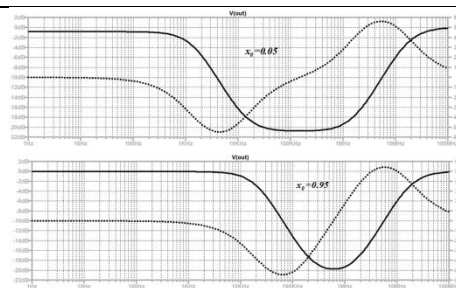
В тази глава се разглеждат реконфигурируеми електронни устройства с мемристори във връзка с редица преимущества на мемристорите по отношение на резисторите и CMOS елементите – по-ниска консумация на енергия, по-малки размери и съвместимост с технологията на интегралните схеми със свръхвисока степен на интеграция, което ги прави много подходящи за реализация върху чипове.

3.2. Режекторен филтър с мемристори [авторска публикация A₃]

Разгледаният в 2.4 модифициран модел на метал-оксиден мемристор е приложен в регулируем аналогов режекторен филтър [A₃]. Той е описан със (3.1). В авторската статия, моделът е означен като A₁₃, а тук се означава с C₃. Описаният в този раздел пасивен режекторен филтър се основава на паралелно свързване на нискофреkwотни и високочестотни кондензаторно-резисторни филтърни групи, където резисторите са заменени с мемристори. Филтриращата верига е показана на фиг. 3.1. Граничната честота на високочестотния филтър, включително мемристора U₁ и капацитивния елемент C₁, е по-висока от съответната гранична честота на нискофреkwотния филтър, базирана на мемристора U₂ и кондензатора C₂. Лентите на пропускане на филтриращите групи не се покриват. Резисторът R₁ предотвратява намаляването на изходното напрежение за високи честоти.



Фиг. 3.1. Схема на прост прост режекторен филтър, базиран на мемристори



Фиг. 3.2. АЧХ и ФЧХ на мемристорния филтър за а) начална стойност на $x_0 = 0.05$; б) $x_0 = 0.95$

АЧХ на мемристорния филтър е показана на фиг. 3.2. Съпротивлението на компонентите U₁ и U₂ се променя чрез външни напрежителни импулси. По този начин граничните честоти на филтъра могат да се променят [A₃]. Резисторът R₃ се използва за предотвратяване на проблеми със сходимостта. Резисто-

рът R_2 се използва за промяна на нивото на изходния сигнал за по-високите честоти. Граничната честота на модула за нискочестотно филтриране зависи от съпротивлението M_1 , на схемата означен с U_1 , и C_1 :

$$f_{\text{cut-off low}} = (2\pi C_1 M_1)^{-1} \quad (3.2)$$

Съответната гранична честота на ВЧ филтърна група е $[A_3]$:

$$f_{\text{cut-off high}} = (2\pi C_2 M_2)^{-1} \quad (3.3)$$

Лентата на задържане на режекторния филтър е $[A_3]$:

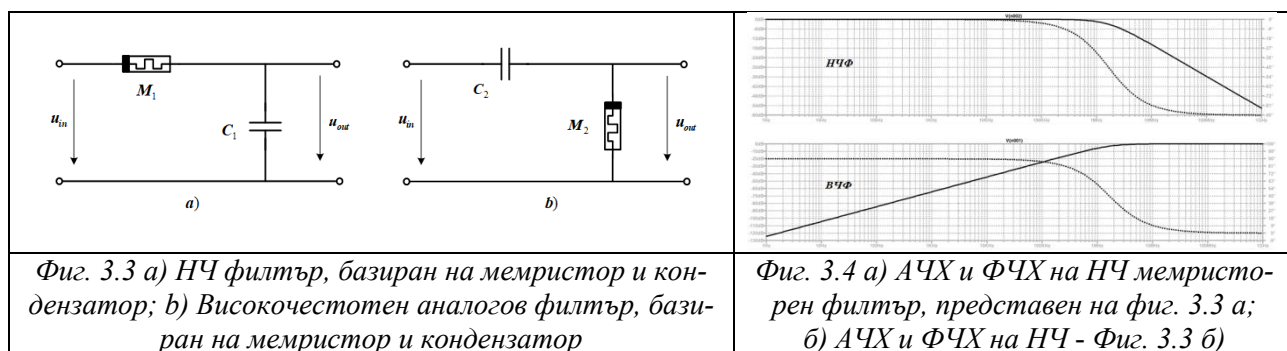
$$\Delta f_{\text{pass}}(M_1, M_2) = f_{\text{cut-off high}} - f_{\text{cut-off low}} \quad (3.4)$$

3.3. Нискочестотни, високочестотни и лентови филтри с мемристори $[A_2]$

Описаният в 2.3 модифициран метал-оксиден мемристорен модел е приложен в прости пасивни аналогови филтри $[A_2]$.

3.3.1. Аналогови нискочестотни и високочестотни филтри, базирани на мемристори [авторска публикация A_2]

Филтрите са представени на фиг. 3.3. Фиг. 3.3 а) представя нискочестотен филтър, където изходното напрежение е върху кондензатора C_1 . Съпротивлението на мемристорите M_1 и M_2 се настройват чрез външни импулси. Съответният високочестотен филтър е изобразен на фиг. 3.3 б) и неговото изходно напрежение е падът на напрежението върху мемристора M_2 . Кондензаторите C_1 и C_2 са с капацитет 1 nF. Амплитудно-честотните характеристики и съответните фазово-честотни характеристики на разглежданите аналогови филтри на базата на мемристори са представени на фиг. 3.4 а) и фиг. 3.4 б) Граничната честота е около 850 MHz, а съответната стойност $x = 0.32$, съответното съпротивлението на мемристора е около 9.34 k Ω . Правилната работа на предлагания модел на мемристор се установява чрез сравнение с няколко класически модела на мемристори, като тези на Joglekar, Biolek и Lehtonen-Laiho.

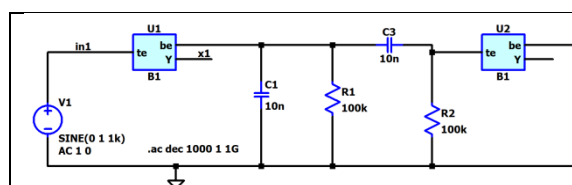


Поради използването на праг на активиране (ПА), разглежданият модифициран модел на мемристор е успешно приложен в програмируеми аналогови филтри, базирани на мемристори. Независимо от това, за високочестотни сигнали мемристорните модели Joglekar и Biolek могат да работят правилно в представените филтриращи вериги, а предлаганият модел на мемристор B15 има по-добро поведение, според линейността на филтриращите устройства, по-

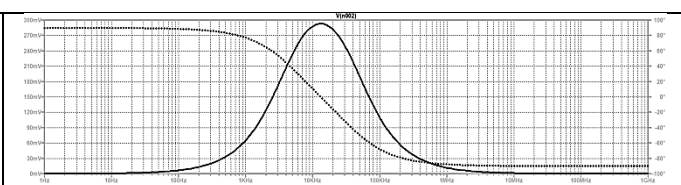
ради използването на прагове на чувствителност. Моделът на метал-оксиден мемристор, който се използва тук е означен с A4 и е подробно описан в т. 2.5. В този раздел първо се разглеждат нискочестотните и високочестотните филтри, базирани на мемристори. Техните схеми са представени на фиг. 3.5 а) и б). Те са базирани на техните традиционни аналози с резисторно-кондензаторни вериги.

3.3.2 Лентов мемристорен филтър [авторска публикация A4]

Анализиран е пасивен лентов филтър, базиран на каскадно свързване на описаните нискочестотни и високочестотни мемристорни филтри. Схемата на лентовия филтър е представена на Фиг. 3.6. Граничната честота на нискочестотния филтър, съдържащ мемристорния елемент U_1 и кондензатора C_1 , е по-висока от съответната гранична честота на високочестотния филтър, базиран на мемристора U_2 и кондензатора C_2 . Благодарение на частичното припокриване на лентите на пропускане на включените нискочестотен филтър и високочестотния филтър се получава честотната лента на пропускане на веригата. Амплитудно-честотните и фазово-честотните характеристики на базирания на мемристори лентов филтър за различни съпротивления са представени на фиг. 3.7. Съпротивлението на елементите U_1 и U_2 се настройва чрез външни импулси. Увеличаването на съпротивлението на мемристорите е свързано с намаляване на техните променливи на състоянието и съответните гранични честоти.



Фиг. 3.6 Схемата на лентов мемристорен филтър

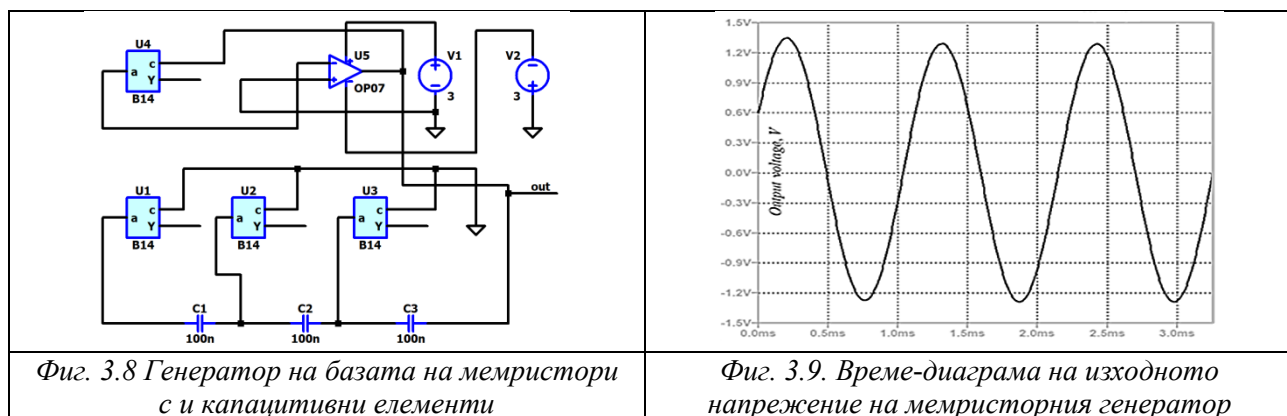


Фиг. 3.7 АЧХ и ФЧХ на разглеждания лентов филтър, базиран на мемристори

В разгледания тук лентов филтър, базиран на кондензатори и мемристори, се използва модифицираният модел S_4 , описан в 2.5. Високоомният резистор R_2 предотвратява проблеми със сходимостта.

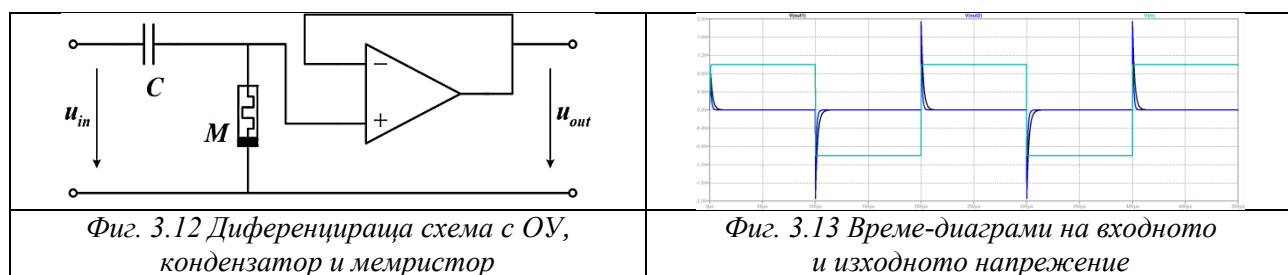
3.4. Генератор с дефазиращи вериги, базиран на мемристори [A5]

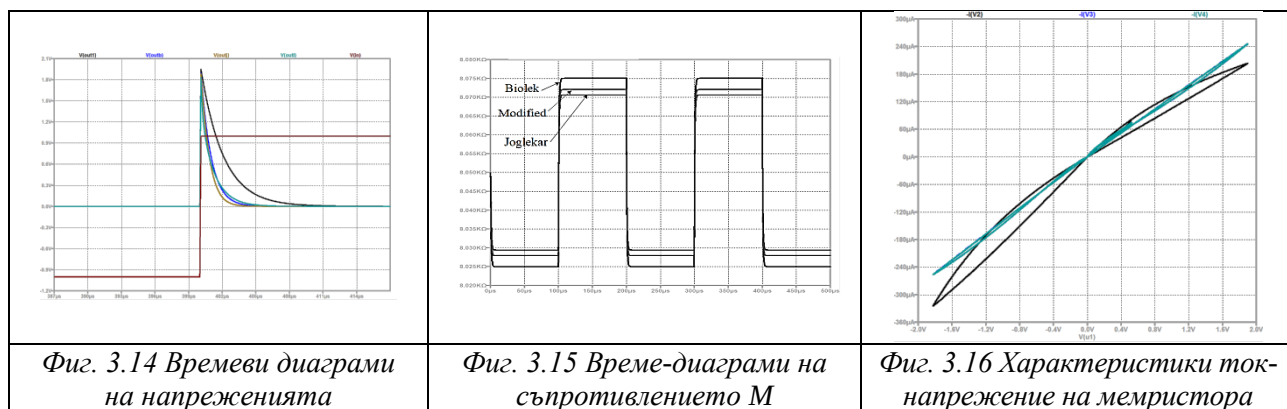
В параграфа се разглежда приложението на модифицирания метал-оксиден мемристорен модел S_5 , описан в 2.6. Дискутираният в този раздел генератор на базата на мемристори е представен на фиг. 3.8. Той е базиран на резисторно-кондензаторни вериги за фазово отместване, където резисторите са заменени с мемристори. Веригата съдържа операционен усилвател (ОУ), обозначен със символа U_1 . За захранването му се използват източниците на напрежение V_1 и V_2 . Кондензаторите са предварително заредени и първоначалното им напрежение е около 0.1 V. Капацитетите им са със стойност 100 nF. Включените мемристори се означават в схемата с $U_2 - U_5$. Крайният мемристор U_5 се използва за настройка на изходния сигнал, представен на фиг. 3.9. Генерираният изходен сигнал има синусоидална форма, а преходният процес е с продължителност около 2 ms. Честотата на изходния сигнал е около 1 kHz. Тя се настройва чрез промяната на съпротивленията на мемристорите U_2 , U_3 и U_4 .



3.5. Изследване на диференциращи вериги с мемристори [А₇]

Модифицираният титаново диоксиден мемристорен модел, използван при изследване на диференциращи вериги с мемристори, е представен в авторска публикация [А₇]. Диференциращите схеми са фрагменти от многокомпонентни електронни устройства. Техният изходен сигнал е пропорционален на производната по времето на приложеното входно напрежение. Използват се за получаване на къси биполярни импулси от правоъгълни импулси. Те съдържат резистори, кондензатори и операционни усилватели. Тяхното проектиране е предпоставка за приложение в CMOS интегрални схеми с много висока степен на интеграция. Направена е симулация на диференцираща верига с мемристор и кондензатор с буферен операционен усилвател (ОУ). За това изследване се използва модифициран и силно нелинеен мемристорен модел С₇. Прилагат се и няколко от най-добрите основни модели, направено е сравнение с класическа RC диференцираща верига. На фиг. 3.12 е показана диференцираща схема с мемристор, кондензатор и операционен усилвател. Време-диаграмите на входното и изходното напрежение са дадени на фиг. 3.13 за илюстрация на процеса на диференциране. И в двете електронни вериги кондензаторът има капацитет 2 μF . Резисторът, използван в класическата електронна верига, има съпротивление 3 $\text{k}\Omega$, което е близко до средната стойност на съпротивлението на мемристора. От време-диаграмите, представени на фиг. 3.13, става ясно, че изходните импулси, получени от предложената схема, са по-краткотрайни от тези, получени от нейния класически резистивен аналог. Подробна време-диаграма на входното и изходното напрежение на веригата, с използване на няколко мемристорни модела е представена на фиг. 3.14. Диаграмите на съпротивлението на мемристора са дадени на фиг. 3.15. Поведението на приложените модели е подобно и получените характеристики ток-напрежение са почти идентични.

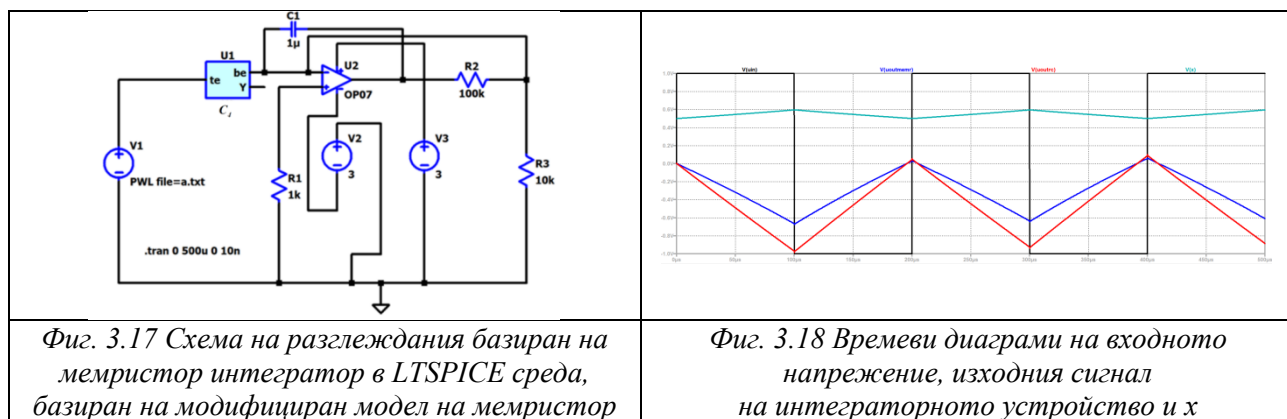




Характеристиките ток-напрежение на мемристора според приложените модели са представени на фиг. 3.16.

3.6. Изследване на интегриращи вериги с мемристори [A₄]

Интегриращите вериги са функционални модули на различни електронни устройства. Прилагат се за получаване на изходно напрежение, пропорционално на времевия интеграл на входния сигнал. Класическите и често използвани схеми на интегратори съдържат операционни усилватели, резистивни елементи и кондензатори. Схемата на интегратор с мемристор, кондензатор и с операционен усилвател е показана на фиг. 3.17 за по-нататъшни разяснения на нейното функциониране. Тази схема се получава чрез замяна на един от резисторите в класическия резисторно-кондензаторен интегратор с метал-оксиден мемристор. Резисторът R_2 се използва за частично разреждане на кондензатора по време на преходните процеси. Входните и изходните сигнали и променливата x са дадени на фиг. 3.18.



3.7. Изводи към глава 3

Въз основа на описания модел на мемристор, обозначен с C_3 , е анализиран режекторен филтър и е илюстрирано функционирането му, като се обръща внимание на основните преимущества, по отношение на неговата класическа резисторно-кондензаторна схема и стандартните мемристорни модели. Поради нано-мащабните размери на мемристора и по-ниската консумация на енергия, изследваните мемристорни устройства могат да бъдат реализирани в аналогови и цифрови интегрални схеми с много висока плътност.

ГЛАВА 4. ЕНЕРГО-НЕЗАВИСИМИ ПАМЕТИ И НЕВРОННИ МРЕЖИ С МЕМРИСТОРИ

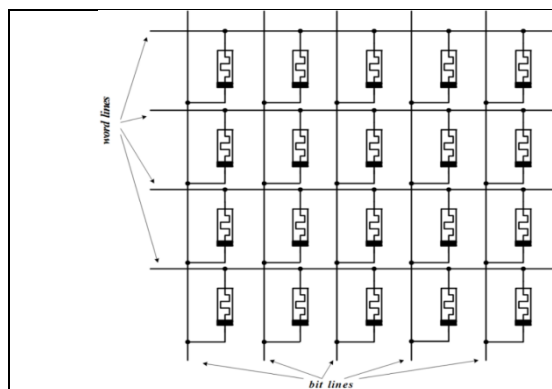
В главата се разглежда приложението на метал-оксидни мемристори в енерго-независими пасивни и хибридни памет и използването на мемристори за създаване на изкуствени невронни мрежи, като се набляга основно върху изграждането на синапсите.

4.1. Общи сведения

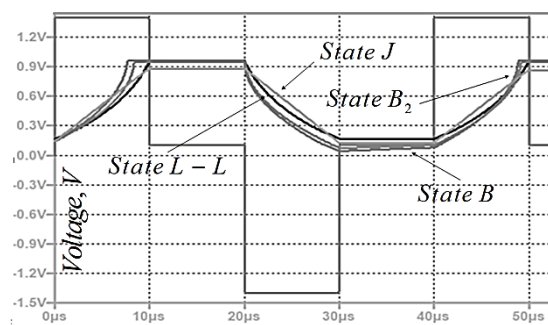
В схемите на паметите, мемристорите се използват за съхраняване на логическа информация в режим на твърдо превключване. В невронните мрежи мемристорите участват при съхраняването на синаптичните тегла. Използват се модифицираните мемристорни модели, както и някои от класическите модели за съпоставка на резултатите.

4.2. Изследване на схеми на пасивни памет с мемристори [A₆]

Модифицираният метал оксиден мемристорен модел C₆, подробно описан в параграф 2.7, е приложен тук при изследване на пасивни мемристорни матрици памет [A₆]. При изследванията се използват и някои от най-разпространените класически модели, като тези на Йоглекер, Биолек и Лехтонен-Лайхо, с цел съпоставка на резултатите. Фрагмент от разглежданата матрица памет, използваща мемристори, е представена на фиг. 4.1. Паразитното съпротивление на електродите се отразява с допълнително включени резистивни елементи. Селектирането на конкретен елемент от паметта позволява да се съхранява в него един бит информация – логическа единица или логическа нула. Минималното съпротивление на мемристора отговаря на записана логическа единица, а съответното му максимално съпротивление – на логическа нула.



Фиг. 4.1. Фрагмент от матрица памет, базирана на мемристори



Фиг. 4.2. Времеви диаграми на напрежението на мемристора и състоянието

Тъй като изчисленото съпротивление на проводниците между съседните мемристорни елементи е около 2 Ω, то може да се пренебрегне по отношение на съпротивлението на елементите на паметта. За процеса на четене от матрицата памет, трябва да се приложи положителен импулс на напрежение с ниво 0.1 V и продължителност 1 μs към съответния мемристорен елемент. Амплитудата на импулсите за четене е малко по-ниска от прага на чувствителност на мемристора, означаван с v_{thr} . Поради това, по време на процедурата на четене не се променя логическата информация, съхранявана в избрания мемристор и съответна-

та променлива на състоянието. За селектирането на определен елемент от паметта се използват демултиплексори. Подаваното напрежение към мемристора представлява последователност от правоъгълни импулси с продължителност 1 μs , с различни нива и полярности. Съответните променливи на състоянието, според мемристорните модели на Йоглекер, Биолек, Лехтонен-Лайхо и предложени модифициран модел са представени на фиг. 4.2. Моделите в този случай имат почти идентично поведение, но е очевидно, че модифицираният мемристорен модел осигурява по-бързото нарастване на променливата на състоянието и съответно води до по-добри свойства на превключване, което е преимущество спрямо другите модели. Променливата на състоянието на мемристора се променя в диапазона [0,15, 0,92], което съответства на режим на работа с твърдо превключване. Съответното съпротивление на мемристора се променя между 1.2 k Ω и 14.6 k Ω .

4.3. Изследване на хибридни памет, базирани на метал-оксидни мемристори [авторска публикация A₆]

Модифицираният модел, който се използва при изследването на пасивни мемристорни матрици – описан с уравнение (4.1) и разгледан подробно в параграф 2.7, тук е използван за анализ на хибридни мемристорни матрици памет с MOS транзистори. Описаният по-горе модел на мемристор, базиран на оксид на преходен метал е тестван и анализиран в матрица памет, в LTSPICE среда при импулсен режим. Приложените MOS транзистори са с N-канал, тип Si4866DY. Те се използват за осигуряване на процесите на разрешаване на четене, разрешаване на запис и изтриване на съхранените данни в съответните компоненти на паметта. Напрежението, приложено към гейта на MOS транзисторите, е последователност от импулси с ниво 1.3 V и продължителност 1 μs . То позволява процесите на четене, запис и изтриване в мемристорната матрица-памет. Когато сигналът на напрежението на гейта е нула, тогава съответният MOS транзистор работи в режим на прекъсване. Съответният мемристор е недостъпен и състоянието му не може да бъде променено. Получените волт-амперни характеристики и съответните характеристики състояние - поток на приложените модели на метал-оксидни мемристори са почти идентични, според диапазона на промяна на променливата на състоянието и съответното съпротивление. Допълнително проведените симулации потвърждават правилното функциониране на предложени модел, представляващ усукан хистерезисен цикъл на ВАХ. Разглежданият модифициран модел на мемристор може успешно да се приложи в различни сложни, базирани на мемристори електронни схеми, функциониращи както в режим на меко, така и в режим на твърдо превключване. Поради използването на праг на активиране (чувствителност), описаният модел на метал-оксиден мемристор позволява процеса на четене, при което съхранената в него информация не се променя.

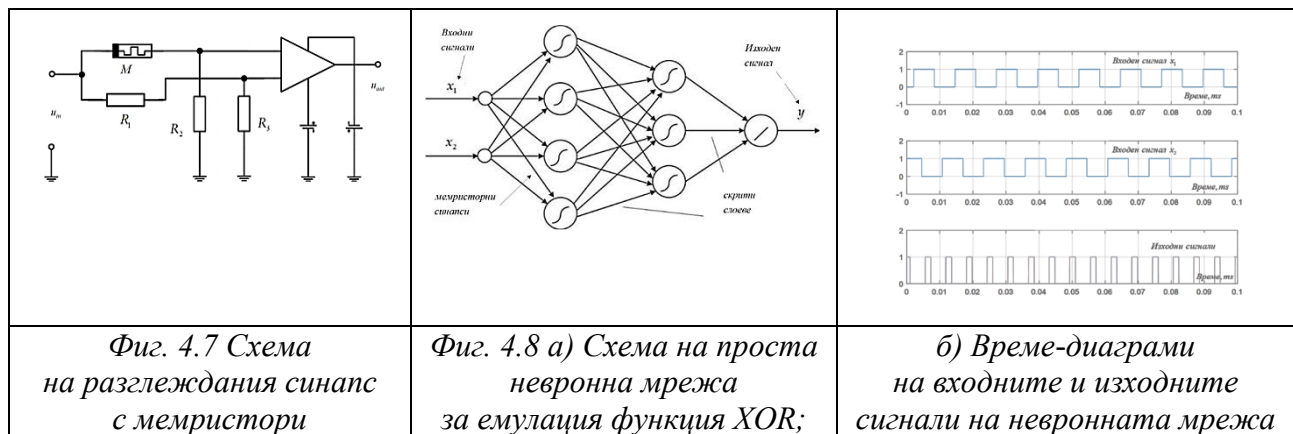
4.4. Невронни мрежи с метал-оксидни мемристори [A₁]

Модифицираният метал-оксиден мемристорен модел C₁, подробно описан в параграф 2.2, тук е приложен при изследване на невронни мрежи с мемристори. Схемата на предложената верига е представена на фиг. 4.7 за обяснение на

нейното функциониране. Тя се основава на един токов делител и операционен усилвател. Разглежданият токов делител съдържа два клона. Първият клон на схемата съдържа един мемристорен елемент M и един резистор – R_3 , а вторият клон включва два последователно свързани резистора – R_1 и R_2 . Клоновите токове се означават съответно с i_1 и i_2 . Сигналят на входното напрежение се обозначава с u_{in} . Напреженията на резисторите R_2 и R_3 са:

$$v_1 = \frac{v_{in}}{M + R_3} \cdot R_3 \quad (4.4)$$

$$v_2 = \frac{v_{in}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 \quad (4.5)$$



Изходното напрежение на мемристорния синапс е:

$$v_{out} = k_v \cdot (v_1 - v_2) = k_v \cdot v_{in} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{M + R_3} \right) \quad (4.6)$$

където k_v е коефициентът на предаване на операционния усилвател. Стойностите на резисторите са: $R_1 = 500 \, \Omega$, $R_2 = R_3 = 1.5 \, k\Omega$. Синаптичното тегло на разглежданата верига w зависи от съпротивлението M :

$$w(M) = \frac{v_{out}}{v_{in}} = k_v \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{M + R_3} \right) \quad (4.7)$$

Съпротивлението на мемристора M и съответното синаптично тегло w се променят чрез външни напрежителни импулси, чрез които се изменя и променливата на състоянието на мемристора x . След извършване на една проста трансформация на формула (4.5) и имайки предвид факта, че $R_2 = R_3$ се получава, че ако $R_1 = M$, тогава $w = 0$. Положителните синаптични тегла се получават, когато $M > R_1$. Ако $M < R_1$, тогава $w < 0$. Чрез промяната на коефициента на предаване на операционния усилвател се реализира мащабиране на синаптичните тегла. Описаното синаптично устройство се прилага успешно в една проста невронна мрежа, използвана за представяне на логическата функция XOR (exclusive OR – изключващо ИЛИ). Схемата на една проста невронна мрежа за емуляция на логическа функция XOR е представена на фиг. 4.8. Тя съдържа два скрити слоя. Първият скрит слой съдържа четири неврона, а вторият е изграден от три неврона. Невроните в скрития слой са със сигмоидална активационна функция, до-

като невронът в изходния слой е с линейна активационна функция. Синаптичните връзки между невроните са базирани на метал-оксидни мемристори и тяхната схема е представена на фиг. 4.7. Входните сигнали са с ниво единица и са предварително дискретизирани във времето. Принципът на действие на разглежданата невронна мрежа е следният. Теглата на синаптичните връзки се инициализират, най-често с нулеви стойности. При подаване на входните сигнали x_1 и x_2 , те преминават през елементите на невронната мрежа, на изхода на която се получава сигнал, пропорционален на нейния коефициент на предаване. Полученият изходен сигнал се сравнява с желания изходен сигнал, съответстващ на логическата функция изключващо ИЛИ. След сравняването на желания и на текущия изходен сигнал се образува сигналът на грешката, представляващ разликата на двата сигнала. Сигналът на грешката се подава към синаптичните връзки за тяхната настройка. След това постъпва следващата стойност на дискретизираните входни сигнали. Следва ново сравнение между желания и текущия изходен сигнал, образуване на сигнала на грешката, настройка на синаптичните тегла, и т.н. Създава се итерационен процес, който завършва при минимизиране на сигнала на грешката. Изкуствената невронна мрежа е обучена за 103 епохи, с използване на всички възможни комбинации на входните сигнали (0,0), (0,1), (1,0), (1,1), съответстващи на логически нива от нула и единица до достигане на глобален минимум на средноквадратичната грешка между желания и действителния изходен сигнал. Сигналът на грешката, получен по време на етапа на тестване на невронната мрежа след приключване на нейното обучение, е около десет хиляди пъти по-нисък от нивото на входните и изходните сигнали. Накрая може да се направи заключението, че представената невронна мрежа с базирани на мемристори синаптични връзки правилно емулира логическата функция XOR.

4.5. Изводи към Глава 4

Разгледано е приложението на метал-оксидни мемристори в енерго-независими пасивни и хибридни памети и използването на мемристори за създаване на изкуствени невронни мрежи. При паметите, основното преимущество на модифицираните мемристорни модели е подобряването на превключващите свойства и бързодействието. Предимство на предложената синаптична схема в невронната мрежа е способността ѝ да осигури положителни, нулеви и отрицателни синаптични тегла. Синаптичната верига има минимален брой мемристори, отговарящи на един синапс, което е друго предимство на веригата по отношение на някои съществуващи синаптични вериги. Той е успешно приложен и тестван в една невронна мрежа за представяне на логическата функция XOR в LTSPICE среда.

ГЛАВА 5. СЪПОСТАВКА НА ИЗПОЛЗВАНИТЕ МЕМРИСТОРНИ МОДЕЛИ

В главата е направена съпоставка на предложените модифицирани метал-оксидни мемристорни модели. Основните критерии, по които се сравняват моделите, са: работни честоти, сложност, точност, прагове на активиране, отразяване на граничните ефекти, превключващи свойства. При съпоставката са разгледани и някои от класическите мемристорни модели – тези на Струков-Уилямс, Йоглекер, Биолек и Лехтонен-Лайхо. Модифицираните модели са базирани на описаните стандартни мемристорни модели. При модифицираните модели, основната цел е те да бъдат опростени и приложими при анализ на сложни електронни устройства с голям брой мемристори в среда на LTSPICE.

5.1. Общи сведения

Сравняването на предложените модифицирани мемристорни модели се извършва както по техните основни характеристики и поведение в електронни схеми, така и по определени критерии за съпоставка. В публикациите по и тяхното моделиране мемристори са представени различни критерии за сравнение. Използваните модели имат свои специфични особености, които са в съответствие с техните приложения и режими $[A_1] - [A_6]$. При прилагане в реконфигурируеми устройства, мемристорите работят в при меко превключване, затова моделите не е наложително да отразяват напълно граничните ефекти. При приложение в невронни мрежи и памети, мемристорите работят при твърдо превключване, поради което моделите трябва да отразяват адекватно граничните ефекти.

5.2. Критерии за сравнение на мемристорните модели

В научната литература съществуват редица критерии за сравняване на мемристорни модели. В дисертацията на проф. В. Младенов са обобщени всички известни към момента критерии за сравнение на мемристорни модели, така че да бъде извършено цялостно сравнение и изразяване на техните преимущества и особености. Критериите, използвани тук, са:

Работна честота – определя максималната честота на сигнала, при която мемристорният модел функционира коректно, изразявайки превключващите и запамятаващи свойства. Ниска честота се приема между 0,5 Hz и 1 kHz, средна – в диапазона 1 kHz – 100 kHz, а висока – над 100 kHz.

Сложност – мярка за броя на елементарните математически операции в съответния модел, определяща и времето за симулация.

Точност – определя се от способността на модела да изразява адекватно и реалистично характеристиката напрежение-ток, с минимална грешка. Ако грешката е до 4%, точността е висока, за грешка между 4% и 6% тя е приемлива, за при грешка по-висока от 6%, точността е ниска.

Праг на активиране – представлява специфично ниво на сигнала, определящ качествената промяна на поведението на мемристора. Ако напрежението е по-ниско от прага на активиране на мемристора, тогава неговото съпротивление не се променя и той функционира като линеен резистор. При напрежение,

по-високо от прага на активиране, съпротивлението е пропорционално на интеграла на напрежението.

Отразяване на граничните ефекти – свързани са с функционирането на мемристора при режим на твърдо превключване и съответните физически ограничения, по отношение на крайните размери на мемристора.

Превключващи свойства – при функциониране в режим на твърдо превключване е от значение способността на мемристорния модел да реагира бързо на подадени външни импулси. Колкото по-бързо става изменението на съпротивлението, толкова моделът има по-добри комутационни свойства.

5.3. Съпоставка на модифицираните метал-оксидни мемристорни модели

В следващите точки са описани основните свойства, предимства и недостатъци на разглежданите класически и модифицирани модели, като в края на параграфа те са обобщени в таблица 1.

5.3.1. Модифициран титаново диоксиден мемристорен модел, базиран на модела на Лехтонен-Лайхо и експоненциална прозоречна функция (модел C_1) [A_1]

Този модел е модификация на модела на Лехтонен-Лайхо, с подобрена прозоречна функция, базирана върху комбинация от експоненциални функции. *Приложимост* – невронни мрежи, памети, аналогови устройства; *Честота на сигналите* – средни и високи; *Сложност* – средна; *Точност* – висока; *Използване на прагове на активиране* – не; *Отразяване на граничните ефекти* – частично; *Отразяване на превключващите ефекти* – да; *Преимущества*: 1. Сравнително малка сложност на описващите уравнения; 2. Подходящ при различни нива на сигналите и честотите; 3. Нелинейност на йонното отместване – висока; *Приложимост* – невронни мрежи, памети; *Недостатъци*: 1. Не отразява напълно граничните ефекти; 2. Няма прагове на активиране.

5.3.2. Модифициран метал-оксиден мемристорен модел, базиран на модела на Уилямс, Лехтонен-Лайхо и прозоречната функция на Йоглекер (модел C_2) [A_2]

Представлява модификация на моделите на Лехтонен-Лайхо и Уилямс за танталово-оксидни мемристори. Използва се прозоречната функция на Йоглекер. *Приложимост* – реконфигурируеми електронни устройства; *Честота на сигналите* – средни и високи; *Сложност* – ниска; *Точност* – висока; *прагове на активиране* – да; *Отразяване на граничните ефекти* – частично; *Отразяване на превключващите ефекти* – да; *Преимущества*: 1. Сравнително ниска сложност на уравненията; 2. Подходящ при различни нива на сигналите и честотите; 3. Нелинейност на йонното отместване – висока; *Недостатъци*: отразява частично граничните ефекти.

5.3.3. Модифициран метал-оксиден мемристорен модел, базиран на модела на Струков-Уилямс, Лехтонен-Лайхо и прозоречна функция на Биолек (модел C_3) [A_3]

Базиран е на моделите на Лехтонен-Лайхо и Биолек. Използва модифицирана прозоречна функция на Биолек, диференцируема функция, аналог на функцията на Хевисайд. *Материали* - титанов диоксид, хафниев диоксид; *Приложимост* – реконфигурируеми електронни устройства; *Честота на сигналите* – средни и високи; *Сложност* – ниска; *Точност* – висока; *прагове на активиране* – да; *Отразяване на граничните ефекти* – да; *Отразяване на превключващите ефекти* – да; *Преимущества*: 1. ниска сложност; 2. Подходящ при различни нива на сигналите и честотите; 3. *Нелинейност на йонното отместване* – висока; *Недостатъци*: 1. по-висока сложност, по отношение на моделите на Йоглекер и Уилямс.

5.3.4. Модифициран метал-оксиден мемристорен модел, базиран на модела на Уилямс и прозоречна функция на Биолек с допълнителен синусоидален компонент (модел C_4) [A_4]

Представлява модификация на моделите на Струков и Биолек. използва модифицирана прозоречна функция на Биолек, със засилена нелинейност на йонното отместване и допълнителен синусоидален компонент. *Материали* – титанов диоксид, хафниев диоксид, танталов оксид. *Приложимост* – реконфигурируеми електронни схеми и устройства. *Честота на сигналите* – ниски и средни; *Сложност* – средна; *Точност* – висока; *Използване на прагове на активиране* – да; *Отразяване на граничните ефекти* – да; *Отразяване на превключващите ефекти* – да; *Преимущества*: 1. невисока сложност на уравненията; 2. *Нелинейност на йонното отместване* – висока; *Недостатъци*: Сравнително по-висока сложност, по отношение на моделите на Йоглекер и Уилямс; работа при ниски и средни честоти.

5.3.5. Модифициран метал-оксиден мемристорен модел, базиран на модела на Лехтонен-Лайхо и прозоречна функция на Биолек (C_5) [A_5]

Представлява опростена модификация на модела на Лехтонен-Лайхо. Използва модифицирана прозоречна функция на Биолек.

Материали – титанов оксид, хафниев оксид. *Приложимост* — генератори, филтри; *Честота на сигналите* – високи; *Сложност* – ниска; *Точност* – висока; *прагове на активиране* – да; *Отразяване на граничните ефекти* – да; *Отразяване на превключващите ефекти* – да; *Преимущества*: 1. ниска сложност на уравненията; 2. Подходящ при различни нива на сигналите и честотите – ниски, средни и високи; 3. *Нелинейност на йонното отместване* – висока; *Недостатъци*: 1. Сравнително по-висока сложност, по отношение на моделите на Йоглекер и Уилямс.

5.3.6. Модифициран метал-оксиден мемристорен модел, базиран на модела на Струков-Уилямс и прозоречна функция на Биолек с допълнителен параболичен компонент (модел C_6) [A_6]

Представлява модификация на модела на Биолек и използва модифицирана прозоречна функция с допълнителен параболичен компонент. *Материали*

– титанов диоксид, хафниев диоксид; *Приложимост* – памети, невронни мрежи; *Честота на сигналите* – средни и високи; *Сложност* – средна; *Точност* – висока; *Използване на прагове на активиране* – да; *Отразяване на граничните ефекти* – да; *Отразяване на превключващите ефекти* – да; *Преимущества*: 1. подходящ при различни нива на сигналите и честотите; 3. *Нелинейност на йонното отместване* – висока; *Недостатъци*: 1. Сравнително по-висока сложност, по отношение на класическите модели на Йоглекер и Уилямс.

5.3.7. Мемристорен модел на Струков-Уилямс [11]

Използва опростена ВАХ и параболична прозоречна функция. *Материали* – титанов диоксид; *Приложимост* – филтри, генератори; *Честота на сигналите* – ниски и средни; *Сложност* – ниска, *Точност* – ниска, *прагове на активиране* – не; *Отразяване на граничните ефекти* – не; *Отразяване на превключващите ефекти* – частично; *Преимущества*: 1. *Ниска сложност*; 2. Подходящ при ниски и средни честоти; 3. *Нелинейност на йонното отместване* – ниска; *Недостатъци*: *Ниска точност*; непълно отразяване на граничните ефекти.

5.3.8 Мемристорен модел на Йоглекер [16]

Включва полиномна прозоречна функция. *Материали* – титанов диоксид; *Приложимост* – филтри, генератори, диференциращи и интегриращи вериги; *Честота на сигналите* – ниски и средни; *Сложност* – ниска; *Точност* – ниска; *Използване на прагове на активиране* – не; *Отразяване на граничните ефекти* – частично; *Отразяване на превключващите ефекти* – частично; *Преимущества*: 1. *Ниска сложност* на; Подходящ при средни и ниски честоти; 3. *Нелинейност* – средна; *Недостатъци*: Непълно отразяване на граничните ефекти; *Ниска точност*.

5.3.9 Мемристорен модел на Биолек [17]

Включва усъвършенствана прозоречна функция. *Материали* – титанов диоксид, хафниев диоксид; *Приложимост* – реконфигурируеми електронни схеми. *Честота на сигналите* – ниски и средни. *Сложност* – сравнително ниска; *Точност* – средна; *Използване на прагове на активиране* – не; *Отразяване на граничните ефекти* – да; *Отразяване на превключващите ефекти* – да; *Преимущества*: 1. Сравнително *ниска сложност* на описващите уравнения; 2. *Адекватно поведение* при режим на твърдо превключване; *Недостатъци*: Сравнително по-висока сложност, по отношение на модела на Йоглекер; По *ниска точност*, спрямо модела на Лехтонен-Лайхо.

5.3.10 Мемристорен модел на Лехтонен-Лайхо [51]

В неговата ВАХ участва компонент, отразяващ изправителен ефект. *Материали* – TiO_2 , HfO_2 , TaO . *Приложимост* – памети, невронни мрежи, филтри. *Честота на сигналите* – високи; *Сложност* – висока; *Точност* – висока; *прагове на активиране* – не; *Отразяване на граничните ефекти* – да; *Отразяване на превключващите ефекти* – да; *Преимущества*: 1. *Висока точност*; 2. Подходящ при различни честоти; 3. *Нелинейност* – висока; *Недостатъци*: висока сложност. В табл. 1 е дадена съпоставка на моделите.

Табл. 1 Съпоставка на мемристорните модели по определени критерии за сравнение

No	Материал	Модел	Приложение	Литература	Работни честоти	Сложност	Точност	Праг на активиране	Отразяване на граничните ефекти	Превключващи свойства
1	HfO ₂ , TiO ₂	C ₁	Невронни мрежи	[A1, 121]	високи	средна	висока	не	частично	Да
2	HfO ₂ , TiO ₂ , Ta ₂ O ₅	C ₂	Реконфигурируеми филтри	[A2, 122]	високи	ниска	висока	да	частично	Да
3	TiO ₂ , Ta ₂ O ₅	C ₃	Реконфигурируеми филтри	[A3, 123]	високи	средна	висока	да	Да	Да
4	HfO ₂ , TiO ₂ , Ta ₂ O ₅	C ₄	Интегриращи и диференциращи вериги, реконфигурируеми филтри	[A4, 124]	средни	средна	висока	да	Да	Да
5	HfO ₂ , TiO ₂	C ₅	Генератори, реконфигурируеми филтри	[A5, 125]	високи	ниска	висока	да	Да	Да
6	HfO ₂ , TiO ₂	C ₆	Енерго-независими мемристорни памети	[A6, 126]	високи	средна	висока	да	Да	Да
7	TiO ₂	Струков-Уилямс	Аналогови реконфигурируеми устройства	[11]	ниски и средни	ниска	ниска	не	частично	частично
8	TiO ₂	Йоглекер	Аналогови реконфигурируеми устройства	[16]	ниски и средни	ниска	ниска	не	частично	Частично
9	TiO ₂	Биолек	Памети, невронни мрежи	[17]	ниски и средни	средна	средна	не	Да	Да
10	TiO ₂ , HfO ₂	Лехтонен-Лайхо	Памети, невронни мрежи	[51]	ниски, средни и високи	средна	висока	не	Да	Да

5.4. Изводи към Глава 5

При изследването на различни типове мемристори и техните приложения в електронни устройства, се налага използване на подходящи модели, с цел проектиране с помощта на PSPICE, LTSPICE и др. От една страна, моделите трябва да са с висока точност. От друга страна, те трябва да имат минимален брой математически операции. Тези два аспекта са противоречиви и трудно изпълними. Във връзка с това, предложените модели представляват компромисно решение – с опростени описващи уравнения, и в същото време с по-малка, но достатъчно висока точност и адекватно поведение при режими на меко и твърдо превключване.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Предложени са шест модифицирани, опростени и подобрени модели на метал-оксидни мемристори, базирани върху класическите модели на Биолек, Йоглекер и Лехтонен-Лайхо – изведени са техните аналитични изрази, модели, изследвани са техните основни характеристики ток-напрежение и състояние-поток, потвърдено е тяхното адекватно функциониране в електрическо поле (научно-приложен принос).
2. Генерирани са LTSPICE мемристорни модели, като техните кодове и подробно описание са налични на адрес: <https://github.com/mladenovvaleri/Advanced-Memristor-Modeling-in-LTSpice>. (приложен принос)

3. Създадените модифицирани мемристорни модели и техните библиотечни LTSPICE модели са успешно приложени в аналогови реконфигурируеми мемристорни устройства и схеми – нискочестотни, височестотни, лентови и режекторни филтри, интегриращи и диференциращи вериги, генератори с дефазиращи вериги. Настройката на параметрите и характеристиките на разгледаните аналогови устройства е реализирано чрез външни напрежителни импулси. (научно-приложен принос)
4. LTSPICE модифицираните модели на метал-оксидни мемристори са използвани за създаване и изследване на пасивни и хибридни енерго-независими памети и невронни мрежи с мемристорно-базирани синапсиси. При функционирането в памети, те са в режим на твърдо превключване, като проявяват по-добри превключващи свойства по отношение на моделите на Йоглекер и Биолек, свързани с бързото изменение на съпротивлението, както и по-високо бързодействие по отношение на модела на Лехтонен-Лайхо. (научно-приложен принос)
5. Направена е съпоставка на предложените мемристорни модели, използвайки редица критерии за сравнение – превключващи свойства, точност, използване на прагове на активиране, работни честоти, сложност на модела. По отношение на моделите на Уилямс, Йоглекер, Биолек и Лехтонен-Лайхо, предложените модели имат както примущества, така и някои недостатъци спрямо различните модели, които може да се приемат за несъществени, тъй като показателите са много близки по стойност, а моделите са с повишено бързодействие, достатъчно висока точност, използване на прагове на активиране, засилена нелинейност, възможност за коректно отразяване на граничните ефекти при режим на твърдо превключване, високи работни честоти. (научно-приложен принос)

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- [A1] Kirilov, S., **I. Zaykov**., "A Neural Network with HfO₂ Memristors.", Proceedings of the Technical University of Sofia, ISSN: 1311-0829, Vol. 71, No. 1, Year 2021, <https://doi.org/10.47978/TUS.2021.71.01.006>, pp. 30-33.
- [A2] **Zaykov, I.**, "A modified metal-oxide memristor model for reconfigurable filters", Proceedings of Technical University of Sofia, ISSN: 2738-8549, VOL. 72, NO. 2, <https://doi.org/10.47978/TUS.2022.72.02.005>, pp. 27 – 31.
- [A3] Mladenov, V., Kirilov, S., **Zaykov, I.**, "A General Model for Metal Oxide-Based Memristors and Application in Filters", presented in the International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST) on Electronics and Communications 2022, Bremen, Germany, 8 – 10 June 2022, pending for publishing in IEEE Xplore Proceedings.
- [A4] V. M. Mladenov, **I. D. Zaykov** and S. M. Kirilov, "Application of a Nonlinear Drift Memristor Model in Analogue Reconfigurable Devices," 2022, IEEE 26th International Conference Electronics, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEEECONF55059.2022.9810389.
- [A5] Kirilov, S., **I. Zaykov**, "A metal oxide memristor-based oscillators and filters", Proceedings of Technical University of Sofia, ISSN: 2738-8549, VOL. 72, NO. 2, <https://doi.org/10.47978/TUS.2022.72.02.006>, pp. 32 – 37.
- [A6] V. M. Mladenov, **I. D. Zaykov** and S. M. Kirilov, "A Nonlinear Titanium Dioxide Memristor Model for Memory Crossbars Analysis," 2022, IEEE 26th International Conference Electronics, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEEECONF55059.2022.9810434.
- [A7] Kirilov, S. and **Zaykov, I.** (2020), "Analysis of memristor-based differentiating circuit", COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Volume 39 No. 3, pp. 683 - 690. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-10-2019-0389>.

SUMMARY

ANALYSIS OF ELECTRONIC CIRCUITS WITH METAL-OXIDE MEMRISTORS

Ivan Dimitrov Zaykov

After the literature review, several main conclusions can be drawn *to Chapter 1*. The memristor is a relatively new nonlinear one-port element with the unique property of memorizing the amount of charge that has passed through it and its resistance when external sources are switched off. It has switching properties i.e. under external impulses, its resistance can change between two limiting values - minimum and maximum. There are several main types of memristors made of different materials - polymeric, ferroelectric, spin-based and some other types, with metal-oxide memristors based on hafnium oxide, tantalum oxide, niobium oxide, etc. being very common in recent years. Metal-oxide memristors occupy a key place, due to their stable characteristics and good switching and memory properties, as well as good compatibility with the technology of modern integrated chips with an ultra-high density.

In *Chapter 2*, a detailed description of analytical expressions, analysis under different signals and operating modes of the proposed modified models of metal-oxide memristors is made. The proposed memristor models have a number of advantages over their classic counterparts – simplified structure, satisfactory accuracy, activation thresholds used, smooth step-like function, analogue of the standard Heaviside function. The correct functioning of the modified memristor models has been confirmed, according to the main properties and characteristic features of metal-oxide memristors.

Chapter 3 examines the application of the modified memristor models in analog reconfigurable devices - low-frequency, high-frequency, band-pass and band-stop filters, generators with phase-shifting, differentiating and integrating circuits. In these devices, the memristors function in soft switching mode or as linear resistors. Their characteristics are adjusted by external voltage pulses.

Chapter 4 describes the application of the considered modified memristor models in memristor neural networks and non-volatile memories. In memories, memristors function in hard switching mode when writing logical information, and when reading – as linear resistors. In neural networks, memristors are mainly used in the synaptic connections between neurons and store the synaptic weights.

In *Chapter 5*, a comparison of the used modified and classical memristor models is made, according to several main criteria, such as the operating frequency, the switching effects, the complexity of the analytical expressions, the accuracy, the involvement of activation thresholds, etc. After the comparison, it can be concluded that the modified memristor models, based mainly on the models of Williams, Jogleker, Biolek and Lehtonen-Laiho, have the possibility of application in complex electronic circuits with a large number of memristors, good accuracy, participation of activation thresholds, allowing operation in different operating modes. In some indicators, modified memristor models are significantly improved compared to classical models, in others they are inferior to them, but they are very close to them, so the most suitable models can be selected for different applications. The developed LTSPICE library memristor models are included in a unified library and can be used for preliminary analysis and design of memristor devices as well as easily adapted for application in similar SPICE products.