



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

Факултет АВТОМАТИКА

Катедра „ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА”

Проф. д-р Валери Марков Младенов

**УСЪВЪРШЕНСТВАНО МОДЕЛИРАНЕ
НА МЕМРИСТОРИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд за присъждане на научната степен
„ДОКТОР НА НАУКИТЕ”

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Теоретична електротехника

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Елисавета Димитрова Гаджева
2. проф. д-тн инж. Галина Петкова Чернева
3. проф. д-тн инж. Румена Димитрова Станчева

София, 2019 г.

Дисертационният труд е обсъден на заседание на разширен катедрен съвет на катедра „Теоретична електротехника” от Факултет Автоматика на Технически университет – София, на 10-ти юни 2019 г.

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на 01.10.2019 г. от 15.00 ч. часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед ОЖ-5.2-73/14.06.2019 на Ректора на Технически университет – София в състав:

1. чл.-кор. проф. дтн инж. Георги Славчев Михов – председател
2. чл.-кор. проф. дтн инж. Петко Христов Петков – научен секретар
3. проф. д-р инж. Елисавета Димитрова Гаджева – член
4. проф. дтн инж. Галина Петкова Чернева – член
5. проф. дтн инж. Румена Димитрова Станчева – член
6. проф. дтн инж. Тихомир Борисов Таков – член
7. проф. д-р инж. Коста Петров Бошнаков – член

Материалите по защитата се намират в Деканата на Факултета по Автоматика, стая 2350 на Технически университет – София.

Дисертантът е редовен професор в катедра „Теоретична електротехника” на Факултета по Автоматика при Технически университет – София.

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Елисавета Димитрова Гаджева
2. проф. дтн инж. Галина Петкова Чернева
3. проф. дтн инж. Румена Димитрова Станчева

Автор: проф. д-р инж. Валери Марков Младенов

Заглавие: **Усъвършенствано моделиране на мемристори**

Тираж: 30 бр.

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

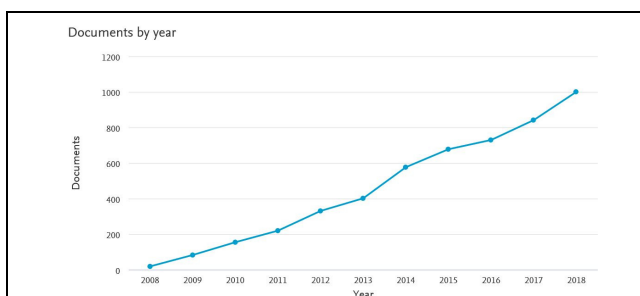
I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

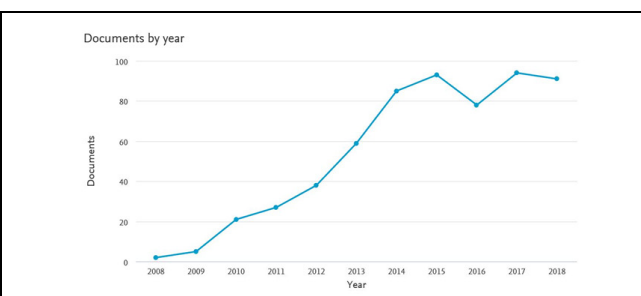
След теоретичното предсказване от Leon Chua през 1971 г. на съществуването на четвърти основен двуполусен елемент – *мемристор* (съкратено от *memory + resistor*), наред с резистора, бобината и кондензатора, и след създаване на първия прототип на мемристор от Williams през 2008 г., непрекъснато нараства интересът към мемристорите, мемристорните вериги и моделирането на мемристори. Мемристорът има изключително важното и полезно свойство да запамятава своето съпротивление и съхранения в него заряд, което определя неговите потенциални приложения в енерго-независими интегрални памети, невронни мрежи, аналогови и цифрови програмируеми схеми и в множество други важни области на електрониката.

Моделирането на мемристори е от особена важност с оглед провеждане на прецизни предварителни анализи и симулации на мемристорни схеми и устройства. Във връзка с изследването на мемристори, базирани на различни материали (оксидни, полимерни, фероелектрически и др.), в литературата съществуват множество мемристорни модели. Всеки модел съдържа най-малко две основни уравнения: първото описва зависимостта между тока и напрежението, а второто изразява връзката между производната на променливата на състоянието на мемристора спрямо времето и тока. Основните класически модели (на Williams и Strukov, Joglekar, Biolek, Ascoli-Corinto, Lehtonen-Laiho) използват прозоречна функция в уравнението на състоянието за отразяване на нелинейното йонно отместване и граничните ефекти.

За актуалността на проблемите, свързани с мемристорите и моделирането на мемристори, мемристорни вериги и устройства, свидетелства и *бързото нарастване на броя на научните публикации в основните световни бази данни* – Scopus, Web of Science, IEEE Xplore. За пример, на Фиг. 1 е дадено разпределението по години на статиите в базата данни Scopus, намерени при използване на ключовата дума „memristor” за периода 2008 – 2018 г. На Фиг. 2 е показано графично разпределението на статиите в базата данни Scopus, намерени при използване на ключовата дума „memristor modeling” за 2008-2018 г.



Фиг. 1. Брой публикации, индексирани в пълнотекстовата база от данни Scopus, намерени при използване на ключовата дума „memristor” за периода 2008 – 2018 г.



Фиг. 2. Брой публикации, индексирани в пълнотекстовата база от данни Scopus, намерени при използване на ключовата дума „memristor modeling” за периода 2008–2018 г.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на настоящите изследвания е разработване и прилагане на нова усъвършенствана методология за моделиране на титаново-диоксидни и хафниево-диоксидни мемристори с използване на прозоречни функции, при която се отчитат по-реалистично протичащите физически процеси в моделираните мемристори, и изследване на различни ефекти (основно изменението на концентрацията на кислородните ваканции в обема на мемристора), свързани с влиянието на температурата и дифузията върху физическите процеси в мемристора, и на паразитните индуктивности и капацитети в мемристорните матрици.

Задачите, свързани с реализирането на целта на дисертацията, могат да бъдат обобщени, както следва:

1. Разработване на методология за по-реалистично моделиране на физическите явления в мемристорите чрез използване на модифицирани прозоречни функции и настройка на техните параметри;
2. Приложение на предложената методология за моделиране на титаново-диоксидни и хафниево-диоксидни мемристори и за разработване на нови подобрени модели на разглежданите мемристори;
3. Разработване на PSpice библиотечни модели на титаново-диоксидни и хафниево-диоксидни мемристори;
4. Приложение на разработените модели при изследване на мемристорни аналогови и цифрови схеми, вериги и устройства;
5. Съпоставка и сравнение на предложените мемристорни модели;
6. Изследване на различни ефекти, свързани с *влиянието на температурата и дифузията* върху протичащите физически процеси в мемристора (изменение на съпротивлението, промяна на концентрацията на кислородните ваканции в обема на елемента) и на паразитните индуктивности и капацитети в мемристорни матрици и интегрални схеми с ултраголяма степен на интеграция (ULSI).

При провеждането на анализите в дисертацията са използвани **методите** на *математическото моделиране, аналитични изследвания и симулации* в програмните среди PSpice и MATLAB.

Научна новост

Недостатък на основните модели на титаново-диоксидните и хафниево-диоксидните мемристори е невъзможността им да отразяват реалистично процесите на превключване в мемристора при напрежения с ниво, по-високо от 1 V и при високи честоти (над 100 MHz). Моделът на Pickett е силно нелинеен мемристорен модел. Той се основава на физични измервания и върху механизма на протичане на ток през тунелна бариера. Той отразява най-реалистично процесите в мемристора. Много често той се използва като еталонен мемристорен модел за настройка на други мемристорни модели. Неговият основен не-

достатък е изключително голямата му сложност и непригодността му за извършване на симулации поради възникване на множество изчислителни проблеми, свързани със сходимостта на итерационните процедури. Нелинейният модел на Lehtonen-Laiho е един от често използваните модели. Той има задоволителна точност и сходимостта на изчислителните процеси при него е по-добра от тази при модела на Пикет. Един общ недостатък на описаните по-горе модели, забелязан в научната литература, е фиксираната стойност на целочисления степенен показател в използваните прозоречни функции. Този степенен показател отразява нелинейността на йонното отместване на зарядите и колкото неговата стойност нараства, толкова повече нелинейността на йонното отместване намалява. *Нелинейността на йонното отместване обаче зависи от приложеното към мемристора напрежение. При по-високи нива на напрежението нелинейността на йонното отместване се увеличава.*

*Това е основната причина за предлаганите в дисертацията модификации на базовите титаново-диоксидни и хафниево-диоксидни мемристорни модели чрез въвеждане на хиперболично-подобна дробно-линейна зависимост между степенния показател в използваната прозоречна функция и напрежението. За засилване на нелинейността на модела на Biolek, се предлага и добавяне на претеглена синусоидална компонента към използваната прозоречна функция. След проведените множество анализи са установени **възможностите на модифицираните модели на титаново-диоксидни и хафниево-диоксидните мемристори за функциониране при високи нива на сигналите, и при високи честоти, реалистичното поведение в електрическо поле и подобряване на представянето на вебер-кулоновата характеристика на мемристора при режим на меко превключване.***

Във връзка с проведените анализи са създадени нови библиотечни PSpice мемристорни модели, чието поведение е сравнено при функциониране в различни вериги – аналогови вериги (последователни и паралелни вериги, генератори, интегриращи устройства и др.) и цифрови мемристорни вериги (памети и невронни мрежи). След направен анализ в дисертацията е установено, че в експлоатационния температурен и честотен диапазон на електронната апаратура влиянието на температурата, дифузията и паразитните параметри на титаново-диоксидните мемристори (собствени и взаимни капацитети и индуктивности) върху нормалното функциониране на мемристорните матрици и интегрални схеми е пренебрежимо слабо и тези допълнителни фактори могат да не бъдат разглеждани при моделирането на мемристори и мемристорни матрици.

Практическа приложимост

При разработването на дисертацията са създадени PSpice библиотечни модели на предложените титаново-диоксидни и хафниево-диоксидни мемристорни модели, както и на най-добрите класически модели. Те са изследвани в среда на PSpice при режими на меко и твърдо превключване. Потвърдена е тяхната работоспособност при синусоидален и импулсен режим. Разработените библи-

отечни модели са използвани при изследване на мемристорни аналогови и цифрови устройства (интегриращи устройства, генератори, невронни мрежи, памети), при което са установени техните основни преимущества по отношение на класическите мемристорни модели – получаване на еднозначна характеристика състояние-поток при състояние на меко превключване, отразяване на граничните ефекти по отношение на класическите мемристорни модели $K1$, $K2$ и $K5$, работа при високи напрежения и честоти на мемристорните модели $A1$, $A2$, $A4$, $A5$, $A6$, $A7$, $A8$, по отношение на класическите мемристорни модели $K1$, $K2$, $K3$, $K5$, $K6$, $K7$.

Апробация

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

Одобряване на работата

Дисертационната работа е докладвана пред катедра “Теоретична електротехника”, Факултет Автоматика, ТУ -София и пред ФС на ФА.

Публикации

Резултатите от дисертацията са публикувани в 21 статии – 3 от тях са в списания с импакт-фактор, 4 от тях са в научни списания и 14 са публикувани в сборници от международни конференции. 8 от публикациите са реферирани в Scopus.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 300 страници, като включва увод, 8 глави, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 240 литературни източници на латиница. Работата включва общо 125 фигури и 14 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

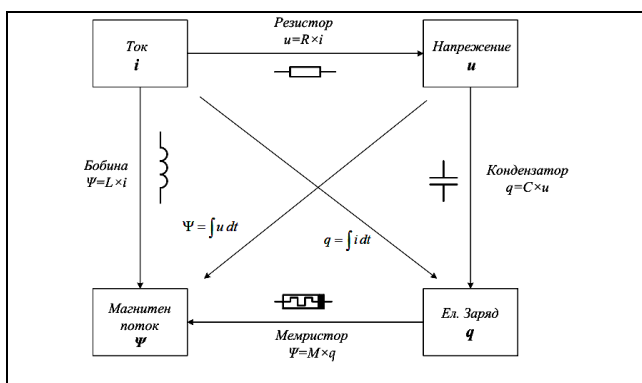
1.1. Общи сведения за мемристорите

Явлението на превключване на съпротивлението, наблюдавано в редица аморфни метални и преходни химични оксиди, като SiO_2 , Al_2O_3 , Ta_2O_5 , е изследвано от 1970 г. Установено е, че такива оксидни материали, поставени в метало-оксидно-метална конструкция, имат способността да променят съпротивлението си в съответствие с приложеното напрежение и да запазват своето състояние за продължителен интервал от време. Оксидите на металите от преходните периоди на периодичната система на химичните елементи, предварително подложени на процес на *електро-формиране*, имат способността да натрупват електрически заряди в своята структура, като тяхното количество е пропорционално на интеграла на тока, както и на приложеното напрежение спрямо времето. Процесът на електро-формиране се състои основно в прилагане на напрежение от порядъка на 5 V към оксидната структура с дебелина около 10 nm, при което се получава частично изпаряване на кислород от материала и в метало-оксидната структура се образуват *кислородни ваканции*. Подобно на дупките при полупроводниците, те имат положителен фиктивен заряд и се формират около анода. Слой, съдържащ тези кислородни ваканции, е с дебелина около 5 процента от цялата дебелина на оксидната структура. Такава структура с използване на титанов диоксид (TiO_2) е показана на Фиг. 1.2. След процеса на първоначално електро-формиране кислородните ваканции остават в слоя (легиран участък) непосредствено до анода, другият слой е от обикновен титанов диоксид. При нормални температурни условия коефициентът на *дифузия* на кислородните ваканции е с изключително малка стойност и практически описаното състояние на оксидната наноструктура може да се запази в продължение на период от няколко месеца до около две години. Наситеният с кислородни ваканции слой има специфично съпротивление около 100 пъти по-малко от съответното специфично съпротивление на другия слой, който се състои от чист метало-оксиден материал. В така формираната структура се създават два типа токоносители: от една страна, това са кислородните ваканции с *фиктивен положителен заряд*, а от друга страна съществува и *наличие на свободни електрони*, получени в резултат на топлинната генерация на заряди и преминаването им от валентната зона в зоната на проводимостта на оксидния материал. При прилагане на напрежение в положителна посока (към анода се подава положителен потенциал, а към катода – отрицателен потенциал) полученото електрическо поле отблъсква кислородните ваканции и привлича свободните електрони, при което границата между формираните два слоя на оксидната наноструктура започва да се движи към катода. Нейната дебелина се увеличава, при което дебелината на слоя от чист оксиден материал намалява. Като резултат съпротивлението на цялата структура намалява. Ако в определен момент се прекъсне източникът на напрежение, токът спира, при което спира и движението

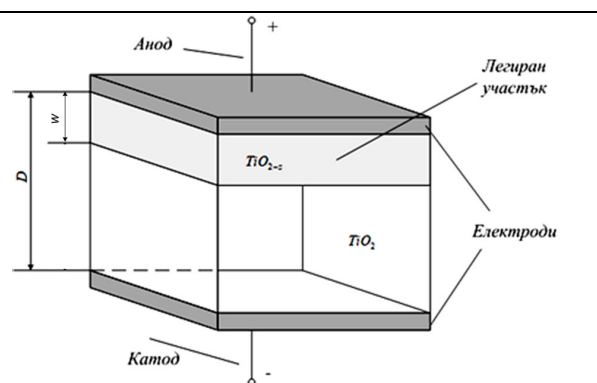
на границата между двата слоя на оксидната структура. При прилагане на напрежение в обратна посока границата между двата участъка започва да се придвижва към анода, при което дебелината на наситения с кислородни ваканции слой намалява, а дебелината на слоя от чист метален оксид нараства. Като резултат съпротивлението на цялата нано-структура нараства. Подобно необичайно поведение е предсказано за мемристорния елемент от Leon Chua през 1971 г. Мемристорният елемент е предложен в съответствие със съображенията за симетрия и отношенията между четирите основни електрически величини (ток, напрежение, електрически заряд и магнитен поток), свързани с двуполусни елементи. Предложеният четвърти фундаментален двуполусен елемент изразява връзката между потока, определен като времеви интеграл на напрежението върху елемента, и електрическият заряд, определен като времеви интеграл на тока през елемента. Отношенията между описаните електрически величини и фундаменталните двуполусни елементи са представени на Фиг. 1.1.

1.2. Основни видове мемристори

Съществуват няколко основни вида мемристори – *титаново-диоксидни, хафниево-диоксидни, полимерни, фероелектрически мемристори, базирани на спина на електроните и др.* Те се основават на различни химични състави и физически структури и се различават по принципа на функциониране. **Особено важно при мемристорите и мемристорните вериги е тяхното моделиране с оглед прецизното предварително изследване на мемристорни устройства чрез компютърни симулации.** Най-широко приложение засега са намерили титаново-диоксидните и хафниево-диоксидните мемристори и те основно са обект на настоящите изследвания. Тяхната структура и принцип на действие са идентични. На фиг. 1.2 е показана схема на мемристорна структура, базирана върху титанов диоксид.



Фиг. 1.1 Зависимостите между четирите основни електрически величини (ток i , напрежение u , електрически заряд q и магнитен поток Ψ) и фундаменталните двуполусни елементи (резистор R , кондензатор C , бобина L и мемристор M).



Фиг. 1.2 Опростена мемристорна нано-структура, базирана на титанов диоксид (хафниев диоксид)

Идеята за мемристора е развита от проф. Евгени Филипов от Техническия университет в Илменау, Германия и негови ученици (Роланд Зюссе, Волфганг

Бюнтинг и др.) в теория на елементите от по-висок ред. Българинът професор Евгени Филипов не само разработва теория, но търси и практическо приложение на тези нови елементи. Със своя докторантка от България разработват резистивни честотно-зависими елементи, както и индуктивности и активни филтри от по-висок ред и патентоват схема на активни аналогови филтри от произволно висок ред. В ПНИЛ с ПУ по ППХТ в ТУ София, ръководена от проф. Филип Филипов, в сътрудничество с Техническия университет в Илменау са проектирани и изработени серия от 20 тънкослойни хибридни интегрални схеми на активни филтри от втори ред с използване на схемотехническите решения, предложени от проф. Евгени Филипов и докторантката Нина Маринова. Схемите са използвани в по-нататъшни изследвания на вериги с елементи от по-висок ред. Теорията на елементите от по-висок ред позволява проектиране на нови схемни решения на филтри с висок качествен фактор.

1.3. Моделиране на титаново-диоксидни мемристори

Във връзка с моделирането на мемристори тук са дефинирани основните термини и понятия, използвани по-нататък.

- **Линеен мемристорен модел** – използва линейна зависимост между времевата производна на променливата на състоянието и тока (напрежението) в диференциалното уравнение на състоянието.
- **Нелинеен мемристорен модел** – използва нелинейна зависимост между времевата производна на променливата на състоянието и тока (напрежението) в уравнението на състоянието.
- **Нелинейно йонно отместване** – представлява нелинейната зависимост между скоростта на движение на кислородните вакансии в мемристора и напрежението.
- **Праг на активиране на мемристора** – представлява нивото на напрежението, под което променливата на състоянието не се изменя и мемристортът има поведение на линеен резистор.
- **Свързване на мемристора в права посока** – когато на анода е подаден положителен потенциал спрямо катода.
- **Свързване на мемристора в обратна посока** – когато на анода е подаден отрицателен потенциал спрямо катода.
- **Гранични ефекти** – представляват изменението на променливата на състоянието при достигане на нейните гранични стойности – когато мемристортът е свързан в права посока и променливата на състоянието е достигнала стойност единица, при по-нататъшно увеличаване на напрежението тя запазва стойността си, а при прилагане на напрежение в обратна посока тя веднага започва да намалява. Когато променливата на състоянието е достигнала стойност нула, при намаляване на напрежението тя запазва стойността си, а при нарастване на напрежението тя увеличава стойността си.

- **Превключване на мемристора** – изменение на съпротивлението на мемристора в много широк диапазон.
- **Режим на меко превключване** – изменение на променливата на състоянието в широк диапазон, при което тя не достига граничните си стойности.
- **Режим на твърдо превключване** – изменение на променливата на състоянието в много широк диапазон, при което тя достига и за определено време запазва граничните си стойности.

Диференциалното уравнение на състоянието на мемристора в комбинация със зависимостта между тока и напрежението на мемристора се описва със системата уравнения (1.15):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= k i f(x) \\ u &= i [R_{ON} x + R_{OFF} (1 - x)] \end{aligned} \quad (1.15)$$

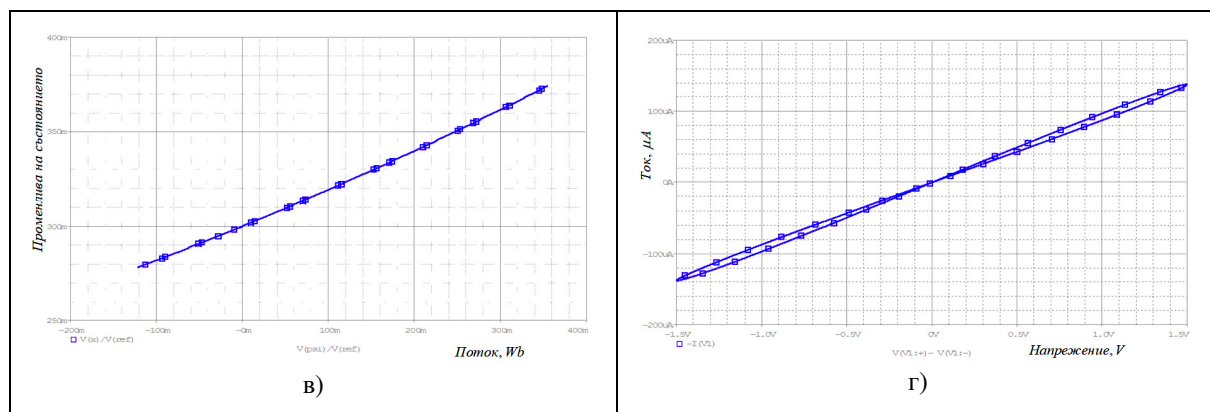
където $f(x)$ е приложената прозоречна функция, x е променливата на състоянието на мемристора, R_{ON} и R_{OFF} са съпротивления на елемента при затворено и отворено състояния, k е константа, зависеща от физическите параметри на мемристора.

1.3.1. Мемристорен модел на *Strukov* и *Williams* (Класически модел *K1*)

Системата уравнения, описваща този мемристорен модел е:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= k i f_{sw}(x) = k i [x(1 - x)] \\ u &= i [R_{ON} x + R_{OFF} (1 - x)] \end{aligned} \quad (1.19)$$

Зависимостите между състоянието и потока и между напрежението и тока на мемристора са показани на Фиг. 1.8 в) и 1.8 г). Характеристиката състояние-поток е нелинейна нарастваща крива, а характеристиката напрежение-ток е усукан хистерезисен цикъл.



Фиг. 1.8 (в) Зависимост между състоянието и потока; (г) характеристика ток-напрежение

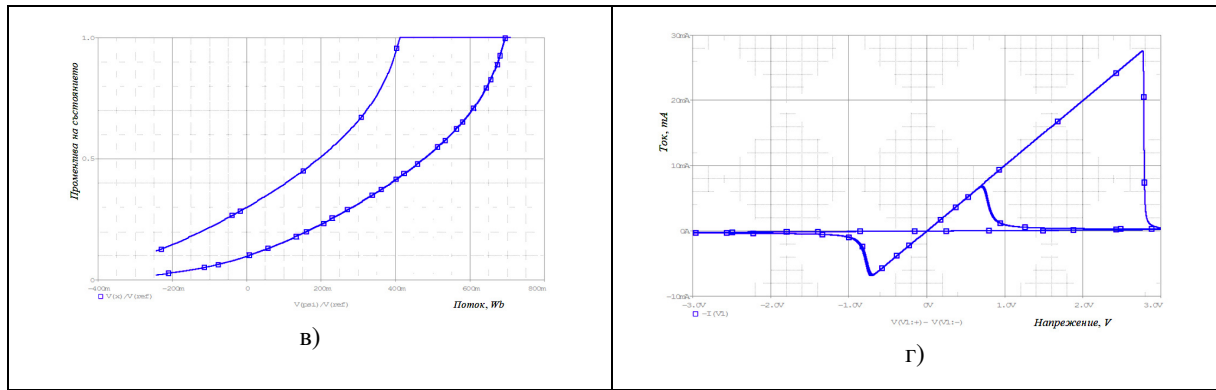
1.3.2. Мемристорен модел на *Joglekar* (Класически модел *K2*)

Диференциалното уравнение на състоянието на мемристора, получено чрез използване на прозоречната функция на *Joglekar*, в комбинация със зависимостта ток-напрежение е описано с (1.25):

$$\frac{dx}{dt} = k i f_J(x) = k i [1 - (2x - 1)^{2p}]$$

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

където $f_J(x)$ е прозоречната функция на *Joglekar*, p е целочислен степенен показател. Зависимостите между състоянието и потока и между напрежението и тока на мемристора са показани на Фиг. 1.10 в) и 1.10 г).



Фиг. 1.10 (в) Зависимост между състоянието и потока; (г) характеристика ток-напрежение

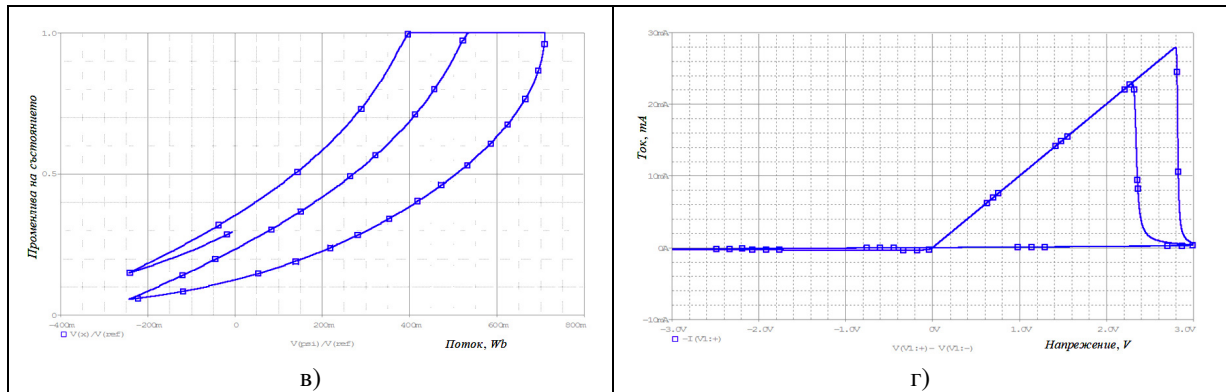
1.3.3. Мемристорен модел на *Biolek* (Класически модел *K3*)

Уравнението на състоянието на мемристора, получено при прилагане на прозоречната функция на *Biolek* $f_B(x, i)$, в комбинация със зависимостта ток-напрежение е описано с (1.28):

$$\frac{dx}{dt} = k i f_B(x, i) = k i [1 - (x - \text{stp}(-i))^{2p}]$$

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

Зависимостите между състоянието и потока и между напрежението и тока при режим на твърдо превключване са показани на Фиг. 1.12 в) и г).



Фиг. 1.12 (в) Зависимост между състоянието и потока; (г) характеристика ток-напрежение

1.3.4. Мемристорен модел, базиран на граничните условия (Класически модел K4)

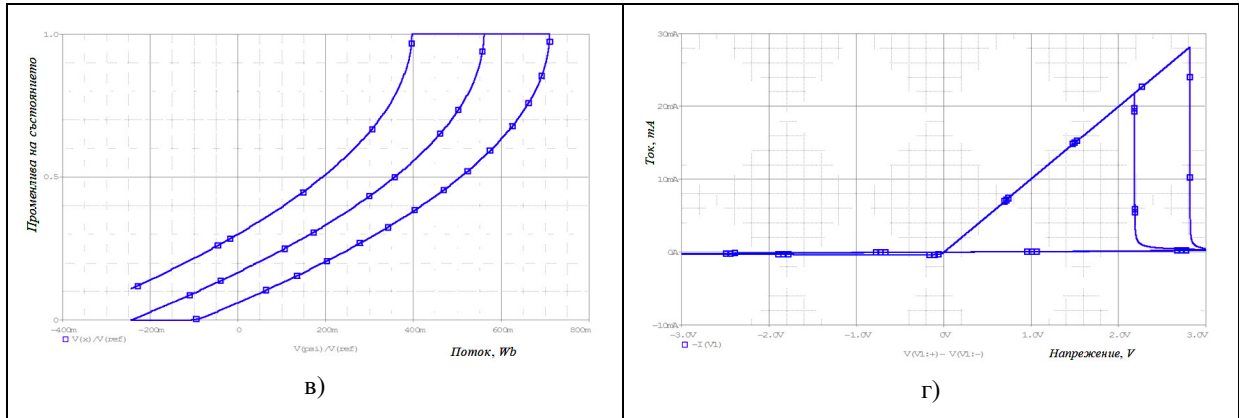
Диференциалното уравнение на състоянието на елемента, получено чрез прилагане на прозоречната функция на Corinto-Ascoli, в комбинация със зависимостта ток-напрежение е описано с (1.30):

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= k i f_{BCM}(x) \\ u &= i [R_{ON} x + R_{OFF} (1 - x)]\end{aligned}\quad (1.30)$$

където прозоречната функция $f_{BCM}(x)$ е:

$$\begin{aligned}f_{BCM}(x) &= 1, \quad x \in (0,1) \\ f_{BCM}(x) &= 1, \quad x = 0 \quad \& \quad u \geq u_{thr} \\ f_{BCM}(x) &= 0, \quad x = 0 \quad \& \quad u < u_{thr} \\ f_{BCM}(x) &= 1, \quad x = 1 \quad \& \quad u < -u_{thr} \\ f_{BCM}(x) &= 0, \quad x = 1 \quad \& \quad u \geq -u_{thr}\end{aligned}\quad (1.31)$$

където u_{thr} е праг на активиране на мемристора. Зависимостите между състоянието и потока и между напрежението и тока на мемристора са показани на Фиг. 1.14 в) и г).



Фиг. 1.14 в) Зависимост между състоянието и потока; г) характеристика ток-напрежение

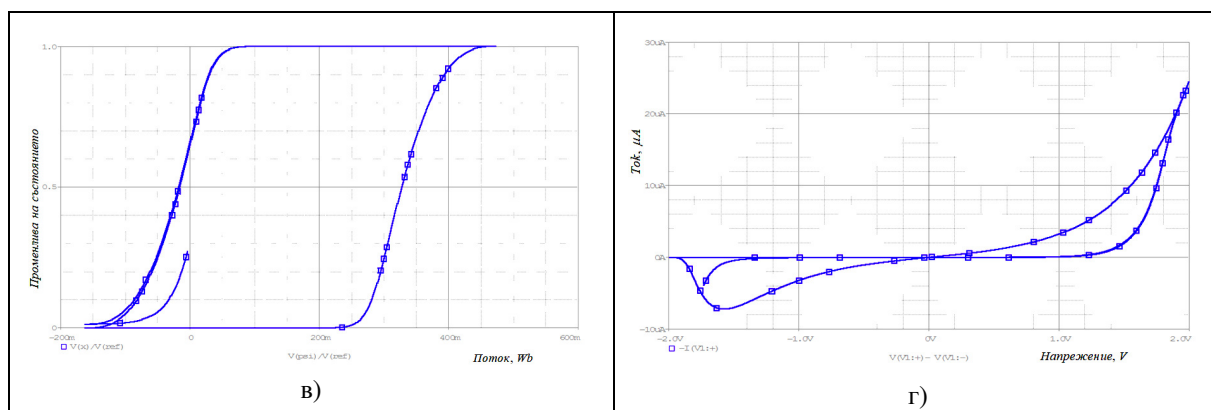
1.3.5. Модел на титаново-диоксиден мемристор на Lehtonen-Laiho (Класически модел K5)

Диференциалното уравнение на състоянието, получено чрез използване на прозоречната функция на Biolek, в комбинация със зависимостта ток-напрежение на Lehtonen-Laiho е описано с (1.33):

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= a f(x) u^m \\ i &= x^n \beta \sinh(\alpha u) + \chi [\exp(\gamma u) - 1]\end{aligned}\quad (1.33)$$

където a , m , α , β , γ , χ , n са параметри за настройка на модела. Зависимостите между състоянието и потока и между напрежението и тока на мемристора са

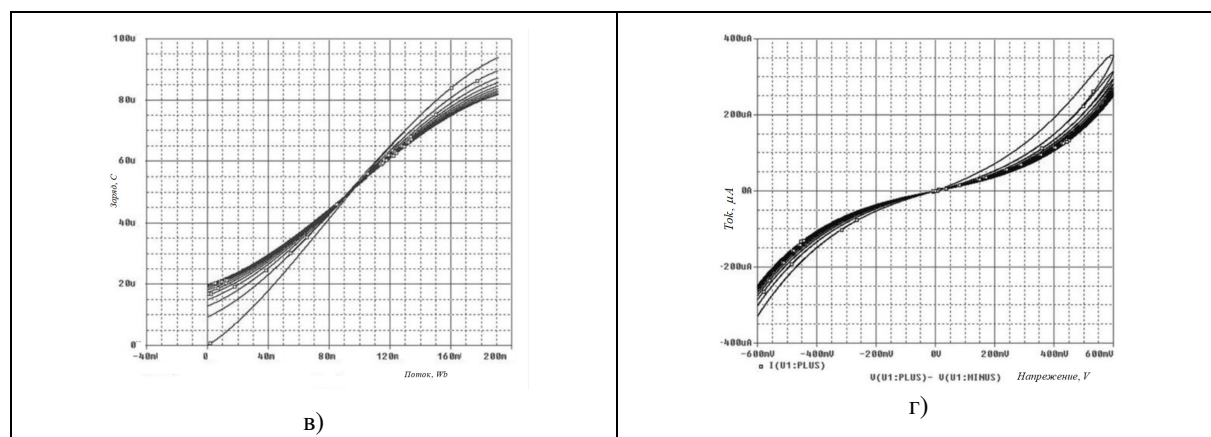
показани на Фиг. 1.16 в) и г). В случая той функционира в режим на твърдо превключване, характеристиката състояние-поток представлява хистерезисен цикъл, в резултат на граничните ефекти, а характеристиката напрежение-ток е несиметрична крива.



Фиг. 1.16 (в) Зависимост между състоянието и потока; (г) характеристика ток-напрежение

1.3.6. Мемристорен модел на Pickett

Моделът на Pickett се основава на физични измервания и анализи на механизма на електрически ток, протичащ през тънка тунелна бариера в изолационни оксидни материали. Зависимостите между състоянието и потока и между напрежението и тока на мемристора са показани на Фиг. 1.18 в) и г).



Фиг. 1.18 (в) Зависимост между състоянието и потока; (г) характеристика ток-напрежение

1.4. Моделиране на хафниево-диоксидни мемристори

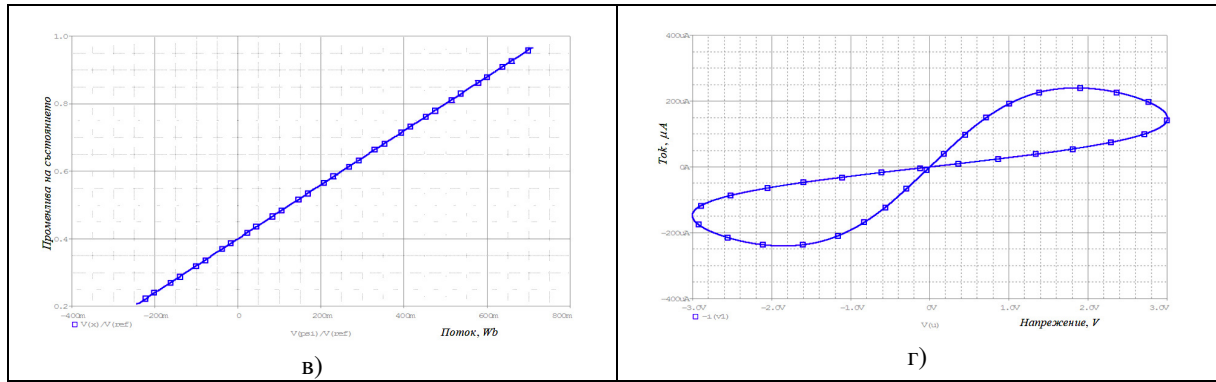
Основните модели на хафниево-диоксидни мемристори, съществуващи в литературата, са до известна степен или неточни, или много сложни за реализация. По-добрите модели съдържат и прозоречна функция в дясната страна на второто уравнение на описващата система.

1.4.1. Класически модел на хафниево-диоксиден мемристор без прозоречна функция и с линейно йонно отместване (Класически модел K6)

Уравненията, с които се описва моделът, са (1.45):

$$\begin{aligned}
 u &= M i = [R_{ON} x + R_{OFF} (1 - x)] i \\
 \frac{dx}{dt} &= \frac{u(t)}{t_{swp} u_{ip}}, \quad u > u_{ip} \\
 \frac{dx}{dt} &= -\frac{u(t)}{t_{swn} u_{in}}, \quad u < u_{in} \\
 \frac{dx}{dt} &= 0, \quad u_{in} \leq u \leq u_{ip}
 \end{aligned} \tag{1.45}$$

където M е съпротивлението на мемристора, u_{ip} и u_{in} са прагове на активиране, t_{swp} и t_{swn} са параметри за настройка на модела. Зависимостите между състоянието и потока и между напрежението и тока на мемристора са показани на Фиг. 1.19 в) и г).



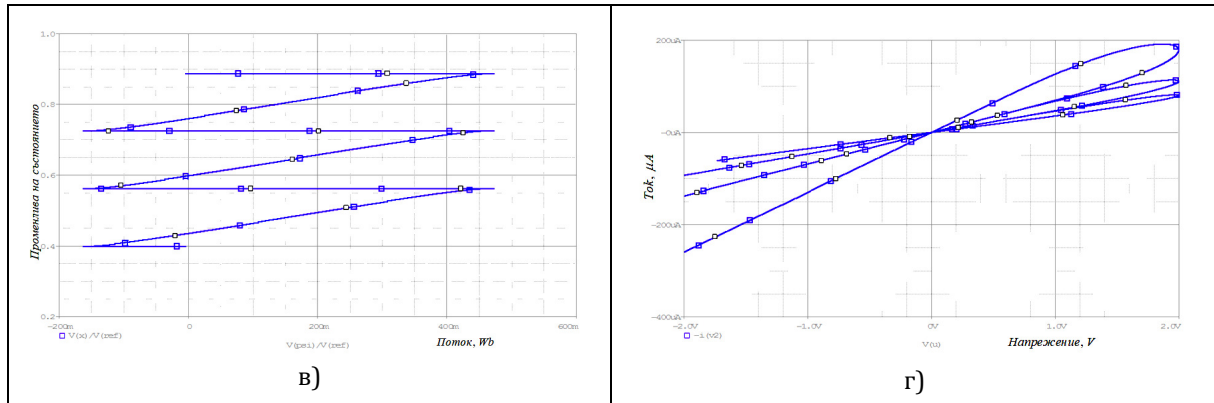
Фиг. 1.19 (в) Зависимост между състоянието и потока; (г) характеристика ток-напрежение

1.4.2. Класически модел на хафниев-диоксиден мемристор с нелинейна прозрачна функция (Класически модел K7)

Уравненията, описващи този модел, са:

$$\begin{aligned}
 u &= [LRS x + HRS (1 - x)] i \\
 \frac{dx}{dt} &= \frac{C_{LRS}}{\Delta r} \left(\frac{u - u_{ip}}{u_{ip}} \right)^{PLRS} f_{LRS}(M), \quad u > u_{ip} \\
 \frac{dx}{dt} &= -\frac{C_{HRS}}{\Delta r} \left(\frac{u - u_{in}}{u_{in}} \right)^{PHRS} f_{HRS}(M), \quad u < u_{in} \\
 \frac{dx}{dt} &= 0, \quad u_{in} \leq u \leq u_{ip} \\
 C_{LRS} &= \frac{\Delta r}{t_{swp}}; \quad C_{HRS} = \frac{\Delta r}{t_{swn}} \\
 f_{HRS}(x) &= \frac{1}{1 + \exp \left(\frac{[LRS x + HRS (1 - x)] - \Theta_{HRS} HRS}{\beta_{HRS} \Delta r} \right)}, \quad u < u_{in} \\
 f_{LRS}(x) &= \frac{1}{1 + \exp \left(\frac{\Theta_{LRS} LRS - [LRS x + HRS (1 - x)]}{\beta_{LRS} \Delta r} \right)}, \quad u > u_{ip}
 \end{aligned} \tag{1.46}$$

Зависимостите между състоянието и потока и между напрежението и тока на мемристора са показани на Фиг. 1.21 в) и г). В конкретния случай моделът отразява режим на твърдо превключване на мемристора.



Фиг. 1.21 (в) Зависимост между състоянието и потока; (г) характеристика ток-напрежение

1.5. Мотивация, цел и задачи на дисертационния труд

Мотивацията за разработването на дисертационния труд е установяването на някои пропуски и непълноти в научната литература, основно свързани с реалистичното представяне на нелинейното йонно отместване на зарядите в титаново-диоксидни и хафниево-диоксидни мемристорни структури при високи нива на напрежението и при високи честоти. Най-използваните линейни класически модели (Williams и Strukov, Joglekar, Biolek) имат следните недостатъци – отразяват задоволително йонното отместване само при ниски нива на напрежението (до 1 V) и при ниски честоти, а заедно с някои нелинейни модели, като този на Lehtonen-Laiho, те използват прозоречни функции с фиксиран показател (и съответно с фиксирана нелинейност), които не отразяват реалистично нелинейната зависимост между йонното отместване и напрежението. В тази връзка възниква необходимост от подобряване на поведението на описаните модели, което е основната причина за предлагане на подобрени модели. Тези подобрени модели се настройват с въвеждане на нова методология за моделиране на мемристори, свързана с използване на модифицирани прозоречни функции и настройка на техните параметри.

Поради това, **целта на настоящите изследвания** е разработване и прилагане на нова усъвършенствана методология за моделиране на мемристори с използване на прозоречни функции, при която се отчитат по-реалистично физическите процеси в моделираните мемристори, и изследване на различни ефекти (изменение на концентрацията на кислородните ваканции в обема на мемристора), свързани с влиянието на температурата и дифузията върху физическите процеси в мемристора, и на паразитните индуктивности и капацитети в мемристорните матрици.

Задачите, свързани с реализирането на тази цел, могат да бъдат обобщени, както следва:

1. Разработване на методология за по-реалистично моделиране на физичес-

ките явления в мемристорите чрез използване на модифицирани прозоречни функции и настройка на техните параметри;

2. Приложение на предложената методология за моделиране на титаново-диоксидни и хафниево-диоксидни мемристори и за разработване на нови модели на разглежданите мемристори;

3. Разработване на PSpice библиотечни модели на титаново-диоксидни и хафниево-диоксидни мемристори;

4. Приложение на разработените модели при изследване на мемристорни аналогови и цифрови схеми, вериги и устройства;

5. Съпоставка и сравнение на предложените мемристорни модели;

6. Изследване на различни ефекти, свързани с влиянието на температурата и дифузията върху физическите процеси в мемристора (изменение на съпротивлението, промяна на концентрацията на кислородните ваканции в обема на елемента) и на паразитните индуктивности и капацитети в мемристорни матрици и интегрални схеми с ултраголяма степен на интеграция (ULSI).

Дисертацията съдържа 8 глави и е организирана, както следва:

В следващата Глава 2 е описана усъвършенстваната методология за моделиране на мемристори от титанов диоксид, която е приложена за предложените модифицирани от автора мемристорни модели. В Глава 3 са описани разработените PSpice библиотеки с титаново-диоксидни мемристори. В Глава 4 е представено изследването на мемристорни вериги и устройства (мемристорни генератори, интегратори, насрещно-паралелни и последователни схеми) с предложените от автора модели на титаново-диоксидни мемристори, изследвано е влиянието на температурата, дифузията и паразитните собствени и взаимни индуктивности и капацитети и е установено пренебрежимо слабото влияние на тези допълнителни фактори върху нормалното функциониране на мемристорите в матрици и интегрални схеми с ултраголяма степен на интеграция (ULSI), поради което те не се разглеждат при моделирането на сложни мемристорни вериги и схеми (невронни мрежи, памети), обръща се внимание на съпоставка с класическите модели и се потвърждава работоспособността и реалистичното поведение на модифицираните модели, както и основните преимущества, електрически параметри и свойства на предложените мемристорни модели. В Глава 5 се разглежда усъвършенстваното моделиране на хафниево-диоксидни мемристори и са предложени три модифицирани модела. В Глава 6 са представени разработените в PSpice библиотечни модели на разглежданите мемристори от хафниев диоксид. В Глава 7 е направен анализ на електронни схеми и устройства с използване на модифицираните модели на хафниево-диоксидни мемристори, като са показани преимуществата на предложените модели по отношение на класическите модели и тяхната работоспособност в разглежданите електронни схеми. В глава 8 е представена съпоставката на разглежданите мемристорни модели по някои основни параметри, характеристики и поведение в електрическо поле. Накрая на ръкописа са дадени приносите, публикациите във връзка с дисертацията, както и заключителните бележки, свързани с изследванията.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИ НА ТИТАНОВО-ДИОКСИДНИ МЕМРИСТОРИ

В глава 2 се предлага методология за усъвършенствано моделиране на физическите явления в мемристорите чрез използване на модифицирани прозоречни функции и настройка на техните параметри. Предлагат се 5 нови модифицирани модела на титаново-диоксидни мемристори. Изследва се поведението на разработените в дисертацията модифицирани мемристорни модели.

2.1. Методология за усъвършенствано моделиране на физическите явления в мемристорите чрез използване на модифицирани прозоречни функции и настройка на техните параметри

Предложената в този параграф методология за усъвършенствано моделиране на физическите явления в мемристорите включва използване на различни нелинейни прозоречни функции със степенен показател, зависещ от приложеното напрежение, както и прозоречни функции с допълнителен нелинеен синусоидален компонент, чрез които по-реалистично се моделира нелинейността на йонното отместване. Тези прозоречни функции имат параметри за настройка, които се използват за адаптиране на характеристиките ток-напрежение на модела. Експерименталната характеристика ток-напрежение на разглеждания мемристор, получена при определени условия (напрежителен сигнал) се използва като еталон за настройка на авторските модели. Разработените модели се настройват чрез вариране на параметрите (коефициентите) за настройка с цел минимизиране на средно-квадратичната грешка между симулационната и експерименталната характеристики ток-напрежение. След като предлаганият мемристорен модел е настроен, той се изследва при режими на меко и твърдо превключване и по този начин се получават основните характеристики на моделирания мемристор – характеристиката напрежение-ток и характеристиката състояние-поток.

Предложената методология може да бъде представена, както следва:

1. Избират се определен брой работни точки през равномерен интервал във времето в диапазона на изменение на напрежението, използвано за снемане на експерименталната характеристика напрежение-ток на мемристора;
2. Отчитат се токът и напрежението за експерименталната характеристика напрежение-ток за всяка точка (за всеки съответстващ момент от времето);
3. Симулира се поведението на мемристора с използване на съответния модел. Началните стойности на коефициентите за настройка се избират произволно, ако няма първоначална информация за тях, впоследствие те се променят, докато се получи близост между експерименталната и симулираната характеристики напрежение-ток.
4. Отчитат се токът и напрежението за симулираната чрез модела на мемристора характеристика напрежение-ток за избраните моменти от времето.
5. Изчислява се средно-квадратичната грешка между двете характеристики ток-напрежение (експерименталната и симулираната чрез модела).

6. Варират се параметрите на модела и се проследява средно-квадратичната грешка, респективно визуалното разположение на двете характеристики напрежение-ток. Първоначално се избира произволна стъпка на изменение на параметрите на модела, а при установяване на близост на характеристиките напрежение-ток се намалява стъпката на изменение на параметрите, до получаване на минимална стойност на средно-квадратичната грешка.

Предложената методология се използва при всички предложени модели, разгледани в дисертацията.

2.2. Мемристорен модел с праг на чувствителност и прозоречна функция на *Joglekar* с показател, зависещ от напрежението (модел *AI*)

Диференциалното уравнение на състоянието на мемристора, получено чрез прилагане на модифицирана прозоречната функция, в комбинация със зависимостта ток-напрежение е описано с (2.5):

$$i = \frac{u}{R_{ON}x + R_{OFF}(1-x)}$$

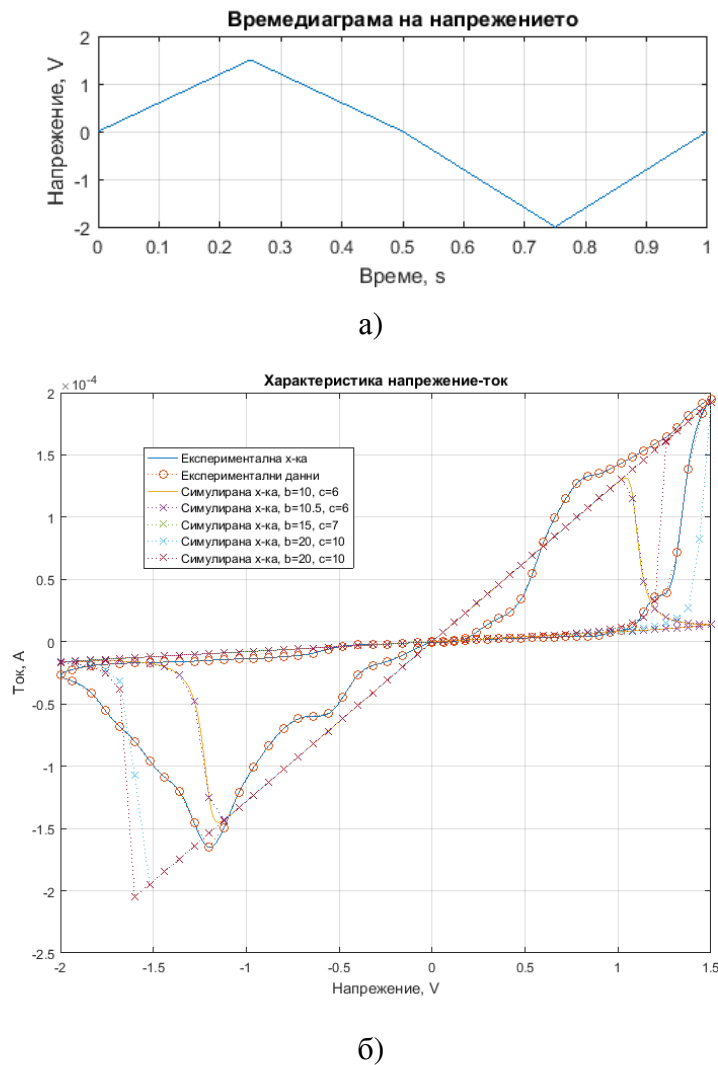
$$\frac{dx}{dt} = k \frac{u}{R_{ON}x + R_{OFF}(1-x)} \left[1 - (2x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{b}{c+|u|}\right)} \right] \quad (2.5)$$

където b и c са параметри за настройка. Настройката на модела се извършва чрез разделяне на времевия интервал на изменение на приложеното линейно по части напрежение на 100 равни части, за всяка от тези 100 точки се отчитат стойностите на тока. Изчислява се средно-квадратичната грешка между симулираната и експерименталната характеристики напрежение-ток при вариране на параметрите за настройка b и c . Резултатите са представени в табл. 2.1. Напрежението, при което е получена експерименталната характеристика напрежение-ток, е показано на Фиг. 2.1 а). Някои от получените характеристики в графичен вид в околност на минималната средно-квадратична грешка са представени на Фиг. 2.1 б). Минималната грешка е при стойности на параметрите : $b = 9.5$, $c = 6$.

Табл. 2.1

Съпоставка на експерименталната и симулираните характеристики напрежение-ток според модифицирания модел *AI*, по отношение на средно-квадратичната грешка, при някои стойности на параметрите за настройка b и c

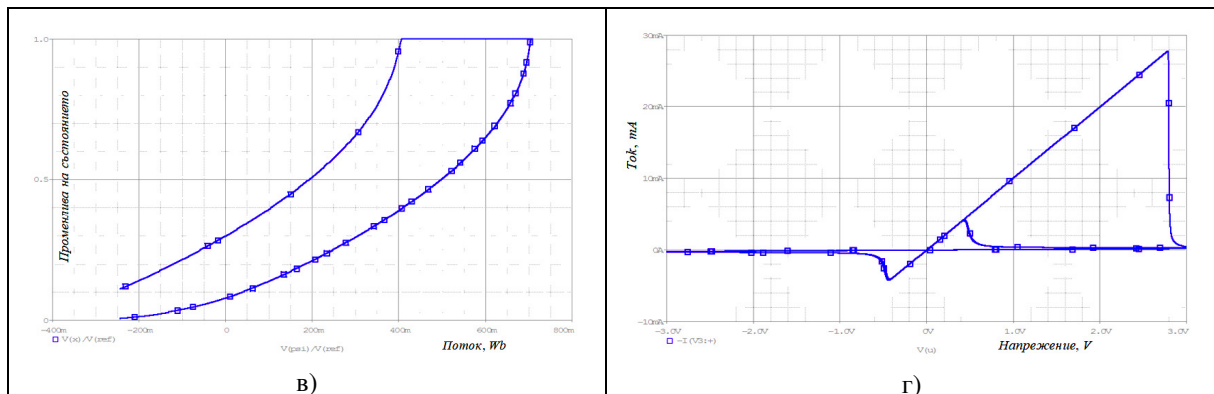
b	c	Грешка, %
10	6	6.93
10.5	6	7.60
9.5	6	6.84
9.5	6.5	6.86
9.5	5.5	7.01
11	5.5	6.95
11.5	5.5	6.98
11.5	6	7.02
11	7	7.12



Фиг. 2.1. (а) Времедиаграма на напрежението на мемристора;

(б) Съпоставка на експерименталната характеристика напрежение-ток на титаново-диоксиден мемристор с пет симулирани характеристики, получени при вариране на коефициентите за настройка на модифицирания модел на Joglekar – A1

След настройката на модела A1 той се изследва в среда на PSpice при различни сигнали за получаване на характеристиките ток-напрежение и състояние-поток при режими на меко и твърдо превключване. Зависимостите между състоянието и потока и между напрежението и тока на мемристора са показани на Фиг. 2.2 в) и г).



Фиг. 2.2 (в) Зависимост между състоянието и потока; (г) Характеристика ток-напрежение

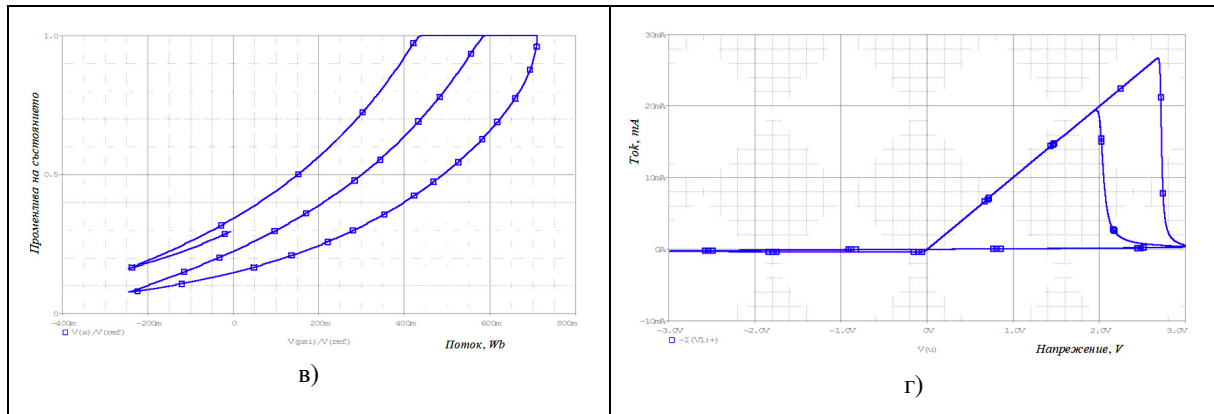
2.3. Модел с нелинейно йонно отместване, модифицирана прозоречна функция на *Biolek* с допълнителен синусоидален компонент и праг на чувствителност (модел A2)

За настройката на модифицирания модел A2 се прилага методологията за реалистично моделиране на физическите явления в мемристорите чрез използване на модифицирани прозоречни функции и настройка на техните параметри, подробно описана в т. 2.1.

Диференциалното уравнение на състоянието на мемристора, получено чрез прилагане на прозоречната функция, в комбинация със зависимостта ток-напрежение е описано с (2.10):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \eta k i \left[\frac{-(x-1)^{2p} + 1 + m(\sin^2(\pi x))}{m+1} \right], & u(t) \leq -u_{thr} \\ \frac{dx}{dt} &= \eta k i \left[\frac{-x^{2p} + 1 + m(\sin^2(\pi x))}{m+1} \right], & u(t) > u_{thr} \\ \frac{dx}{dt} &= 0, & -u_{thr} \leq u(t) \leq u_{thr} \\ u &= Ri = [R_{ON}x + (1-x)R_{OFF}] i \end{aligned} \quad (2.10)$$

където m и p са параметри за настройка. След минимизиране на средно-квадратичната грешка са получени оптималните стойности на параметрите за настройка: $m = 12000$; $p = 7$. Зависимостите между състоянието и потока и между напрежението и тока на мемристора са показани на Фиг. 2.5 в) и г).



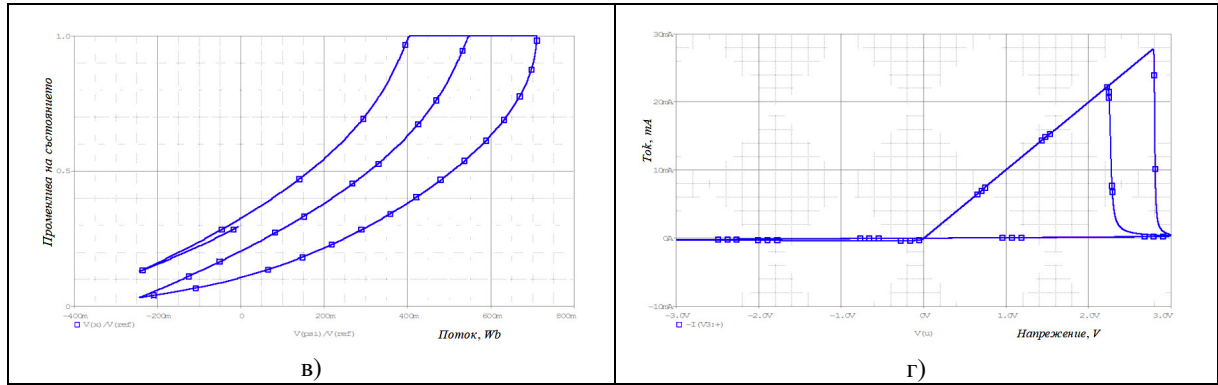
Фиг. 2.5 (в) Зависимост между състоянието и потока; (г) характеристика ток-напрежение

2.4. Модел с модифицирана прозоречна функция на *Biolek* със степенен показател, зависещ от напрежението (модел A3)

Уравнението на състоянието на мемристора, получено чрез прилагане на прозоречната функция, в комбинация със зависимостта ток-напрежение е описано с (2.13):

$$\begin{aligned}
\frac{dx}{dt} &= k \eta i \left[1 - (x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{B}{|u|+C}\right)} \right], \quad u(t) \leq 0, \quad [i(t) \leq 0] \\
\frac{dx}{dt} &= k \eta i \left[1 - x^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{B}{|u|+C}\right)} \right], \quad u(t) > 0, \quad [i(t) > 0] \\
u &= R i = i [R_{ON} x + (1-x) R_{OFF}]
\end{aligned} \tag{2.13}$$

След минимизиране на средно-квадратичната грешка параметрите за настройка са: $B = 2.3$, $C = 20.1$. Зависимостите между състоянието и потока и между напрежението и тока на мемристора са показани на Фиг. 2.8 в) и г).



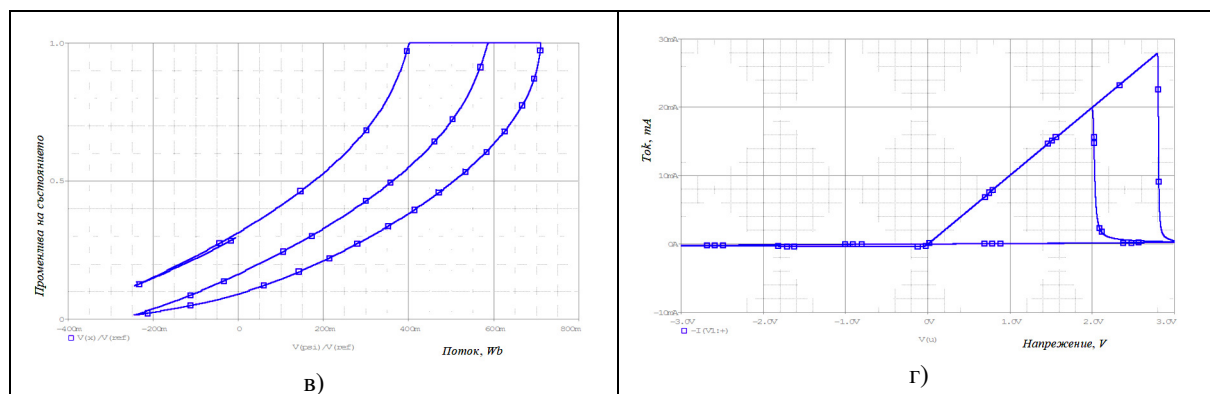
Фиг. 2.8 (в) Зависимост между състоянието и потока; (г) характеристика ток-напрежение

2.5. Модел с модифицирана прозоречна функция на *Joglekar-Biolek* с показател, зависещ от напрежението и праг на активиране (модел A4)

Диференциалното уравнение на състоянието на мемристора, получено чрез прилагане на прозоречната функция, в комбинация със зависимостта ток-напрежение е описано с (2.17):

$$\begin{aligned}
\frac{dx}{dt} &= \eta k i \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[(x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{A}{|u|+C}\right)} + (2x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{A}{|u|+C}\right)} \right] \right\}, \quad u(t) \leq 0 \\
\frac{dx}{dt} &= \eta k i \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[x^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{A}{|u|+C}\right)} + (2x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{A}{|u|+C}\right)} \right] \right\}, \quad u(t) > 0 \\
u &= R i = [R_{ON} x + R_{OFF} (1-x)] i
\end{aligned} \tag{2.17}$$

След минимизиране на средно-квадратичната грешка оптималните стойности на параметрите за настройка са: $A = 2.34$, $C = 21.12$. Зависимостите между състоянието и потока и между напрежението и тока на мемристора са показани на Фиг. 2.11 в) и г).



Фиг. 2.11 (в) Зависимост между състоянието и потока; (г) Характеристика ток-напрежение

2.6. Нелинеен мемристорен модел с комбинирана модифицирана прозоречна функция на *Biolek-Joglekar* и степенен показател, зависещ от напрежението (модел A5)

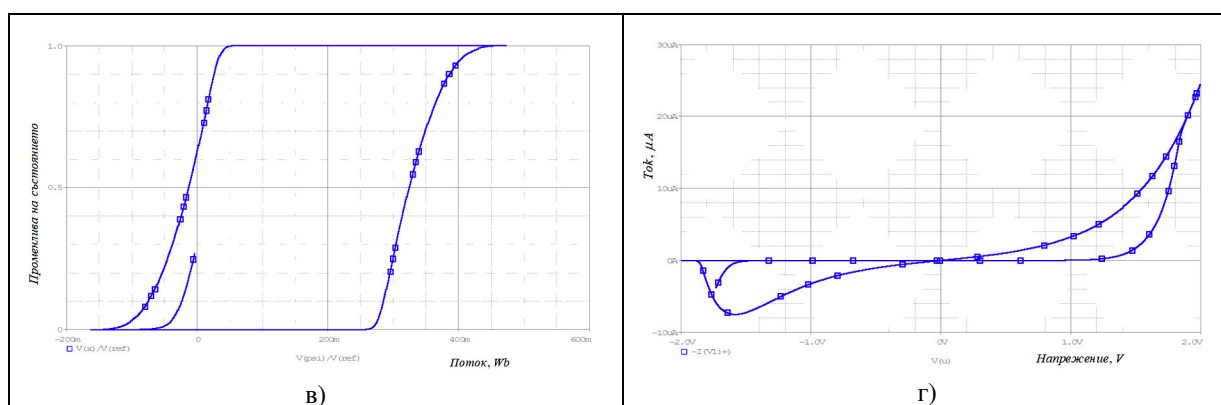
Диференциалното уравнение на състоянието на мемристора, получено чрез прилагане на прозоречната функция, в комбинация със зависимостта ток-напрежение на Lehtonen-Laiho е описано с (2.23):

$$\frac{dx}{dt} = a \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[(x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{a}{|u|+c}\right)} + (2x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{a}{|u|+c}\right)} \right] \right\} u^m, \quad u(t) \leq 0$$

$$\frac{dx}{dt} = a \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[x^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{a}{|u|+c}\right)} + (2x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{a}{|u|+c}\right)} \right] \right\} u^m, \quad u(t) > 0 \quad (2.23)$$

$$i = \chi [\exp(\gamma u) - 1] + \beta x^n \sinh(\alpha u)$$

След минимизиране на средноквадратичната грешка оптималните стойности на параметрите са: $a = 30.2$, $c = 2.3$. Зависимостите между състоянието и потока и между напрежението и тока са показани на Фиг. 2.14 в) и г).



Фиг. 2.14 (в) Зависимост между състоянието и потока; (г) характеристика ток-напрежение

2.7. Изводи

В глава 2 от дисертацията са предложени и изследвани модифицирани модели (Модифициран модел на Joglekar със степенен показател, зависещ от напрежението – *A1*; модифициран модел на Biolek с допълнителен синусоидален компонент в прозоречната функция – *A2*; модифициран модел на Biolek със степенен показател, зависещ от напрежението – *A3*; модифициран модел с комбинирана прозоречна функция на Biolek-Joglekar със степенен показател, зависещ от напрежението – *A4*; модифициран модел на Lehtonen-Laiho с комбинирана прозоречна функция на Biolek-Joglekar със степенен показател, зависещ от напрежението – *A5*) на титаново-диоксидни мемристори. Установени са техните основни преимущества. Потвърдено е подобреното поведение на предложените модели в електрическо поле при високи честоти – волт-амперна характеристика, доближаваща се по-силно до експериментално записана характеристика ток-напрежение на мемрстора и еднозначна вебер-кулонова характеристика при режим на меко превключване, в сравнение с модела на Biolek, който при едни и същи условия представя тази характеристика с нееднозначна крива. По отношение на еталонния модел на Pickett при авторските модели не се наблюдават проблеми, свързани със сходимостта на изчислителните процеси. Предложените модифицирани модели с видоизменени прозоречни функции се основават главно на трите описани по-горе класически модела на мемристори – на Joglekar, Biolek и BCM, и притежават техните основни свойства и преимущества. Основните нови предимства на предложените от автора модифицирани модели на мемристори са свързани с реалистичното представяне на йонното отместване на кислородните вакансии, в зависимост от приложеното напрежение и голямата нелинейност, което позволява работа при високи нива на сигналите и високи честоти. Друго предимство на предложените модели е подобратата близост между получените характеристики напрежение-ток и съответната експериментална характеристика ток - напрежение. Почти всички от предложените модели, с изключение на *A3* използват праг на активиране, което им дава възможност за прилагане в устройства, които трябва да разграничават сигнали с ниско и високо ниво: например памети мемристорни матрици невронни мрежи описани в глава 4. В табл. 2.6 е направена съпоставка на предложените модели на титаново-диоксидни мемристори по основните критерии за сравнение на тяхното поведение и особености. По-долу са дефинирани и описани *критериите за сравнение*.

1. **Сложност** – дефинира се като брой на елементарните математически операции, използвани в математическия модел на мемрстора;
2. **Нива на сигналите** – за ниски нива се считат напрежения под 1 V, средни – от 1 до 1.5 V, съответно тези над 1.5 V се считат за високи нива;
3. **Честота на сигналите** – за ниски честоти се считат тези от 0.5 Hz до 1 KHz, за средни честоти – от 1 kHz до 100 kHz, за високи честоти – от 100 KHz до 3 GHz;

4. **Нелинейност** – дефинира се *качествено* като степен на отклонение на характеристиката „времева производна на променливата на състоянието – ток на мемристора” от линейната зависимост;
5. **Отразяване на граничните ефекти** – този критерий съдържа две изисквания: от една страна, ограничаване на променливата на състоянието в интервала (0, 1), а от друга страна – когато променливата на състоянието има стойност единица, тя да остане с тази стойност при увеличаване на напрежението в положителна посока, и да започне да намалява при понижаване на напрежението; ако променливата на състоянието има стойност нула, тя да запази тази стойност при понижаване на напрежението, и да започне да се увеличава при нарастване на напрежението.
6. **Отразяване на превключващите ефекти** – способност на мемристорния модел да изразява промяната на съпротивлението на мемристора в широк диапазон (за режим на твърдо превключване – от 100 Ω до 16 k Ω , за режим на меко превключване – от 2 k Ω до 14 k Ω).
7. **Режими на функциониране** – режим на меко превключване, когато променливата на състоянието не достига граничните си стойности – нула и единица; режим на твърдо превключване, когато променливата на състоянието достига граничните си стойности – нула и единица.
8. **Точност на модела** – дефинира се като способност на модела да изразява характеристиката напрежение-ток с минимална грешка по отношение на експерименталната характеристика напрежение-ток при едни и същи условия. Ако средно-квадратичната грешка е по-малка от 4 %, точността се приема за висока, ако грешката е в интервала 4 – 6 % точността се приема за удовлетворителна, а при грешка над 6 % точността на модела е ниска.
9. **Проблеми със сходимостта** – дефинира се като нарушаване на нормалното протичане на изчислителните операции по време на симулация и спиране на алгоритъма в резултат на незадоволителна сходимост на изчислителните операции.
10. **Използване на праг на активиране** – този критерий показва дали в модела е заложено ниво на сигналите (праг на активиране), под което мемристорът има поведение на линеен резистор и над което променливата на състоянието се изменя, така че елементът има поведение на мемристор.
11. **Възможност за настройка на модела** – способността на мемристорния модел да бъде адаптиран към определена експериментална характеристика напрежение-ток, при получаване на минимална средно-квадратична грешка.
12. **Възможност за изразяване на несиметрични характеристики напрежение-ток** – способността на модела да изразява характеристиката напрежение-ток при режими, близки до режим на твърдо превключване, с несиметрични спрямо координатното начало криви, както и да отразява токоизправителен ефект.

13. **Отразяване на зависимостта на нелинейното йонно отместване от напрежението** – възможността на модела да представя нелинейността на йонното отместване (която е обратно пропорционална на степенния показател в прозоречната функция) като функция на приложеното напрежение. Такава зависимост се изразява или чрез въвеждане на хиперболична функция между степенния показател в прозоречната функция и напрежението, или чрез повдигане на нечетна степен на тока или напрежението в уравнението, изразяващо зависимостта между производната на променливата на състоянието спрямо времето и тока (напрежението).
14. **Коректно представяне на характеристиката състояние-поток** – способността на модела да изразява характеристиката състояние-поток с еднозначна крива линия при режим на меко превключване, и с хистерезисна многозначна функция при режим на твърдо превключване.
15. **Сложност на настройката на модела** – определя се от броя на коефициентите в модела, чиито стойности могат да се променят с цел подобряване на съответствието между симулираните и експерименталните характеристики напрежение-ток при едни и същи условия.

Табл. 2.6. Съпоставка на предложените и класическите титаново-диоксидни мемристорни модели по тяхното поведение в електрическо поле и по техните особености

Модел	<i>K1</i>	<i>K2</i>	<i>K3</i>	<i>K4</i>	<i>K5</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>	<i>A4</i>	<i>A5</i>
Нива на сигналите	ниски и средни	ниски и средни	ниски и средни	ниски и средни	произволни	ниски и средни	произволни	произволни	произволни	произволни
Нелинейност	средна	средна	средна	ниска	висока	висока	висока	висока	висока	висока
Отразяване на граничните ефекти	частично	частично	да	да	не	да	да	да	да	да
Честоти на превключване	ниски честоти	ниски честоти	ниски честоти	ниски честоти	ниски, средни и високи честоти	ниски и средни честоти	ниски и средни честоти	ниски и средни честоти	ниски и средни честоти	ниски, средни и високи честоти
Режими на функциониране	меко превключване	меко превключване	меко и твърдо превключване	меко и твърдо превключване	меко и твърдо превключване	меко и твърдо превключване	меко и твърдо превключване	меко и твърдо превключване	меко и твърдо превключване	меко и твърдо превключване
Точност	ниска	ниска	задоволителна	задоволителна	висока	висока	висока	висока	висока	висока
Използване на праг на активиране	не	не	не	да	не	да	не	да	да	да
Възможност за настройка на модела	не	частична	частична	не	частична	да	да	да	да	да
Изразяване на несиметрични характеристики напрежение-ток	не	не	да	да	да	да	да	да	да	да
Отразяване на зависимостта на нелинейното йонно отместване от напрежението	не	не	не	не	не	да	да	да	да	да
Коректно представяне на характеристиката състояние-поток	частично, при средни и високи честоти	частично, при средни и високи честоти	частично, при средни и високи честоти	да	да	да	да	да	да	да
Приложимост	аналогови и цифрови устройства	аналогови и цифрови устройства	аналогови и цифрови устройства, невронни мрежи	аналогови и цифрови устройства	аналогови и цифрови устройства, невронни мрежи, памети	аналогови и цифрови устройства, невронни мрежи	аналогови и цифрови устройства, невронни мрежи	аналогови и цифрови устройства, невронни мрежи	аналогови и цифрови устройства, невронни мрежи, памети	аналогови и цифрови устройства, невронни мрежи, памети

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТВАНЕ НА PSpICE БИБЛИОТЕКИ С ТИТАНОВО-ДИОКСИДНИ МЕМРИСТОРНИ МОДЕЛИ

В тази глава е описано разработването на PSpice библиотечни модели на титаново-диоксидни мемристори въз основа на техните математически модели. Генерирани са символните и библиотечните модели на титаново-диоксидни мемристори с цел тяхното приложение в електронни схеми. Разгледани са най-известните класически мемристорни модели (Strukov Williams – *K1*, Joglekar – *K2*, Biolek – *K3*, Ascoli и Corinto – *K4*, Lehtonen-Laiho – *K5*) и разработените от автора модифицирани модели на титаново-диоксидни мемристори (Модифициран модел на Joglekar със степенен показател, зависещ от напрежението – *A1*; модифициран модел на Biolek с допълнителен синусоидален компонент в прозоречната функция – *A2*; модифициран модел на Biolek със степенен показател, зависещ от напрежението – *A3*; модифициран модел с комбинирана прозоречна функция на Biolek-Joglekar със степенен показател, зависещ от напрежението – *A4*; модифициран модел на Lehtonen-Laiho с комбинирана прозоречна функция на Biolek-Joglekar със степенен показател, зависещ от напрежението – *A5*). Потвърдена е работоспособността на създадените PSpice мемристорни библиотечни модели.

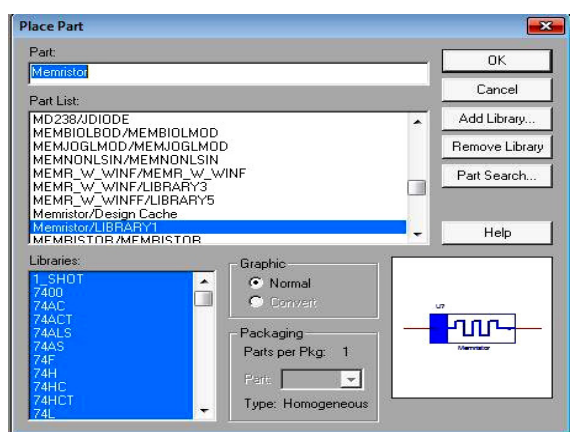
3.1. Общи сведения за разработването на титаново-диоксидните мемристорни модели

Моделите на титаново-диоксидни мемристори са много важни при тяхното използване за анализ на мемристорни електронни схеми чрез компютърни симулации. Всеки модел съдържа основно две уравнения: първото от тях дава зависимостта между тока и напрежението, като в нея участва и променливата на състоянието. Второто уравнение дава зависимостта на времевата производна на променливата на състоянието и тока на мемристора. Тези уравнения служат за основа при генерирането на библиотечните модели на титаново-диоксидни мемристори в среда на PSpice. Тук са описани разработените библиотечни PSpice модели на разглежданите титаново-диоксидни мемристори на база на техните математически модели, с цел тяхното приложение в електронни схеми. PSpice моделите са използвани за сравнение на резултатите, както и за потвърждаване на работоспособността на разработените модифицирани модели и тяхното по-реалистично поведение в различни електронни схеми *при високи честоти*.

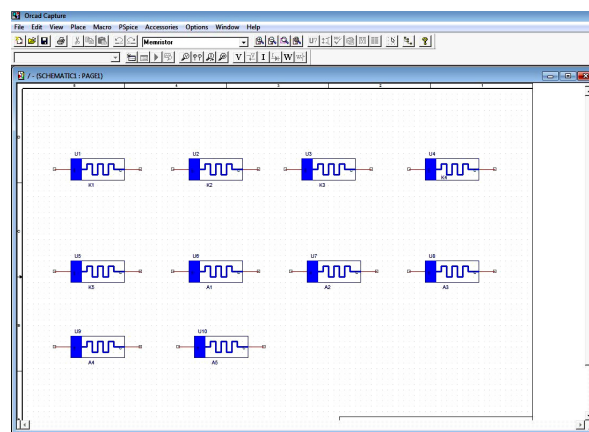
3.2. Разработване на PSpice библиотечни модели на титаново-диоксидни мемристори

В тази секция са описани библиотеките на PSpice моделите на мемристори, разработени във връзка с дисертацията. Създаването на библиотеките на мемристорните модели се извършва в среда на PSpice. Изхожда се от уравнението на състоянието на мемристора, като се започва създаването на заместваща схема. Променливата на състоянието участва в прозоречната функция, в дясната част на уравнението на състоянието. Токът се изразява от първото уравнение на

системата, описваща съответния модел, като функция на напрежението и променливата на състоянието. След получаване на производната на променливата на състоянието по отношение на времето се използва блок за интегриране със зададено начално условие – стойността на променливата на състоянието преди започване на симулацията. Чрез използване на обратна връзка заместващата схема се завършва, като променливата на състоянието се замества в първото уравнение на системата, описваща модела на мемристора. Потокът се получава от изхода на блока за интегриране, като на неговия вход се подава сигналът на напрежението на мемристора. Симулацията се извършва във времевата област, като стъпката на дискретизация на времето се избира съгласно изискванията за максимална точност на резултатите, т.е. тя трябва да бъде много малка величина по отношение на избраното време за симулация на схемата. За източник на сигнал се използва източник на синусоидално напрежение VSIN. Протичащият през мемристора ток, възбуден от приложеното напрежение, се получава чрез свързване на източник на ток, управляван чрез сигнал, пропорционален на тока през мемристора – библиотечен елемент ABM, паралелно на източника на напрежение. Изводите на мемристора в кода на библиотечния модел се означават съответно с „a” за анод и „c” за катод. Полученият код започва с командата .SUBCKT MEMRISTOR A C, следва описанието на заместващата схема, в което е указано конкретно свързването на използваните елементи между възлите на схемата. Кодът завършва с командата .ENDS. Полученият код се използва за създаването на библиотечен модел чрез инструмента MODEL EDITOR на PSpice. Библиотечният елемент се добавя към останалите използвани библиотеки в PSpice. Библиотеката на разработваните авторски модели е показана на Фиг. 3.1. Символните означения на разработените модели са дадени на Фиг. 3.2.



Фиг. 3.1. Библиотека на разработените авторски модели



Фиг. 3.2. Символни означения на разглежданите класически и модифицирани модели

3.2.1. Модел на титаново-диоксиден мемристор без прозоречна функция и с линейно йонно отместване

В този параграф е описано разработването на PSpice библиотечен модел на титаново-диоксиден мемристор без прозоречна функция и с линейно йонно отместване, на базата на неговия математически модел. Основните величини, използвани в математическия модел на мемристора, са:

$R_{ON} = 100 \, \Omega$ – минимално съпротивление на мемристора при напълно затворено състояние; $R_{OFF} = 16 \, \text{k}\Omega$ – максимално съпротивление на мемристора при напълно отворено състояние; $K = 10\,000 \, \text{C}^{-1}$ – константа, зависеща от физичните параметри на мемристора (от подвижността на токоносителите μ , съпротивлението R_{ON} и дължината на мемристора D) стойността, която се използва в модела; x – променлива на състоянието на мемристора, равна на отношението на дължината на легирания участък на мемристора w към цялата негова дължина D . Математическият модел на разглеждания мемристор е:

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

Съответният PSpice код на класическия библиотечния модел на титаново-диоксиден мемристор без прозоречна функция е:

PSpice код на библиотечен модел на титаново-диоксиден мемристор без прозоречна функция с линейно йонно отместване

```
.subckt memr_w_winff a c
V_CONST1      N00513 0 DC 1.000
E_DIFF2       N00569 0 VALUE {V(N00513,X)}
E_GAIN3       N00778 0 VALUE {10E3 * V(IM)}
X_INTEG2      U PSI SCHEMATIC1_INTEG2
X_INTEG1      N00778 X SCHEMATIC1_INTEG1
E_GAIN2       N00619 0 VALUE {16E3 * V(N00569)}
R_R1         AC 1t
R_R2         C 0 1t
E_SUM1       M 0 VALUE {V(N00619)+V(N00558)}
G_ABMM1      AC VALUE { V(IM) }
E_DIFF1      U 0 VALUE {V(N00260,C)}
E_AB1        N00705 0 VALUE { 1/(V(M)) }
E_MULT1      IM 0 VALUE {V(N00705)*V(U)}
E_GAIN1      N00558 0 VALUE {100 * V(X)}
.ends memr_w_winff

.subckt SCHEMATIC1_INTEG2 in out
G_INTEG2     0 $$U_INTEG2 VALUE { V(in)}
C_INTEG2     $$U_INTEG2 0 {1/1.0}
R_INTEG2     $$U_INTEG2 0 1G
E_INTEG2     out 0 VALUE {V($$U_INTEG2)}
.IC          V($$U_INTEG2) = 0v
.ends SCHEMATIC1_INTEG2

.subckt SCHEMATIC1_INTEG1 in out
G_INTEG1     0 $$U_INTEG1 VALUE { V(in)}
C_INTEG1     $$U_INTEG1 0 {1/1.0}
```

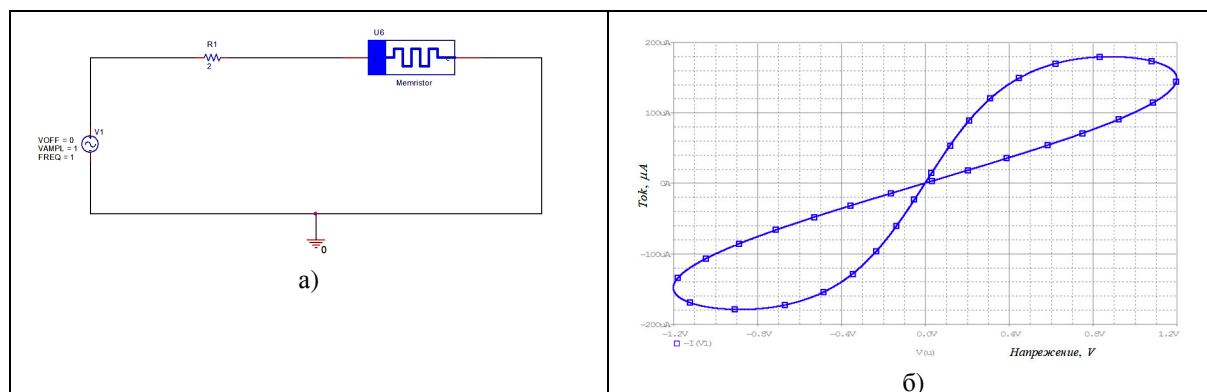


```

R_INTEG1    $$U_INTEG1 0 1G
E_INTEG1    out 0 VALUE {V($$U_INTEG1)}
.IC         V($$U_INTEG1) = 0.4
.ends SCHEMATIC1_INTEG1

```

Разработеният PSpice библиотечен мемристорен модел е изследван при синусоидален режим. Получените характеристики напрежение-ток са представени на Фиг. 3.3 за режими на меко и твърдо превключване. Резултатите са в съответствие с очакваното поведение на мемристорите и потвърждават работоспособността на изследвания PSpice библиотечен мемристорен модел и възможността за неговото приложение при изследване на мемристорни вериги.



Фиг. 3.3 (а) Схема за изследване на мемристор при синусоидално напрежение; (б) Характеристика напрежение-ток, при използване на модел без прозоречна функция

3.3. Класически титаново-диоксидни мемристорни модели

Класическите мемристорни модели на Strukov и Williams, Joglekar, Biolek, Corinto и Ascoli и Lehtonen-Laiho много често се използват при изследване на мемристорни устройства и вериги. За сравнение на резултатите, получени с предложените и с класическите модели, са разработени техни библиотечни PSpice модели.

3.4. Модифицирани мемристорни модели на база на титанов диоксид

При тези модели са използват модифицирани прозоречни функции, които отразяват по-реалистично физическите явления в мемристорите.

3.5. Изводи

В тази глава е описано разработването на PSpice библиотечни модели на титаново-диоксидни мемристори въз основа на техните математически модели. Генерирани са символните и библиотечните модели на титаново-диоксидни мемристори, с цел тяхното приложение в електронни схеми. Разгледани са най-известните класически мемристорни модели (Strukov-Williams – $K1$, Joglekar – $K2$, Biolek – $K3$, Ascoli и Corinto – $K4$, Lehtonen-Laiho – $K5$) и разработените в дисертацията модифицирани модели (Модифициран модел на Joglekar със степенен показател, зависещ от напрежението – $A1$; модифициран модел на Biolek с допълнителен синусоидален компонент в прозоречната функция – $A2$; модифициран модел на Biolek със степенен показател, зависещ от напрежението –

A3; модифициран модел с комбинирана прозоречна функция на Biolek-Joglekar със степенен показател, зависещ от напрежението – A4; модифициран модел на Lehtonen-Laiho с комбинирана прозоречна функция на Biolek-Joglekar със степенен показател, зависещ от напрежението – A5). Генерираните библиотечни модели са изследвани при синусоидален режим. Не е установено възникване на проблеми, свързани със сходимостта. Потвърдена е работоспособността на разработените библиотечни мемристорни модели за използване при анализ на електронни схеми и вериги. Установени са основните преимущества на модифицираните модели по отношение на класическите модели – по-голяма нелинейност на йонното отместване, изразяване на характеристиките състояние-поток с еднозначни криви при режим на меко превключване и използване на праг на активиране.

ГЛАВА 4. ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕМРИСТОРНИ ВЕРИГИ И УСТРОЙСТВА С ТИТАНОВО-ДИОКСИДНИ МЕМРИСТОРНИ МОДЕЛИ

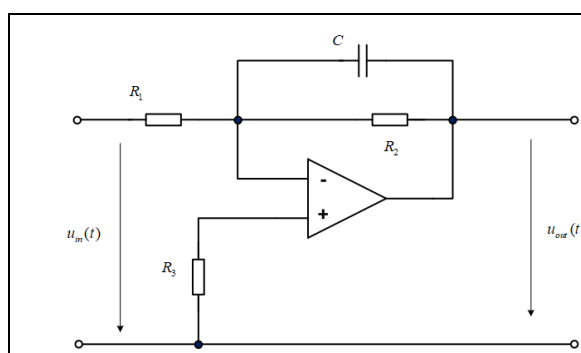
Основната цел на настоящата глава от дисертацията е изследването на мемристорни електронни устройства чрез предложените модели и сравняване на получените резултати с тези от класическите мемристорни модели, както и изследването на влиянието на температурата и паразитните параметри (собствени и взаимни индуктивности и капацитети) върху нормалното функциониране на мемристорните матрици и интегрални схеми. Потвърдени са преимуществата на авторските модели по отношение на класическите модели, тяхната работоспособност и пригодност за изследване на сложни електронни схеми и устройства и техните подобрени характеристики и работа в електронни схеми. За тази цел са разгледани няколко основни електронни схеми (прости схеми – последователна мемристорна верига, генератор с мост на Вин, паралелна мемристорна верига, интегриращи устройства, мемристорен перцептрон, и сложни електронни схеми – невронни мрежи, пасивни и хибридни мемристорни паметни) при режим на меко превключване и в режим на твърдо превключване, при което се изследват превключващите свойства на мемристорните модели и техните особености.

4.1. Прости мемристорни вериги

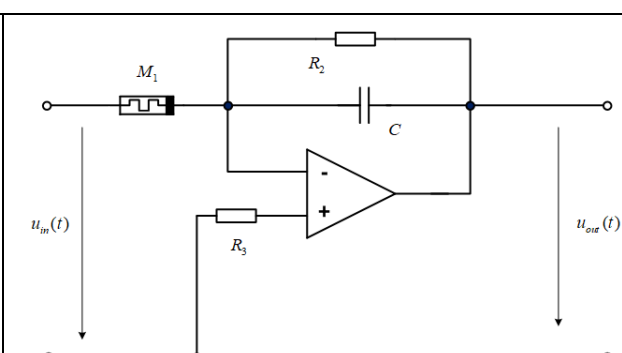
В тази секция се изследват електронни устройства (последователни и паралелни вериги, генератор, интегриращи устройства, мемристорен перцептрон) с мемристори, с прилагане на разработените модели и с класическите мемристорни модели. Направена е съпоставка на резултатите и са установени основните преимущества на предложените модели по отношение на класическите мемристорни модели. Потвърдена е работоспособността на модифицираните модели при функциониране в прости електронни схеми и устройства.

4.1.4. Интегриращи схеми с мемристор

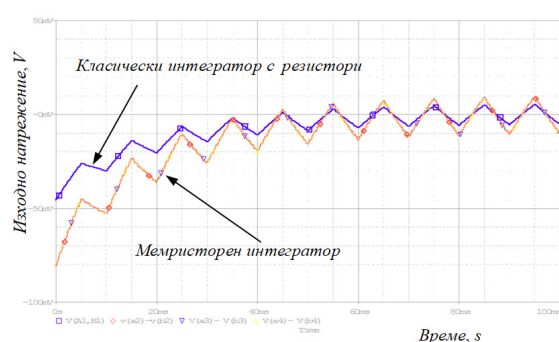
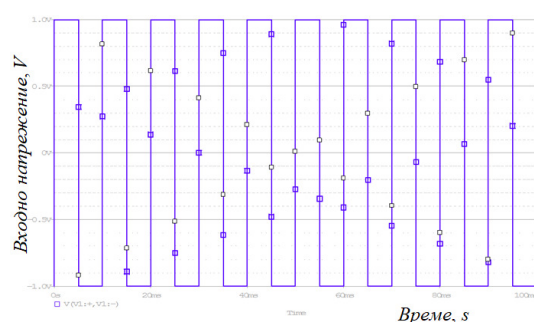
Интегриращите схеми са важни и широко прилагани модули в множество сложни радиоелектронни схеми. Развитието на техните нови схемни решения и проектиране е свързано основно с техните универсални приложения в електрониката. Целта на изследването в този параграф е анализ на предложеното мемристорно-базирано интеграторно устройство с операционен усилвател с предложените в дисертацията нови мемристорни модели и с класическите модели и да се направи съпоставка на резултатите. Анализиранията схема се основава на класическия интегратор с резистори и кондензатори и с операционен усилвател. В предложената схема резисторът, отговарящ за интегриращите процеси, се заменя с един мемристор. На Фигури 4.17, 4.18 са показани схеми на интегратор с резисторно-кондензаторна верига и съответния му мемристорен аналог. Времедиаграмите на входното и изходното напрежения са дадени на Фиг. 4.19.



Фиг. 4.17. Класическа схема на интегратор с операционен усилвател, резистори и кондензатор



Фиг. 4.18. Интегратор с мемристор, базиран върху класическата схема



Фиг. 4.19 (а) Диаграма на входното напрежение; (б) Диаграма на изходното напрежение

4.2. Изследване на физични зависимости и паразитни параметри на титаново-диоксидния мемристор

В тази секция се изследва влиянието на температурата върху поведението на титаново-диоксидния мемристор в електрическо поле, по-конкретно зависимостта на подвижността на токоносителите в мемристора от температурата, неговите съпротивления при включено и изключено състояние, скоростта на дифузионните процеси между легирания и нелегиран участък на мемристора,

както и паразитните параметри на мемристорите, организирани в мемристорни матрици и интегрални схеми с ултраголяма степен на интеграция (ULSI). Такъв тип изследвания не са намерени в литературата, поради което в тази секция са разгледани тези проблеми. При организирането на мемристорите в мемристорни матрици, представляващи интегрални схеми със свръхвисока степен на интеграция, при процесите на функциониране и разсейването на топлинна енергия температурата се повишава, в резултат на близкото разположение на мемристорите един спрямо друг. Необходимо е да се оцени как трябва да бъде отчетено нейното влияние. Целта на изследването е да се покаже, че влиянието на температурата върху поведението на мемристора и по-конкретно върху подвижността на токоносителите, съпротивлението на мемристорите и дифузионните процеси в тях, както и влиянието на паразитните параметри на мемристорните матрици (собствени и взаимни капацитети и индуктивности) е незначително при моделирането на мемристорите, поради което тези допълнителни фактори могат да бъдат пренебрегнати.

Целта на това изследване е да се установи влиянието на температурата върху поведението на титаново-диоксидния мемристор в електрическо поле. За анализирането на зависимостта между подвижността на кислородните ваканции и абсолютната температура T са използвани литературни данни. От тези данни е получена апроксимираща зависимост между подвижността на кислородните ваканции и абсолютната температура на материала:

$$\mu_v = 3 \times 10^{-12} + 1 \times 10^{29} \left(-0.0005 \times T^{-18} - 0.2394 \times T^{-17} \right) \quad (4.19)$$

4.2.2. Зависимост на съпротивленията на мемристора при включено и изключено състояние от температурата

В този параграф се изследва зависимостта на съпротивленията на титаново-диоксидния мемристор при включено и изключено състояние от температурата на база на експериментални зависимости. Целта на това изследване е да се установи влиянието на температурата върху поведението на титаново-диоксидния мемристор в електрическо поле и на неговите превключващи свойства. Въз основа на експериментална зависимост между специфичната проводимост σ на аморфния титанов диоксид и абсолютната температура T , е апроксимирана съответната зависимост:

$$\lg \sigma = 5.72 \lg T - 9 \quad (4.20)$$

На базата на (4.20) е намерена зависимостта на специфичното съпротивление на титановия диоксид от температурата:

$$\begin{aligned} \lg \sigma &= 5.72 \lg T - 9 \\ \sigma &= 10^{(5.72 \lg T - 9)} \\ \rho &= \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{10^{(5.72 \lg T - 9)}} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Ако размерите на електродите са 10 nm x 10 nm и разстоянието между тях е 10 nm за съпротивленията на мемристора при изключено и включено състояние R_{OFF} и R_{ON} се получава:

$$R_{OFF} = 2.06 \times 10^{18} T^{-5.72} \quad (4.22)$$

$$R_{ON} = 6.33 \times 10^{16} T^{-6} \quad (4.23)$$

На Фиг. 4.29 са представени зависимостите между R_{OFF} и R_{ON} и температурата t^0 . Съпротивленията R_{OFF} и R_{ON} намаляват с увеличаване на температурата на мемристора. В работния температурен интервал на интегралните схеми и мемристорните матрици (-15 : 75°C) изменението на съпротивленията на мемристора R_{ON} и R_{OFF} под влияние на температурата е в сравнително широк диапазон, но във всички случаи R_{ON} има достатъчно малка стойност, а R_{OFF} – достатъчно голяма стойност, поради което мемристорът функционира правилно като електронен ключ. Поради това влиянието на температурата върху съпротивленията на мемристора може да бъде пренебрегнато при моделирането.

4.2.3. Изследване на дифузионните процеси при титаново-диоксидните мемристори

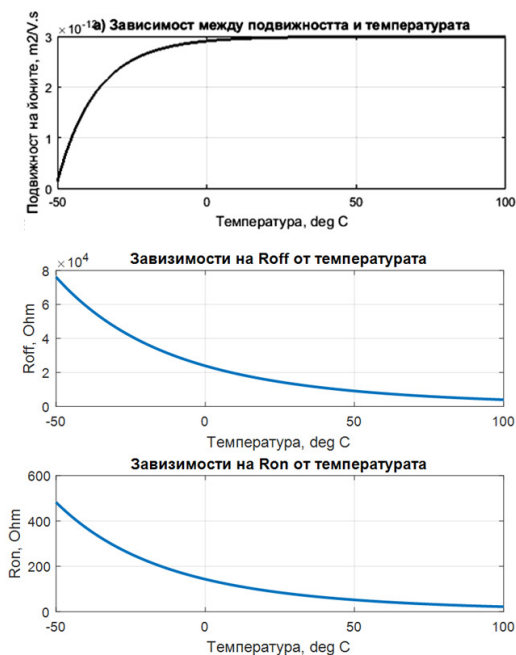
В този параграф се изследва зависимостта на скоростта на дифузията на кислородните ваканции от легирания към нелегирания слой на титаново-диоксидния мемристор от температурата. Зависимостта е получена на база на експериментални зависимости. Целта на това изследване е да се установи влиянието на температурата върху поведението на титаново-диоксидния мемристор в електрическо поле при отчитане на вътрешните дифузионни процеси в мемристора. Градиентът на концентрацията на кислородните ваканции в околност на границата между легирания и нелегирания участък на мемристора предизвиква дифузионни процеси от легирания слой към нелегираната област на мемристорния елемент, които са еквивалентни на дифузионен ток:

$$J_{V_o} = -qD_{diff} \frac{\partial N}{\partial x}, \quad (4.24)$$

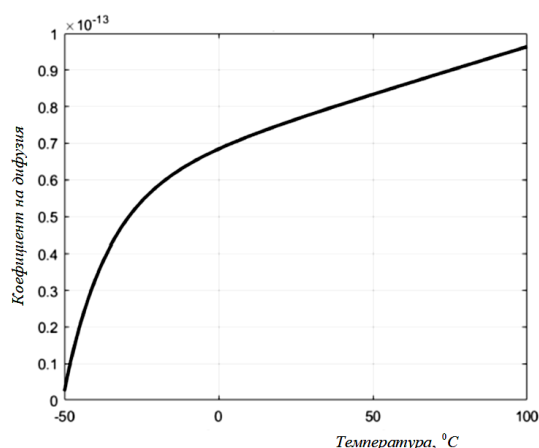
където q е зарядът на една кислородна ваканция и може да бъде записан като: $q = 2 \cdot e = 3.2 \cdot 10^{-19}$ C, D_{diff} е коефициентът на дифузия на кислородните ваканции, N е обемната концентрация на кислородните ваканции в мемристорния елемент, а $\vec{x}$ е координатата, по която доминиращо се осъществява дифузията. Коефициентът на дифузия на кислородните ваканции в обема на мемристора в зависимост от температурата е представен с (4.25):

$$D_{diff} = \frac{\mu_v k_B T}{q}, \quad (4.25)$$

където k_B е константата на Болцман и тя е равна на $1.3787 \cdot 10^{-23}$ J / K, а μ е подвижността на кислородните ваканции, която се дава с (4.1). Зависимостта между коефициента на дифузия D_{diff} и температурата t^0 , отчитайки и зависимостта на подвижността на йоните от температурата, е представена на Фиг. 4.30.



Фиг. 4.29. Зависимост между подвижността на кислородните ваканции (йоните) и температурата на мемристора; Зависимост на съпротивленията на мемристора в отворено състояние (R_{OFF}) и в затворено състояние (R_{ON}) и температурата



Фиг. 4.30. Зависимост между коефициента на дифузия на кислородните ваканции D_{diff} и температурата

Тези зависимости трябва да се отчитат, когато мемристорът функционира при различни температури на околната среда. Коефициентът на дифузия D_{diff} нараства с повишаване на температурата. Това явление може физически да се обясни с увеличаването на кинетичната енергия на кислородните ваканции и тяхното улеснено проникване от легиращия слой към обеднения на заряди (нелегиран) участък на мемристора. В работния температурен интервал на интегралните схеми и мемристорните матрици (-15 : 75 °C) коефициентът на дифузия се изменя почти линейно. Максималното изменение на коефициента на дифузия спрямо стойността му при стайна температура е около 20 %, което ще бъде отчетено при определяне на времето за съхраняване на зарядите в мемристора. Вторият закон на Фик за дифузията в мемристора е представен с (4.26):

$$\frac{\partial N_{V(O)}}{\partial t} = D_{diff} \frac{\partial^2 N_{V(O)}}{\partial x^2}, \quad (4.26)$$

където $N_{V(O)}$ е обемната концентрация на кислородните ваканции. В представения случай се развива процес на дифузия от ограничен източник на легиращ компонент – кислородни ваканции. Началните условия (концентрация на кислородните ваканции) се дават с (4.27):

$$N(t, x) = N_s, \quad t = 0, \quad x = 0, \quad (4.27)$$

където N_s е повърхностната концентрация на йоните в близост до границата между легирания и нелегирания участък. В началото на дифузионния процес за анодната граница на мемристорната структура концентрацията на кислородните ваканции е с максимална стойност N_s . Съответните гранични условия (концентрацията на легиращия компонент) се описват чрез (4.28):

$$N(t, x) = 0, \quad t > 0, \quad x \rightarrow \infty. \quad (4.28)$$

Производната на концентрацията на зарядите по отношение на времето в близост до анодната граница на мемристора се изразява с (4.29):

$$\frac{dN(x, t)}{dx} = 0, \quad t \in (0, \infty), \quad x = 0 \quad (4.29)$$

Решението на уравнение (4.26) при описаните по-горе начални и гранични условия е:

$$N_{V(O)}(x, t) = N_s^I \exp\left(-\frac{x^2}{4D_{diff}t}\right) [m^{-3}] \quad (4.30)$$

При увеличаване на времето за дифузия, концентрацията на йоните в обеднения слой намалява. Това се дължи на проникването на легиращия компонент в обема на мемристора и на обедняване на материала по отношение на кислородни ваканции. С отдалечаване от легиращия източник концентрацията на кислородните ваканции намалява. След продължителен интервал от време (около 2 години) концентрацията на легиращите йони се изравнява в целия обем на мемристора и съхранената информация се променя. При максимално изменение на коефициента на дифузия в работния температурен интервал на мемристора ($-15 : 75^\circ\text{C}$) на база на (4.25) и при условие, че стойностите на максималната и текущата обемната концентрация на йоните N_s^I и $N_{V(O)}(x, t)$ са едни и същи, се изчислява отношението на съответните времена за загуба на информацията в мемристора:

$$\frac{N_{V(O)1}(x, t)}{N_{V(O)2}(x, t)} = \frac{N_s^I}{N_s^I} \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4D_{diff1}t_1}\right)}{\exp\left(-\frac{x^2}{4D_{diff2}t_2}\right)} = 1 \quad (4.31)$$

След преработка на (4.31) се получава:

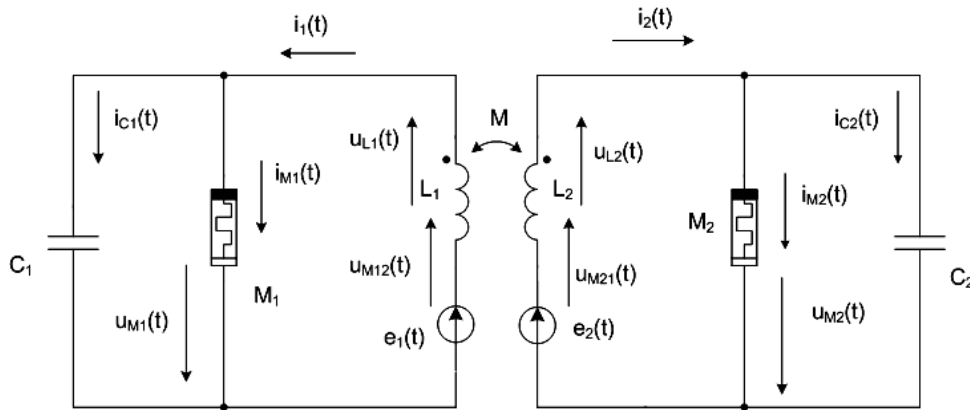
$$t_2 = \frac{D_{diff1}}{D_{diff2}} t_1 \approx 0.8 t_1, \quad (4.32)$$

т.е. времето за загуба на информацията в мемристора в работния температурен интервал се намалява с около 20 %, което по отношение на времето за загуба на информацията при стайна температура (2 години) практически може да бъде пренебрегнато при моделирането на титаново-диоксидните мемристори.

4.2.4. Изследване на собствените и взаимните индуктивности и капацитети между елементите на мемристорна матрица

В този параграф е направено подробно изследване на влиянието на паразитните параметри на мемристора (собствени индуктивност и капацитет) и на взаимните паразитни параметри на една мемристорна матрица (взаимни индуктивности и капацитети) между елементите върху функционирането на мемристорите в интегрални схеми с ултраголяма степен на интеграция (ULSI).

Коефициентът на взаимна индукция между мемристорните елементи M е почти равен на всяка от собствените индуктивности, поради близкото разположение на елементите в мемристорната матрица и практически пълното обхващане на магнитния поток от двете платинени шини на съседните мемристори – Фиг. 4.31. Коефициентът на връзката k има стойност, близка до единица. В изследването са приложени три стойности на k : $k=0.90$, $k=0.95$ и $k=0.99$.



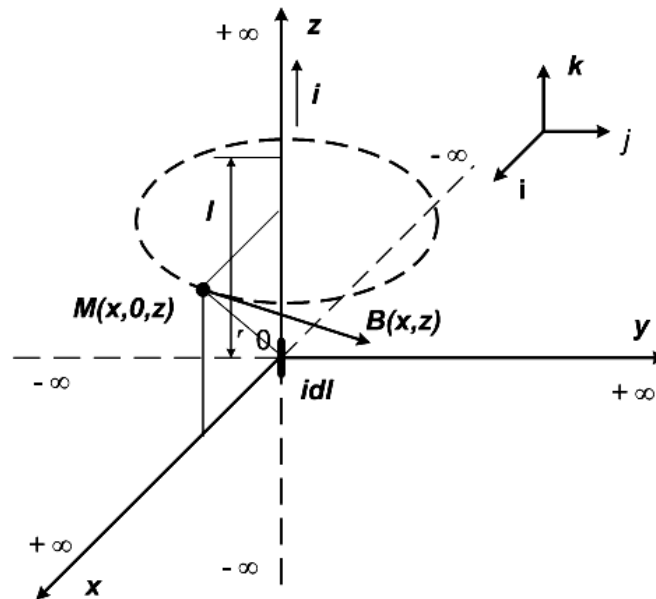
Фиг. 4.31. Електрическа заместваща схема на фрагмент от мемристорна матрица, съдържаща два съседни мемристора, и съответните паразитни параметри – индуктивности и капацитети

Капацитетите C_1 и C_2 се изчисляват като капацитет на плосък кондензатор. Паразитният капацитет представлява комбинация от двата капацитета на легираната и нелегираната области, свързани последователно. Стойностите на относителната диелектрична проницаемост на легираните и нелегирани области на мемристора (ϵ_{r1} и ϵ_{r2}) съответно са 170 и 150. Ширината на мемристорните електроди a е 10 nm. Дължините на легираните (D_1) и нелегираните (D_2) области на мемристора са $D_1 = w_1 = 1$ nm, и $D_2 = D_1 - w_1 = 9$ nm. Еквивалентният капацитет между мемристорните електроди се дава с (4.33):

$$C_{par} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{a^2}{D_1} \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{a^2}{D_2}}{\epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{a^2}{D_1} + \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{a^2}{D_2}} = 1 \times 10^{-17} \text{ F} \quad (4.33)$$

Паразитната собствена индуктивност се изчислява с решаване на определен двустранен интеграл и използването на теорията на електромагнитното поле. Проводник с крайна дължина l е разположен върху z -оста. При изчисленията се

допуска, че през проводника преминава постоянен ток i . В центъра на декартовата координатна система е поставен токов елемент idl (Фиг. 4.32)]. Индукционните линии на магнитното поле са концентрични окръжности, които са разположени в равнини, успоредни на координатната xOy равнина.



Фиг. 4.32. Триизмерна координатна система, използвана за получаване на коефициента на собствена индуктивност на мемристора от титанов диоксид

Като се вземат предвид дължините на съответните мемристорни електроди, за собствената индуктивност на мемристорния елемент се получава (4.40):

$$L = \left| \frac{\Phi}{i} \right| = \left| \frac{\frac{\mu_0 i}{4} l}{i} \right| = \frac{\mu_0}{4} l = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{4} \times 0,03 = 9,4248 \times 10^{-9} \text{ H} = 9,4 \text{ [nH]} \quad (4.40)$$

Паразитната индуктивност на мемристорния елемент в центъра на анализирания мемристорна матрица памет е $L = 9.4 \text{ nH}$.

От направените анализи се установява, че паразитните параметри (собствени и взаимни индуктивности и капацитети) на мемристорните матрици имат много ниски стойности, по отношение на съответните паразитни параметри при CMOS интегралните схеми, поради което те могат да не бъдат отчитани при моделирането на мемристорите в работния температурен и честотен интервал на интегралните схеми и мемристорните матрици.

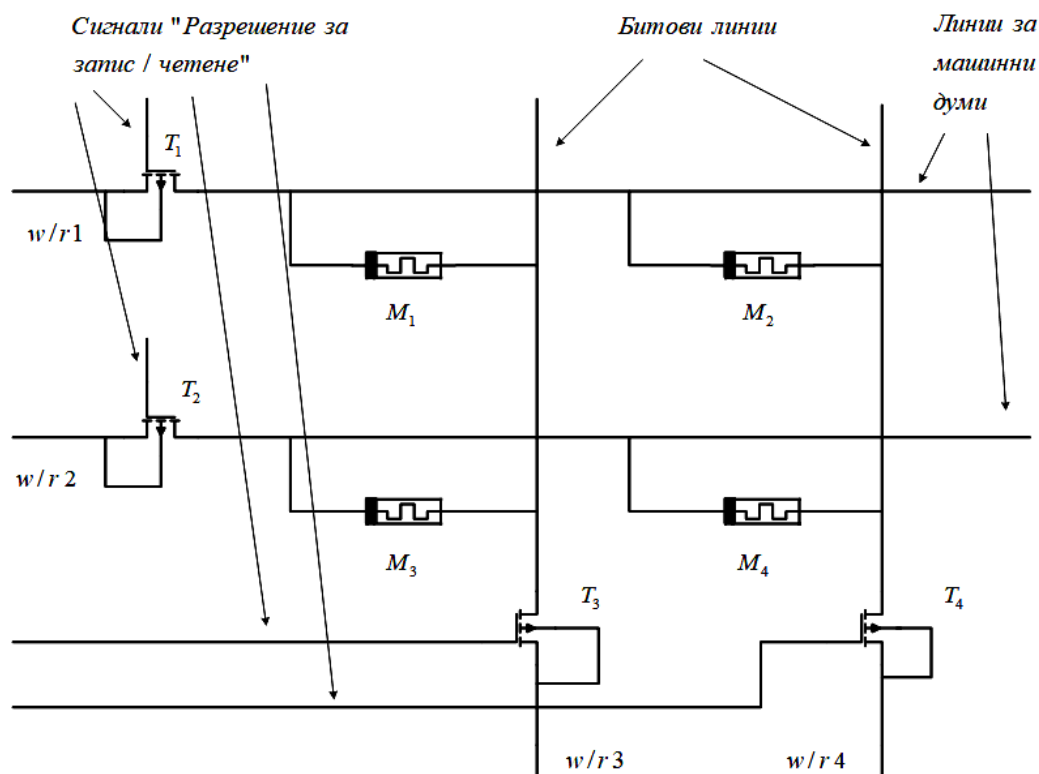
4.3. Сложни мемристорни вериги

Целта на настоящите изследвания е анализирането на невронни мрежи и памет с мемристори с помощта на модифицираните модели и класическите мемристорни модели и съпоставка на резултатите, с оглед изразяване на особеностите и преимуществата на модифицираните мемристорни модели пред класическите модели на титаново-диоксидни мемристори.

4.3.5. Хибридна памет с превключваеми съпротивления

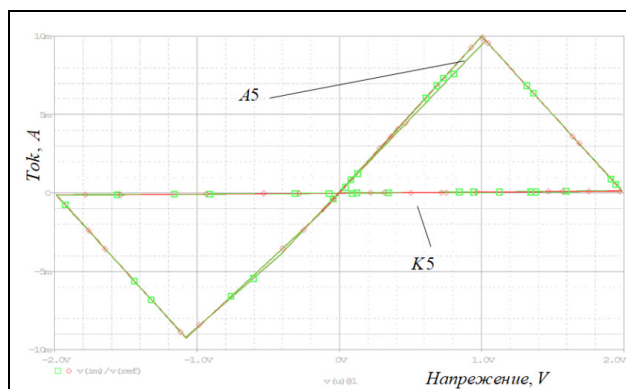
Целта на този анализ е да се изследва хибридна памет с модифицираните модели и с класическите мемристорни модели и да се съпоставят характеристиките им при функциониране в импулсен режим.

На Фиг. 4.46 е показан фрагмент от схемата памет с превключване на съпротивлението, с четири мемристорни клетки и няколко разделителни MOS транзистора. Селектирането на съответните елементи на паметта позволява да се съхранява един бит информация – логическа единица или логическа нула в паметта. MOS транзисторите се използват за елиминиране на паразитните токови пътища между битовите електроди и съответните линии за думи. Сигналите за разрешаване на запис и четене се прилагат към гейтовите електроди на съответните MOS транзистори и по този начин се селектира целевият елемент от паметта. За запис на логическа единица се прилага положителен импулс на напрежение към съответния мемристор. За записване на логическа нула се използва отрицателен сигнал.

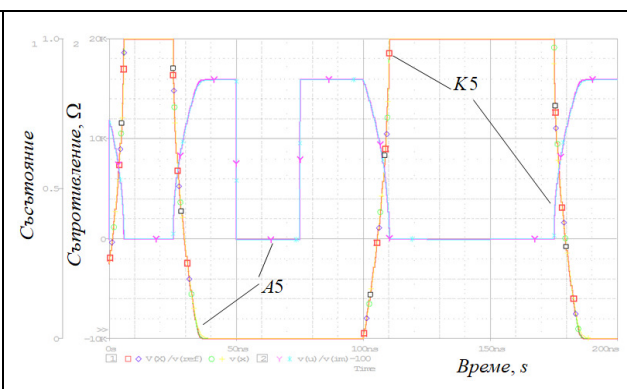


Фиг. 4.46. Фрагмент от хибридна мемристорна памет с превключване на съпротивлението

Потенциалите на сорс-електродите на MOS транзисторите T_1 и T_3 , са импулси с различни нива и полярности. След сравнение на зависимостите ток-напрежение на мемристорния елемент, получени чрез използването на приложения модел $A3$ и класическия модел $K5$ е установено сравнително добро сходство между тях. Характеристиката напрежение-ток е дадена на Фиг. 4.47. Времевите диаграми на променливата на състоянието и съпротивлението на мемристорния елемент M_1 са представени на Фиг. 4.48.



Фиг. 4.47. Характеристики напрежение-ток на мемристорите



Фиг. 4.48. Време-диаграми на състоянието и съпротивлението на мемристорите

4.4. Изводи

В тази глава са изследвани мемристорни електронни устройства чрез предложените подобрени мемристорни модели и е извършено сравнение на получените резултати с тези от най-добрите класически мемристорни модели. Потвърждава се работоспособността на модифицираните мемристорни модели и тяхната пригодност при изследване на сложни електронни схеми и устройства, както и техните подобрени характеристики и поведение в такива схеми. За тази цел са разгледани няколко основни прости електронни схеми (последователни и паралелни вериги, генератор с мост на Вин, интегриращо устройство, мемристорен перцептрон) и сложни електронни схеми (неврони и невронни мрежи, мемристорни матрици – пасивни и активни памети) при работа в режим на меко превключване и в режим на твърдо превключване, при което се изследват превключващите свойства на моделите и техните особености. При изследванията е потвърдено пренебрежимо малкото влияние на температурата и паразитните параметри (собствени и взаимни индуктивности и капацитети) върху нормалното функциониране на мемристорните матрици и (ULSI) интегрални схеми. Основните предимства на предложените мемристорни модели (функциониране при високи честоти) са свързани с използването на прозоречни функции с повишена нелинейност, които подобряват представянето на модела на мемристора за по-високи напрежения и честоти и се избягват някои проблеми с липсата на сходимост. При проведените анализи е установено пренебрежимо малкото влияние на температурата, дифузията и паразитните параметри (собствени и взаимни индуктивности и капацитети) на мемристорите върху нормалното функциониране на мемристорните матрици и интегрални схеми.

ГЛАВА 5. МОДЕЛИ НА ХАФНИЕВО-ДИОКСИДНИ МЕМРИСТОРИ

В глава 5 се прилага предложената в Глава 2 методология за реалистично моделиране на физическите явления във хафниево-диоксидните мемристори чрез използване на модифицирани прозоречни функции и настройка на техните параметри. Изследва се поведението на разработените модифицирани мемрис-

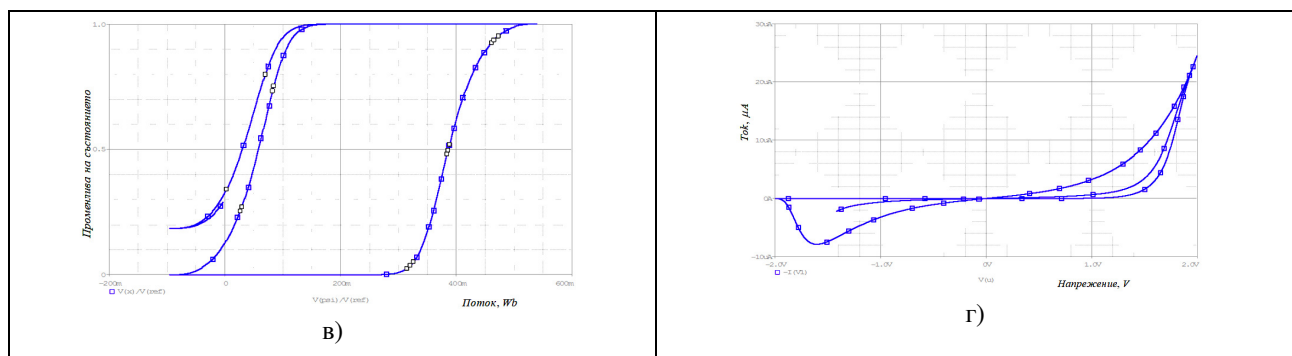
торни модели: модел на Lehtonen-Laiho с модифицирана прозоречна функция на Biolek с допълнителен синусоидален компонент (модел A6), модел на Lehtonen-Laiho с модифицирана прозоречна функция на Biolek със степенен показател, зависещ от напрежението (модел A7), модел на Lehtonen-Laiho с модифицирана прозоречна функция на Joglekar с допълнителен синусоидален компонент (модел A8).

5.1. Опростен модел на хафниев-диоксиден мемристор, базиран на модела на Lehtonen-Laiho и модифицирана прозоречна функция на Biolek с допълнителен синусоидален компонент (модел A6)

Уравненията, описващи модела A6, са базирани на модела на Lehtonen-Laiho и модифицирана прозоречна функция на Biolek с допълнителен синусоидален компонент:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= a \cdot \left[\frac{1 - (x-1)^{2p}}{1+m} + \frac{m [\sin^2(\pi x)]}{1+m} \right] \cdot u^s, \quad u(t) \leq -u_{thr} \\ \frac{dx}{dt} &= a \cdot \left[\frac{1 - x^{2p}}{1+m} + \frac{m [\sin^2(\pi x)]}{1+m} \right] \cdot u^s, \quad u(t) > u_{thr} \\ \frac{dx}{dt} &= 0, \quad -u_{thr} < u(t) \leq u_{thr} \\ i &= x^n \beta \sinh(\alpha u) + \chi [\exp(\gamma u) - 1] \end{aligned} \quad (5.4)$$

Характеристиките състояние-поток и напрежение-ток са дадени на Фиг. 5.2 в), г) за режим на твърдо превключване. В този случай характеристиката напрежение-ток е несиметрична крива.



Фиг. 5.2 (в) Характеристика състояние-поток; (г) Характеристика напрежение-ток

5.2. Модел на хафниев-диоксиден мемристор с модифицирана прозоречна функция на Biolek с показател, зависещ от напрежението (модел A7)

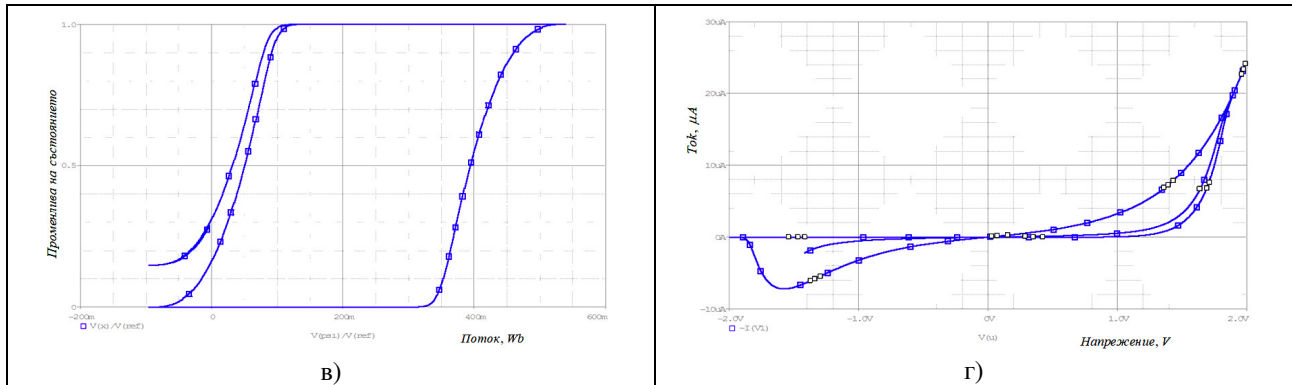
Уравненията, описващи този модел, са базирани на модела на Lehtonen-Laiho и модифицирана прозоречна функция на Biolek със степенен показател, зависещ от напрежението върху мемристора:

$$i = x^n \beta \sinh(\alpha u) + \chi [\exp(\gamma u) - 1]$$

$$\frac{dx}{dt} = a \cdot \left[1 - [x - \text{stp}(-i)]^{2p} \right] \cdot u^s \quad (5.6)$$

$$p = \text{round} \left(\frac{b}{|u| + c} \right)$$

Характеристиките състояние-поток и напрежение-ток са дадени на Фиг. 5.5 в), г). В този случай характеристиката напрежение-ток е несиметрична, а зависимостта състояние-поток е хистерезисна нееднозначна крива.



Фиг. 5.5 (в) Характеристика състояние-поток; (г) Характеристика напрежение-ток

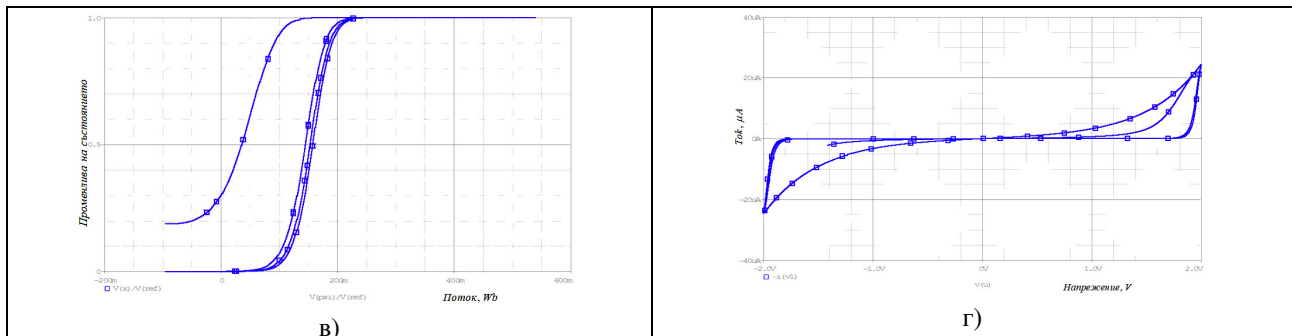
5.3. Модел на хафниево-диоксиден мемристор с модифицирана прозоречна функция на Joglekar със синусоиден компонент (модел A8)

Уравненията, описващи модела A8, са базирани на модела на Lehtonen-Laiho и модифицирана прозоречна функция на Joglekar с допълнителен синусоиден компонент:

$$i = x^n \beta \sinh(\alpha u) + \chi [\exp(\gamma u) - 1] \quad (5.8)$$

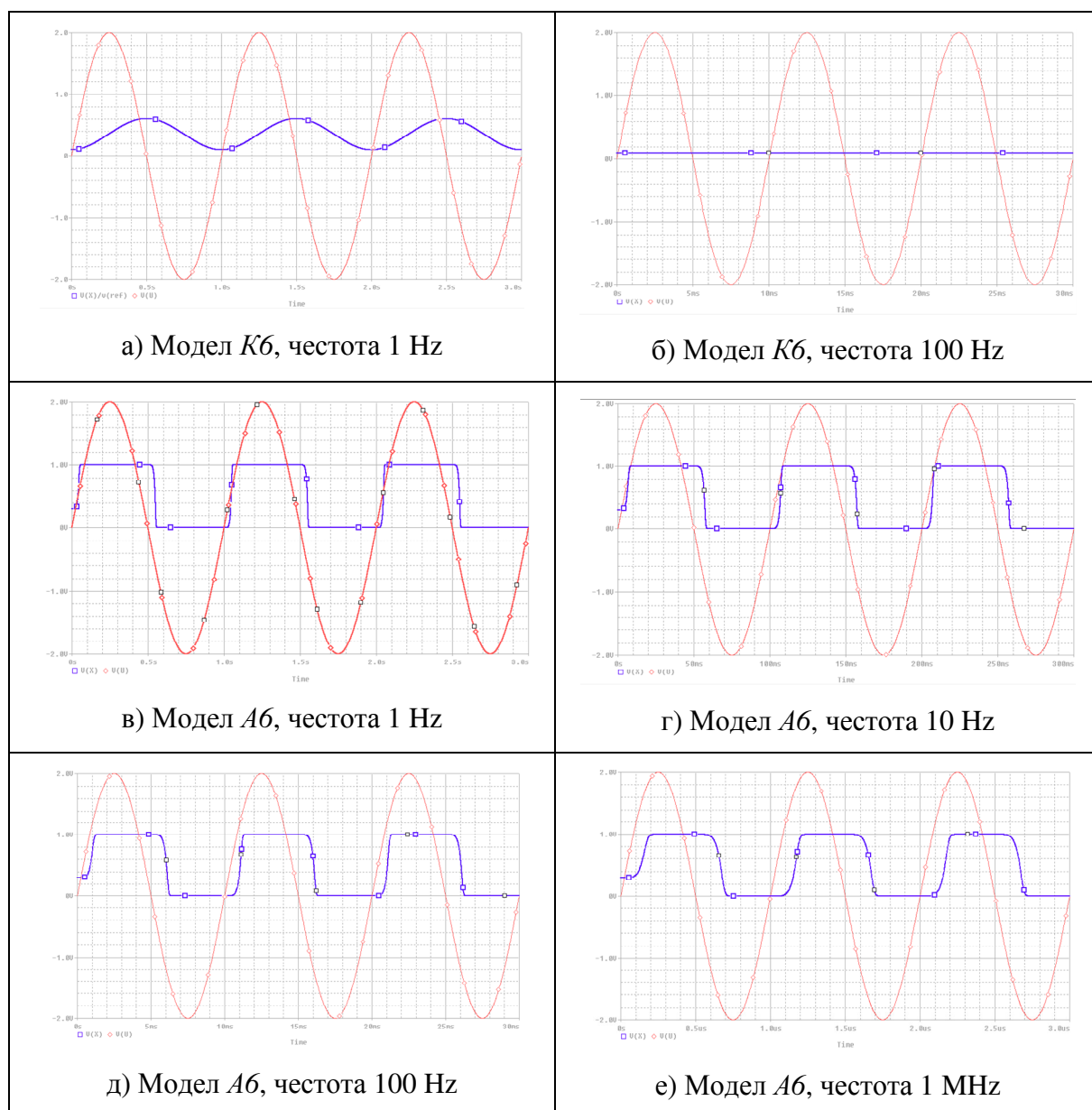
$$\frac{dx}{dt} = a \cdot \left[\frac{d \cdot f_J(x) + g \cdot \sin^2(\pi x)}{d + g} \right] \cdot u^s$$

Характеристиките състояние-поток и напрежение-ток са дадени на Фиг. 5.8 в), г) за режим на твърдо превключване. В този случай характеристиката напрежение-ток е несиметрична крива.



Фиг. 5.8 (в) Характеристика състояние-поток; (г) Характеристика напрежение-ток

Моделите $K6$ и $K7$, както и предложените модели $A6$, $A7$ и $A8$, са изследвани при синусоиден режим при различни честоти. Класическите модели $K6$ и $K7$ дават сходни резултати, затова са представени само тези, получени при анализа на модела $K6$. Аналогично е установено, че моделите $A6$, $A7$ и $A8$ дават сходни помежду си резултати, затова е изследван моделът $A6$. Резултати от изследването на моделите $K6$ и $A6$ при синусоиден режим, амплитуда $2V$ и при различни честоти са показани на Фиг. 5.10. Забелязва се, че моделът $K6$ работи в режим на меко превключване при честота 1 Hz , докато при честота 100 Hz той не променя състоянието си, т.е. не превключва. За разлика от него, моделът $A6$ работи в режим на твърдо превключване и при много високи честоти – Фиг. 5.10 (е). Това е основното преимущество на предложените модели $A6$, $A7$ и $A8$ по отношение на моделите $K6$ и $K7$.



Фиг. 5.10. Функциониране на моделите $K6$ и $A6$ при различни честоти – времедиаграми на напрежението и на променливата на състоянието

5.4. Изводи

В тази глава са описани три модифицирани и подобрени мемристорни модели на хафниево-диоксидни мемристори. Те са базирани на нелинейния модел на Lehtonen – Laiho в комбинация с предложени в дисертацията модифицирани прозоречни функции. Предложените модели са изследвани при синусоидален сигнал, в режими на меко и твърдо превключване. Установена е тяхната добра точност след настройка според експериментална характеристика ток-напрежение. В табл. 5.4 е направена съпоставка на предложените модели на хафниево-диоксидни мемристори по различни критерии за сравнение на тяхното поведение и особености, които са дефинирани в секция 2.7.

Табл. 5.4. Съпоставка на модифицираните и класическите хафниево-диоксидни мемристорни модели по тяхното поведение в електрическо поле и по техните особености

Модели	<i>K6</i>	<i>K7</i>	<i>A6</i>	<i>A7</i>	<i>A8</i>
Нива на сигналите	ниски	средни	произволни	произволни	произволни
Нелинейност	средна	висока	висока	висока	висока
Отразяване на граничните ефекти	не	да	да	да	да
Честоти на превключване	ниски честоти	ниски и средни честоти	всички честоти	всички честоти	всички честоти
Режими на функциониране	меко превключване	меко превключване	меко и твърдо превключване	меко и твърдо превключване	меко и твърдо превключване
Точност	ниска	задоволителна	висока	висока	Висока
Използване на праг на активиране	да	да	да	да	да
Възможност за настройка на модела	частична	частична	да	да	да
Изразяване на несиметрични характеристики напрежение-ток	частично	да	да	да	да
Отразяване на зависимостта на нелинейното йонно отместване от напрежението	не	не	частично	да	не
Коректно представяне на характеристиката състояние-поток	не	частично	да	да	да
Приложимост	аналогови и цифрови устройства	аналогови и цифрови устройства, невронни мрежи	аналогови и цифрови устройства, невронни мрежи, памети	аналогови и цифрови устройства, невронни мрежи, памети	аналогови и цифрови устройства, невронни мрежи, памети

ГЛАВА 6. РАЗРАБОТВАНЕ НА PSpICE БИБЛИОТЕКИ С ХАФНИЕВО-ДИОКСИДНИ МЕМРИСТОРНИ МОДЕЛИ

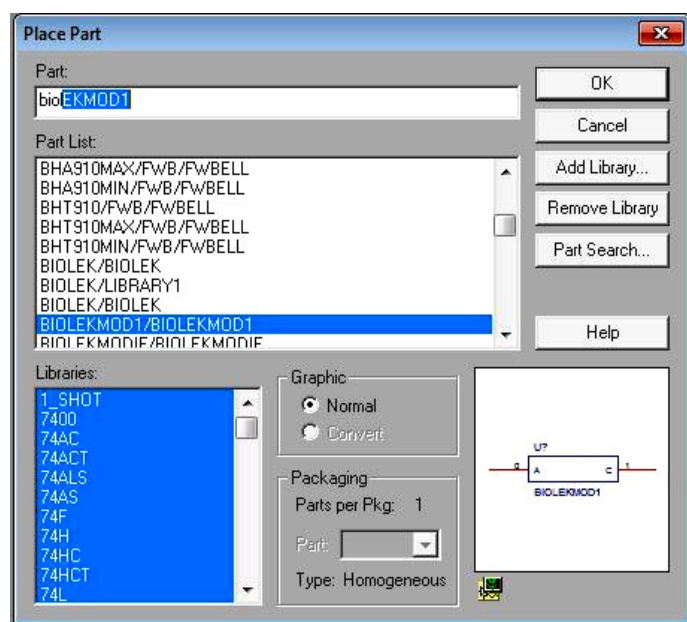
В тази глава е описано създаването на PSpice библиотечни модели на хафниево-диоксидни мемристори въз основа на техните математически модели. Генерирани са символните и библиотечните модели на хафниево-диоксидни мемристори, с цел прилагането им в електронни схеми и съпоставка на резултатите.

6.1. Създаване на PSpice модели на хафниево-диоксидни мемристори

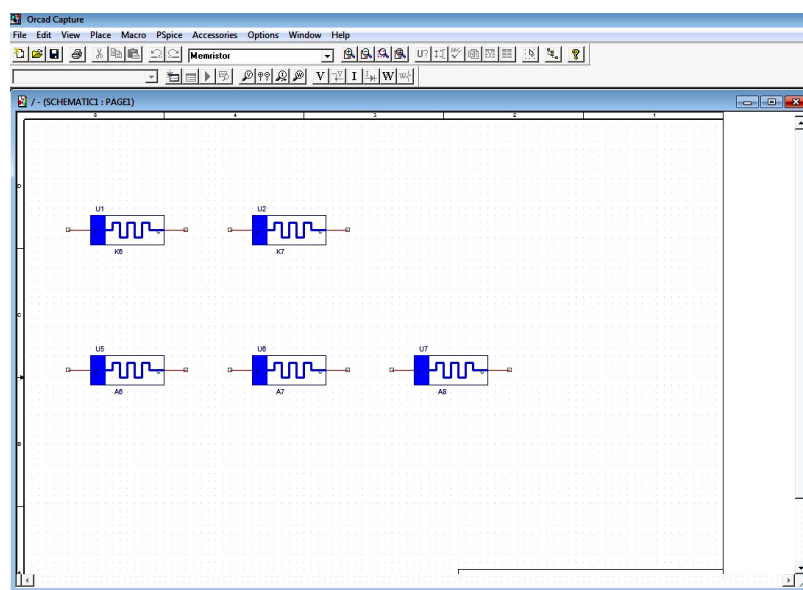
В тази секция са описани библиотеките на PSpice моделите на хафниево-диоксидни мемристори, разработени във връзка с дисертацията. Създаването на библиотеките на мемристорните модели се извършва в среда на PSpice. Тези модели се генерират на базата на математическите модели, които описват поведението на мемристора в електрическо поле. Математическите операции според уравненията на модела се описват в заместващата схема чрез използване на стандартните блокове и функции на PSpice. Изхожда се от уравнението на състоянието на мемристора, като се започва създаването на заместваща схема. Променливата на състоянието участва в прозоречната функция, в дясната част на уравнението на състоянието. Токът се изразява от първото уравнение на системата, описваща модела, като функция на напрежението и състоянието. След получаване на производната на променливата на състоянието по отношение на времето се използва интегриращ блок със зададено начално условие – стойността на променливата на състоянието. Чрез използване на обратна връзка заместващата схема се завършва, като променливата на състоянието се замества в първото уравнение на системата, описваща модела на мемристора. Потокът се получава от изхода на интегриращ блок, като на неговия вход се подава сигналът на напрежението върху мемристора.

Симулацията се извършва във времевата област, като стъпката на дискретизация на времето се избира съгласно изискванията за максимална точност на резултатите, т.е. тя трябва да бъде много малка величина по отношение на избраното време за симулация на схемата. За източник на сигнал се използва източник на синусоидално напрежение VSIN. Протичащият през мемристора ток се получава чрез свързване на източник на ток, управляван чрез сигнал, пропорционален на тока през мемристора – библиотечен елемент ABM, паралелно на източника на напрежение. Изводите на мемристора в получения код се заместват с означения за анод и катод.

Полученият код започва с командата .SUBCKT MEMRISTOR A C, следва описанието на заместващата схема, в което е указано конкретно свързването на използваните елементи между възлите на схемата. Кодът завършва с командата .ENDS. Полученият код се използва за създаването на библиотечен модел чрез инструмента MODEL EDITOR на PSpice. Библиотечният елемент на мемристор се добавя към останалите библиотеки в PSpice. Библиотеката на разработваните модели е показана на Фиг. 6.1. Символните означения на разработените мемристорни модели са дадени на Фиг. 6.2.



Фиг. 6.1. Библиотека на разработените модели



Фиг. 6.2. Символни означения на разработените класически и модифицирани хафниево-диоксидни мемристорни модели

6.2. Създаване на PSpice модели на хафниево-диоксидни мемристори

В тази секция са описани библиотеките на PSpice моделите на хафниево-диоксидни мемристори, разработени във връзка с дисертацията.

6.3. Класически хафниево-диоксидни мемристорни модели

С цел да бъдат сравнени резултатите, получени с модифицираните модели, са разработени техни библиотечни PSpice модели и на разработените класически модели *K6* и *K7*.

6.4. Изводи

В тази глава е описано разработването на Pspice библиотечни модели на хафниево-диоксидни мемристори въз основа на техните математически модели. Генерирани са символните и библиотечните модели на хафниево-диоксидни мемристори, с цел тяхното приложение в електронни схеми. Разгледани са основните класически мемристорни модели: Модел без прозоречна функция (Класически модел $K6$), Модел с нелинейна прозоречна функция (Класически модел $K7$), и три предложени в дисертацията мемристорни модела: модел, базиран на характеристиката ток-напрежение на Lehtonen-Laiho в комбинация с модифицирана прозоречна функция на Biolek с допълнителен синусоидален компонент (модел $A6$); модел, базиран на модела на Lehtonen-Laiho с модифицирана прозоречна функция на Joglekar-Biolek със степенен показател, зависещ от напрежението (модел $A7$); модел базиран на модела на Lehtonen-Laiho с модифицирана прозоречна функция на Joglekar с допълнителен синусоидален компонент (модел $A8$). Генерираните библиотечни модели са изследвани при синусоидален и импулсен режим. Не е установено възникване на проблеми, свързани със сходимостта и е потвърдена работоспособността на разработените библиотечни мемристорни модели за използване при анализ на електронни схеми и вериги. Установени са основните преимущества на модифицираните модели по отношение на класическите – функциониране при високи честоти, засилена нелинейност на йонното отместване, изразяване на характеристиките състояние-поток с еднозначни криви и използване на праг на активиране на мемристорите.

ГЛАВА 7. ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕМРИСТОРНИ ВЕРИГИ И УСТРОЙСТВА С ХАФНИЕВО-ДИОКСИДНИ МЕМРИСТОРИ

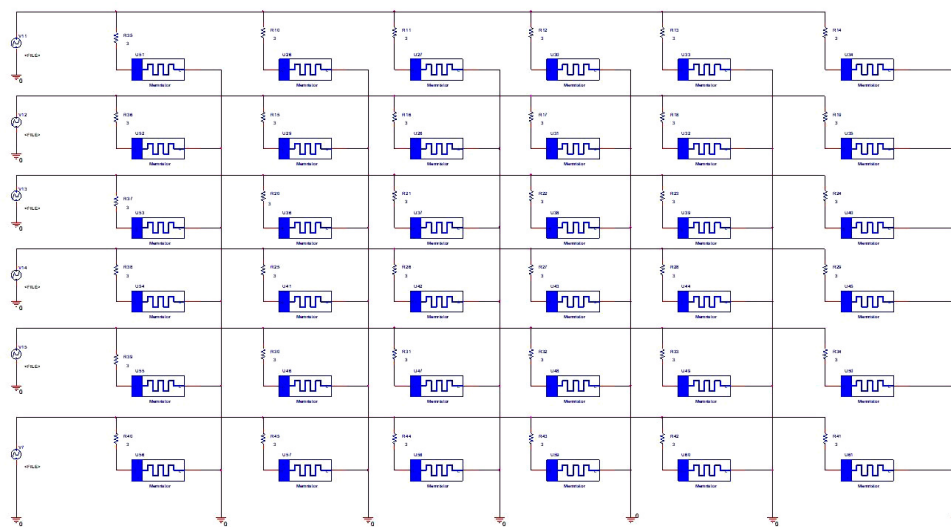
Основната цел на настоящата глава от дисертацията е изследването на мемристорни електронни устройства чрез предложените модели на хафниево-диоксидни мемристори и сравняване на получените резултати с тези от класическите модели.

7.1. Анализ на пасивна мемристорна матрица-памет

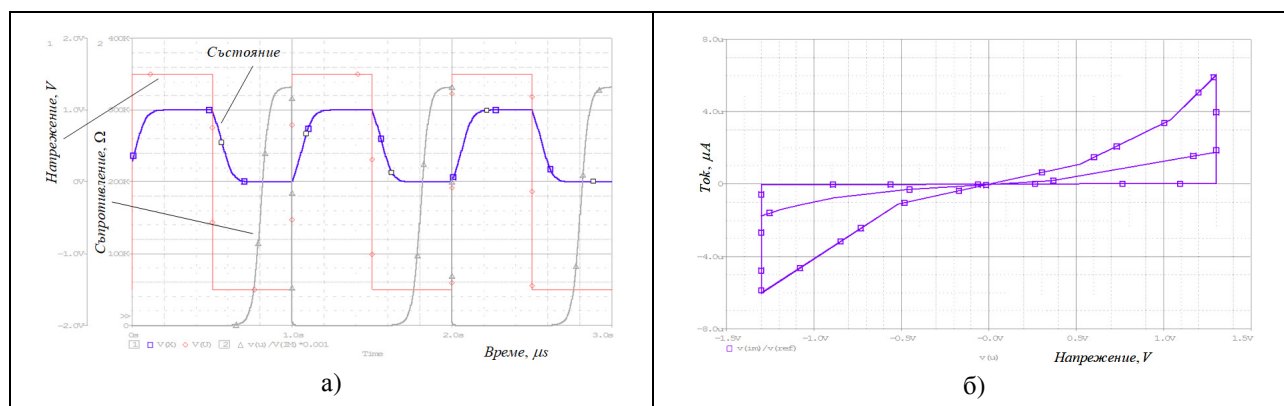
На Фиг. 7.4 е представена част от схема на пасивна мемристорна матрица памет от ULSI интегрална схема. Работните процедури са много сходни с описаните за хибридна памет.

Съответните времеви диаграми на съпротивлението на мемристора, на променливата на състоянието и напрежението и съответните характеристики ток-напрежение са представени на Фиг. 7.5 а). Забелязва се, че променливата на състоянието и съпротивлението на мемристора се изменят в много широк диапазон, а режимът съответства на състояние на твърдо превключване. На Фиг. 7.5 б) е показана характеристиката напрежение-ток на мемристорите, отговаряща на режим на твърдо превключване. В настоящия случай паразитните пътища на токовете не оказват силно влияние върху правилното функциониране

на устройството памет. Сравнението между единичен мемристорен елемент памет, $1T1R$ клетка и $10T25R$ схема от паметта се прави в съответствие с няколко основни параметри и характеристики. Единичната клетка на мемристора има най-голям диапазон на изменение на съпротивлението.



Фиг. 7.4. Пасивна мемристорна матрица памет 6 x 6



Фиг. 7.5 (а) Времеви диаграми на напрежението на мемристора, променливата на състоянието и съпротивлението, според модела на мемристора с модифицирана прозрачна функция на Biolek; (б) Зависимост ток-напрежение на мемристорите за пасивната матрица по време на процесите на запис и четене на информация – A_6

За матрица памет с множество мемристори, произведени при едни и същи химически и физически процеси и условия на производство, се прогнозира стабилността на параметрите и съответната надеждност да бъдат по-високи от тези на единичните мемристорни прототипи. Анализите са направени с компютърна система с процесор Intel Core i5, 2.5 GHz, 8 GB RAM. Съответните времена на симулация за приложените модели K_6 , K_7 , A_6 и A_7 са съответно: $t_J = 0.8935$ s, $t_B = 0.9127$ s, $t_{MJ} = 1.0564$ s, $t_{MB} = 0.9959$ s. Моделите с модифицирани прозрачни функции изискват малко по-дълго време за симулация от моделите K_6 и K_7 , поради увеличения брой операции. Като се има предвид сегашното развитие на технологиите това увеличено време на симулация не повлиява съществено анализа на мемристорните вериги. Предимство на приложените модифицирани модели A_6 и A_7 е намалената относителна средна квадратична

грешка по отношение на моделите $K6$ и $K7$. Друго предимството на използваните модели, заедно с използваните модифицирани прозоречни функции, в сравнение с модела на Pickett е наблюдаваната по-добра сходимост на изчислителните процедури. Преимущество на приложените мемристорни модели е използването на допълнителни силно нелинейни прозоречни функции, които правят възможно реалистичното представяне на процесите на превключване при високи честоти.

7.2. Изследване на многослойна невронна мрежа с мемристорни синапсиси

Основната цел тук е да се изследва процесът на обучение на многослойна мемристорна невронна мрежа с използване на мемристорен модел $A6$. Невронната мрежа, представена на Фиг. 7.6, съдържа 5 неврона в скрития слой и един нелинеен неврон в изходния слой. Принципът ѝ на обучение се основава на право предаване на сигнала и обратно разпространение на грешката. Тя е изследвана с модела $A6$ и с най-използваните класически хафниеве-диоксидни мемристорни модели и е извършена съпоставка между резултатите, като са оценени преимуществата на приложения модел $A6$.

Разглежданата многослойна невронна мрежа е приложена за функционално адаптиране на входния сигнал x по отношение на желания сигнал d . Входният сигнал, приложен към невронната мрежа във времевата област, е: $x = 0.055 (1 - \exp(t + 0.4)) + 0.03 \exp(-5t) \sin(2\pi 20t)$, V, който е дискретизиран чрез цифров сигнал с честота 50 Hz. Съответният желан сигнал, който трябва да се получи на изхода на невронната мрежа, е: $d = 0.025 [1 - \exp(1.5t)] - 0.17$ V. Той е дискретизиран със същата честота, както и входния сигнал.

Синапсите в невронната мрежа са базирани на мемристори и са реализирани по мостова схема – Фиг. 7.6. Този тип синапсиси могат да съхраняват тегла както с положителна, така и с нулева и отрицателна стойност, благодарение на реализацията по мостова схема. Теглото на синапсиса зависи от съпротивлението на мемристора M по следния начин:

$$w = \frac{u_{out}}{u_{in}} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{M}{M + R_2}. \quad (7.1)$$

Съпротивлението на мемристора е:

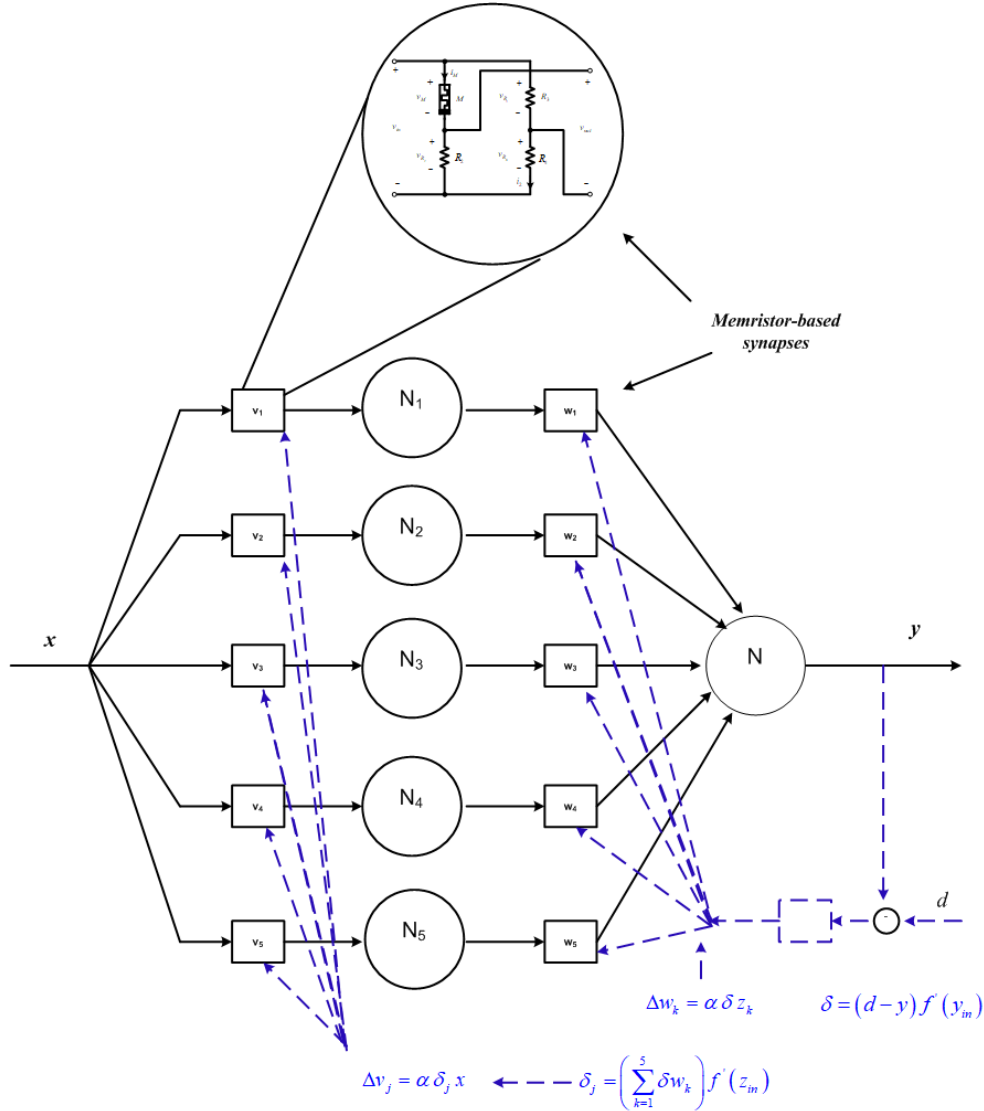
$$M = \frac{u}{x^n \beta \sinh(\alpha u) + \chi [\exp(\gamma u)]}. \quad (7.2)$$

Изменението на съпротивлението на мемристора е:

$$\Delta M_3 = M_{3new} - M_{3old} = \frac{R_1 \left(\Delta w + \frac{M_{3old}}{R_1 + M_{3old}} \right)}{1 - \left(\Delta w + \frac{M_{3old}}{R_1 + M_{3old}} \right)} - M_{3old}. \quad (7.3)$$

Съответстващата промяна на променливата на състоянието е:

$$\Delta x = x_{new} - x_{old} = a \cdot \Delta T \cdot f(x_{old}) \cdot u^s. \quad (7.4)$$



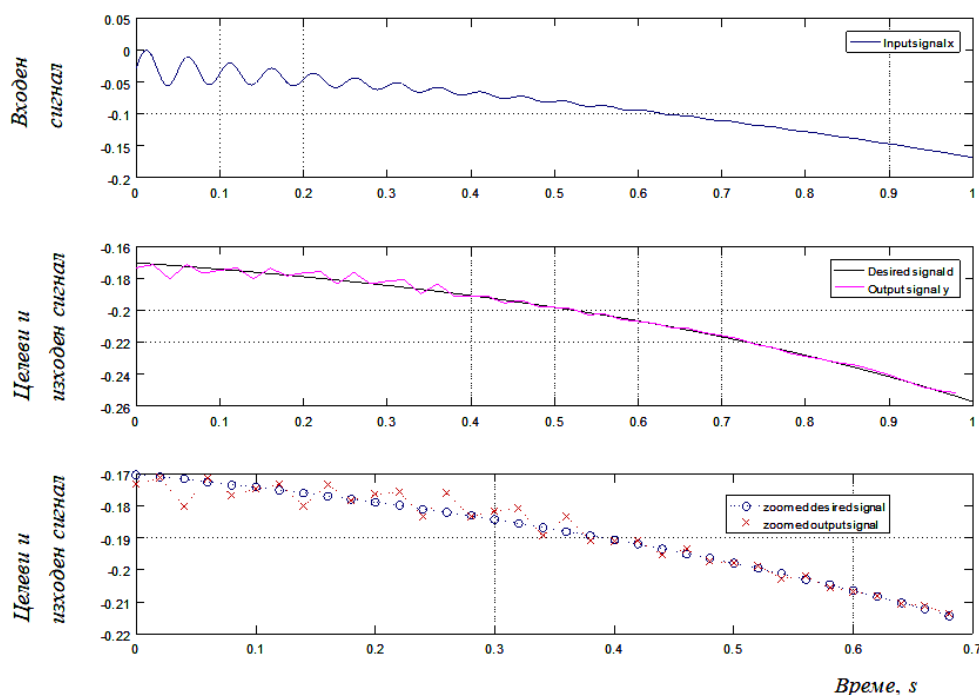
Фиг. 7.6. Многослойна невронна мрежа с мемристорни синапсиси, с право предаване на сигнала и обратно разпространение на грешката

За промяната на теглото се използва правоъгълен импулс с ниво 1 V и продължителност:

$$T_{pulse} = \int_{x_{old}}^{x_{new}} \frac{x_{new} - x_{old}}{a \cdot f(x)} dx. \quad (7.5)$$

На Фиг. 7.7 са представени времедиаграмите на входния сигнал на мрежата, желаня сигнал и изходния сигнал, получен в процеса на обучение и използване на мрежата. Детайлизирана времедиаграма на изходните данни и съответстващите стойности на желаня изходен сигнал са дадени на Фиг. 7.7 (в). Процесът на обучение на мрежата има продължителност около 0.7 s.

В заключение трябва да се отбележи, че изследваната мемристорна невронна мрежа е тествана успешно с авторския модел *A6* и с класическите модели на хафниево-диоксидни мемристори, като тяхното поведение и получените резултати са идентични. Предложените модели обаче работят при високи честоти, което позволява използването им при по-бързи сигнали и др. Това потвърждава работоспособността на авторския модел *A6* и неговата пригодност за изследване на сложни електронни схеми.



Фиг. 7.7 (а) Времедиаграма на входния сигнал;

(б) Времедиаграми на желания сигнал и на изходния сигнал;

(в) Детайлизирана времедиаграма на дискретизирания желан сигнал и изходен сигнал

7.3. Изводи

В настоящата глава от дисертацията са изследвани мемристорни електронни устройства чрез предложените модели на хафниево-диоксидни мемристори и два от най-използваните класически модели и е направено сравняване на получените резултати. Използвани са 2 класически хафниево-диоксидни модела: модел на хафниево-диоксиден мемристор без прозоречна функция и с линейно ънно отместване (*K6*) и модел на хафниево-диоксиден мемристор с нелинейна прозоречна функция (*K7*) и 3 модифицирани модела: модел на хафниево-диоксиден мемристор с допълнителен синусоидален компонент на модифицираната прозоречната функция на Biolek (*A6*), модел на хафниево-диоксиден мемристор с модифициран нелинеен мемристорен модел на Lehtonen-Laiho с прозоречна функция на Biolek със степенен показател, зависещ от напрежението (*A7*) и модел на хафниево-диоксиден мемристор с модифициран нелинеен мемристорен модел на Lehtonen-Laiho с прозоречна функция на Joglekar със степенен показател, зависещ от напрежението (*A8*). Изследвани са пасивни и хибридни мемристорни матрици-памети, фрагменти от интегрални схеми с ул-

трависока степен на интеграция, както и многослойна невронна мрежа за филтриране на шумови сигнали. Потвърждава се работоспособността на модифицираните мемристорни модели и тяхната пригодност за изследване на сложни електронни схеми и устройства, както и техните подобрени характеристики и поведение в електрическо поле и тяхното основно преимущество – по-големият диапазон на изменение на променливата на състоянието по отношение на този при класическите мемристорни модели и възможността за работа при високи честоти.

ГЛАВА 8. СЪПОСТАВКА НА МЕМРИСТОРНИТЕ МОДЕЛИ

В настоящата глава е направена съпоставка на основните мемристорни модели (на база на титанов диоксид и хафниев диоксид) по техните основни характеристики и поведение в електрическо поле. Основните критерии, по които се извършва сравнението на моделите, са дефинирани в Глава 2. Установена е възможността на модифицираните модели за функциониране при високи честоти и високи нива на сигналите. В резултат на съпоставките е потвърдено по-реалистичното поведение на модифицираните модели по отношение на класическите модели, установени са техните подобрени характеристики, основно характеристиката ток-напрежение е по-близка до експерименталната, в сравнение с тези при класическите модели. Показано е че характеристиката състояние-поток, която при предложените модели се изразява с еднозначна нелинейна крива при режим на меко превключване, за разлика от класическите модели, които изразяват същата характеристика чрез многозначна зависимост.

8.1. Сравнение на мемристорните модели по основни критерии

Разглежданите класически модели и модифицираните модели са съпоставени основно по сложност на математическите операции, по нелинейност на йонното отместване на легиращия компонент, по способност за отразяване на граничните ефекти и превключващите свойства при режими на меко превключване и твърдо превключване, както и по точност на представяне на характеристиките ток-напрежение по отношение на експерименталните характеристики при едни и същи условия.

8.2. Титаново-диоксидни мемристорни модели – TiO_2

Основни класически, съществуващи в литературата, модели

Основните класически модели на титаново-диоксидни мемристори, които са предмет на съпоставка, са моделът без прозоречна функция, моделът на Strukov и Williams ($K1$), моделът на Joglekar ($K2$), на Biolek ($K3$), на Ascoli-Corinto ($K4$) и моделът на Lehtonen-Laiho с прозоречна функция на Biolek ($K5$).

8.2.1. Модел на титаново-диоксиден мемристор с прозоречна функция на Biolek (f_B) – TiO_2 ($K3$)

- ✓ Сложност – средна
- ✓ Нива на прилаганите сигнали – ниски, под 1 V

- ✓ Честота на сигналите – ниски и средни, над 100 Hz
- ✓ Линеиност на йонното отместване – ниска
- ✓ Отразяване на граничните ефекти – да
- ✓ Възможност за отразяване на превключващите ефекти – само при ниски честоти
- ✓ Режими – меко и твърдо превключване
- ✓ Точност – средна
- ✓ Проблеми със сходимостта – само при ниски честоти и високи нива на сигналите
- ✓ Използване на прагове на активиране – не
- ✓ Възможност за настройка на модела – да
- ✓ Възможност за изразяване на несиметрични характеристики напрежение-ток – да
- ✓ Възможност за отразяване на зависимостта на нелинейното йонно отместване от напрежението – не
- ✓ Коректно представяне на характеристиката състояние-поток – само при ниски нива на сигналите, при средни и високи честоти
- ✓ Сложност на настройката на модела – ниска

Предимства:

1. Успешно изразяване на граничните ефекти при режим на твърдо превключване;
2. Успешно изразяване на нелинейното йонно отместване по отношение на променливата на състоянието
3. Сравнително малка сложност на описващите уравнения
4. Задоволителна точност при напрежения с ниско, средно ниво

Приложимост:

Мемристорни памети, невронни мрежи, цифрови устройства. Режим на твърдо превключване и режим на меко превключване, сигнали със сравнително високо ниво и ниски честоти, когато представянето на граничните ефекти е много важно.

Недостатъци:

1. Средна нелинейност на йонното отместване;
2. Липса на прагове за активиране;
3. Разцепване на вебер-кулоновата характеристика при режим на меко превключване и получаване на нееднозначна характеристика, като при подобни условия тази характеристика е линейна при моделите на Joglekar и Williams.

8.3. Модели на модифицирани титаново-диоксидни мемристори

В тази секция се разглеждат пет модифицирани от автора мемристорни модели.

8.3.1. Модифициран модел на *Joglekar* на титаново-диоксиден мемристор със зависим от напрежението степенен показател, прагове на активиране и прозоречна функция (f_{JM}) – TiO_2 (AI)

- ✓ Сложност – средна
- ✓ Нива на прилаганите сигнали – ниски, средни и високи
- ✓ Честота на сигналите – ниски, средни и високи
- ✓ Линеиност на йонното отместване – средна
- ✓ Отразяване на граничните ефекти – да
- ✓ Възможност за отразяване на превключващите ефекти – само при ниски честоти
- ✓ Режими – меко и твърдо превключване
- ✓ Точност – средна
- ✓ Проблеми със сходимостта – не
- ✓ Използване на прагове на активиране – да
- ✓ Възможност за настройка на модела – да
- ✓ Възможност за изразяване на несиметрични характеристики напрежение-ток – да
- ✓ Възможност за отразяване на зависимостта на нелинейното йонно отместване от напрежението – да
- ✓ Коректно представяне на характеристиката състояние-поток – само при ниски нива на сигналите, при средни и високи честоти
- ✓ Сложност на настройката на модела – средна

Предимства:

1. Изразява по-точно зависимостите ток-напрежение и състояние-поток за ниски нива на напрежението ($\leq 1\text{V}$), по отношение на модела на *Joglekar*. Това предимство е свързано с приложения зависещ от напрежението целочислен степенен показател в модифицираната прозоречна функция на *Joglekar*.
2. Отразява реалистично граничните ефекти при режим на твърдо превключване.
3. Изразява задоволително ефекта на нелинейно йонно отместване.
4. Има по-добра сходимост и по-малка сложност от еталонния модел на Pickett.

Приложимост:

Използва се главно, когато представянето на нелинейността на йонното отместване по отношение на променливата на състоянието е много важно (памети, невронни мрежи, настройваеми филтри, генератори).

Недостатъци: Линеиня зависимост между производната на променливата на състоянието и тока, и слаба нелинейна зависимост между напрежението и тика, поради което моделът не може реалистично да представи поведението на мемристора за сигнали с високо ниво ($> 1\text{V}$) и съответстващия ефект на превключване.

8.3.3. Модифициран модел на титаново-диоксиден мемристор на *Biolek* с допълнителен синусоидален компонент и прозоречна функция $f_{V_{Ma}}(A2)$

- ✓ Сложност – средна
- ✓ Нива на прилаганите сигнали – ниски, средни и високи
- ✓ Честота на сигналите – ниски и средни
- ✓ Линеиност на йонното отместване – ниска
- ✓ Отразяване на граничните ефекти – да
- ✓ Възможност за отразяване на превключващите ефекти – само при ниски честоти
- ✓ Режими – меко и твърдо превключване
- ✓ Точност – висока
- ✓ Проблеми със сходимостта – само при ниски честоти и високи нива на сигналите
- ✓ Използване на прагове на активиране – да
- ✓ Възможност за настройка на модела – да
- ✓ Възможност за изразяване на несиметрични характеристики напрежение-ток – да
- ✓ Възможност за отразяване на зависимостта на нелинейното йонно отместване от напрежението – не
- ✓ Коректно представяне на характеристиката състояние-поток – само при ниски нива на сигналите, при средни и високи честоти
- ✓ Сложност на настройката на модела – средна

Предимства:

1. Изразява по-точно зависимостите ток-напрежение и състояние-поток за ниски нива на напрежението ($\leq 1V$) по отношение на оригиналния модел на *Biolek*. Това предимство е свързано с повишената нелинейност на приложената модифицирана прозоречна функция, поради допълнителната синусоидална компонента.
2. Използване на праг на активиране.
3. По-добра сходимост и по-малка сложност от модела на *Pickett*.
4. Зависимостите поток-състояние на модифицирания модел на *Biolek* за режим на меко превключване са почти еднозначни криви, което е предимство по отношение на оригиналния модел на *Biolek*, който представя при същите условия зависимостите състояние-поток чрез многозначни функции.

Приложимост: Когато е важно представянето на нелинейността на йонното отместване нелинейност по отношение на променливата на състоянието (елементи памет, невронни мрежи).

Недостатъци:

1. Слаба нелинейна зависимост ток-напрежение, поради което моделът не може да представя реалистично поведението на мемристора

за сигнали с високо ниво ($\geq 1\text{ V}$).

2. По-ниска точност от модифицирания модел на Biolek с променлив степенен показател.

8.4. Хафниево-диоксидни мемристорни модели – класически модели

Хафниево-диоксидните мемристорни модели се описват със система от две уравнения. Първото уравнение изразява зависимостта между тока и напрежението, включваща променливата на състоянието (съпротивлението) на мемристора. Второто уравнение дава зависимостта между производната на променливата на състоянието (съпротивлението на мемристора) по отношение на времето и тока. По-добрите мемристорни модели използват прозоречни функции.

8.5. Предложени в дисертацията модифицирани модели на хафниево-диоксидни мемристори (HfO_2)

В тази секция са разгледани три модифицирани модели на хафниево-диоксидни мемристори: Нелинеен модел с модифицирана прозоречна функция на Биолек с допълнителен синусоидален компонент (A6), Нелинеен модел на хафниево-диоксиден мемристор с модифицирана прозоречна функция на Biolek със степенен показател, зависещ от напрежението (A7), Нелинеен модел на хафниево-диоксиден мемристор с модифицирана прозоречна функция на Joglekar с допълнителен синусоидален компонент (A8).

8.6. Изводи

В тази глава от дисертацията е извършена съпоставка и сравнение на основните класически и модифицирани мемристорни модели (на база на титанов диоксид и хафниев диоксид) по техните основни характеристики и поведение в електрическо поле. Като основни критерии за сравнението на моделите са използвани тяхното представяне на нелинейността на йонното отместване на зарядите в зависимост от променливата на състоянието (което се определя основно от използваните прозоречни функции) и от приложеното напрежение и честотния диапазон, в който работят, по сложността на описващите уравнения и съответстващите елементарни изчислителни операции, по способността за превключване на съпротивлението на мемристора при средни и високи нива на напрежението, по способността на моделите за функциониране при режими на меко превключване и твърдо превключване при високи честоти, по точност (основно се използва средно квадратичната грешка между експериментална характеристика ток-напрежение и получената характеристика при симулация с предложените модели). Използвани са и допълнителни критерии, описани в глава 2. Установени са преимуществата на разработените модели по отношение на класическите, основно функционирането при високи честоти и тяхната пригодност за изследване на мемристорни вериги и устройства.

ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

НАУЧНИ ПРИНОСИ

1. Разработена е нова усъвършенствана методология за реалистично моделиране на физическите явления в титаново-диоксидни и хафниево-диоксидни мемристори чрез използване на модифицирани прозоречни функции и настройка на техните параметри. Предложени са: модифицирана прозоречна функция на Joglekar със степенен показател, зависещ от приложеното напрежение с хиперболична намаляваща зависимост; модифицирана прозоречна функция на Biolek с допълнителен синусоидален компонент за отразяване на високата нелинейност на йонното отместване на кислородните вакансии в мемристора; модифицирана прозоречна функция на Biolek със степенен показател, зависещ от напрежението с нелинейна намаляваща зависимост; модифицирана прозоречна функция на Joglekar-Biolek със степенен показател, който е намаляваща функция на напрежението. Посредством вариране на параметрите на прозоречните функции е постигнато минимизиране на средно-квадратичната грешка между характеристиките напрежение-ток, симулирани с модифицираните мемристорни модели, и съответна експериментална характеристика напрежение-ток при едно и също входно напрежение. Средно-квадратичната грешка при разработените от автора модели е по-ниска от грешката при класическите мемристорни модели.
2. На база на разработената усъвършенствана методология за моделиране на титаново-диоксидни и хафниево-диоксидни мемристори са предложени 8 модифицирани модела – пет модела за титаново-диоксидни мемристори ($A1$, $A2$, $A3$, $A4$, $A5$) и три модела за хафниево-диоксидни мемристори ($A6$, $A7$, $A8$). Разработените в дисертацията модели на титаново-диоксидни мемристори са базирани на моделите на Williams ($A1$, $A2$, $A3$ и $A4$) и Lehtonen-Laiho ($A5$) с прилагане на модифицираните прозоречни функции. Модифицираните модели на хафниево-диоксидни мемристори ($A6$, $A7$ и $A8$) се базират на модела на Lehtonen-Laiho в комбинация с описаните прозоречни функции и с модифицирана прозоречна функция на Joglekar с допълнителен синусоидален компонент. Усъвършенстваните мемристорни модели имат висока нелинейност на йонното отместване и отразяват по-реалистично физическите процеси в мемристорите по отношение на класическите модели.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

3. Разработените в дисертацията модели са приложени при изследване на мемристорни аналогови и цифрови схеми, вериги и устройства.

Анализирани са прости мемристорни вериги (последователна и насрещно-последователна верига с мемристори, насрещно-паралелна верига, генератор с мост на Вин с мемристори, интегриращи устройства, перцептрон с мемристорни синапсиси) и сложни вериги (мемристорни памети и невронни мрежи). Установени са основните преимущества на модифицираните мемристорни модели (по-реалистично представяне на характеристиките състояние-поток и напрежение-ток, по-ниска средно-квадратична грешка между симулираните и експерименталните характеристики напрежение-ток, отразяване на разликата в поведението на мемристорите при напрежение по-високо и по-ниско от прага на активиране, работа при високи нива на сигналите и високи честоти) – $A1$, $A2$, $A4$ и $A5$ по отношение на класическите мемристорни модели $K1$, $K2$, $K3$ и $K5$ и $A6$, $A7$ и $A8$ по отношение на $K6$ и $K7$.

4. Предложените в дисертацията модели на титаново-диоксидни и хафниево-диоксидни мемристори са сравнени са с най-добрите съществуващи модели на такива мемристори, като са оценени техните преимущества и недостатъци и е предложено в кои случаи е по-подходящо те да бъдат прилагани. Модифицираните модели, базирани върху модела на Уилямс ($A1$, $A2$, $A3$ и $A4$) в комбинация с модифицираните прозоречни функции се използват при изследване на аналогови и цифрови устройства при ниски и средни нива на сигналите и честотите. Разработените в дисертацията мемристорни модели на титаново-диоксидни мемристори ($A5$, $A6$, $A7$) и хафниево-диоксидни мемристори ($A8$) се основават върху модела на Lehtonen-Laiho в комбинация с модифицираните прозоречни функции и са най-подходящи за изследване на мемристорни устройства при произволни нива на сигналите и при ниски, средни и високи честоти.
5. Изследвани са ефектите, свързани с въздействието на температурата в работен интервал $[-15, 75] ^\circ\text{C}$ и съответстващата дифузия на кислородни ваканции върху физическите процеси в титаново-диоксидни мемристори (изменение на съпротивлението на мемристора, промяна на концентрацията на кислородните ваканции в обема на мемристора). Изследвано е и влиянието на паразитните параметри (собствени и взаимни индуктивности и капацитети) между титаново-диоксидни мемристори в мемристорни матрици, реализирани в интегрални схеми с ултраголяма степен на интеграция (ULSI), в честотния диапазон $[1\text{Hz} - 3\text{GHz}]$ върху нормалното функциониране на мемристорите. След направените изследвания е установено, че в разглеждания температурен диапазон R_{ON} , е достатъчно малко, а R_{OFF} е достатъчно голямо, поради което влиянието на температурата може да не се взема предвид при моделирането на мемристори. Изследванията върху собствените и взаимните индуктивности и капацитети на мемристорите

показват техните много по-малки стойности от тези при класическите интегрални схеми, базирани върху CMOS технология (33 nm), поради което описаните паразитни параметри не се отчитат при моделирането на титаново-диоксидни мемристори при зададените условия.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

6. Разработени са PSpice библиотечни модели на предложените в дисертацията титаново-диоксидни и хафниево-диоксидни мемристорни модели. Те са изследвани в среда на PSpice при режими на меко и твърдо превключване. Потвърдена е тяхната работоспособност при синусоидален и импулсен режим. Разработените библиотечни модели са използвани при изследване на мемристорни аналогови и цифрови устройства, при което са установени техните основни преимущества по отношение на класическите мемристорни модели – получаване на еднозначна характеристика състояние-поток при режим на меко превключване, отразяване на граничните ефекти по отношение на класическите модели, както и отразяване на разликата в поведението на мемристорите при напрежение по-високо и по-ниско от прага на активиране, работа при високи нива на сигналите и високи честоти на $A1$, $A2$, $A4$ и $A5$ по отношение на класическите мемристорни модели $K1$, $K2$, $K3$ и $K5$, както и на $A6$, $A7$ и $A8$ по отношение на $K6$ и $K7$.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Статии в списания с импакт-фактор

1. V. Mladenov, Analysis of Memory Matrices with HfO₂ Memristors in a PSpice Environment, *Electronics* 2019, 8(4), 383; doi:10.3390/electronics8040383, <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/4/383>.
2. Mladenov, V., S. Kirilov, A Nonlinear Drift Memristor Model with a Modified Biolek Window Function and Activation Threshold. *Electronics* 2017, 6(4), 77; doi: 10.3390/electronics6040077, pp. 1 – 15, <https://www.mdpi.com/2079-9292/6/4/77>.
3. V. Mladenov, Analysis and Simulations of Hybrid Memory Scheme Based on Memristors, *Electronics* 2018, 7, 289; doi:10.3390/electronics7110289, <https://www.mdpi.com/2079-9292/7/11/289>.

Статии в научни списания

1. Valeri Mladenov, Stoyan Kirilov, “Synthesis and Analysis of a Memristor-Based Perceptron Element for Logical Function Emulation”, *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, ISSN 0033-2097, R. 92 NR 4/2016, pp. 22-25, doi:10.15199/48.2016.04.06.
2. Stoyan Kirilov, Valeri Mladenov, Analysis of a Passive Memristor Crossbar, *Oriental Journal of Computer Science and Technology*, Vol. 11, No. (1) 2018, Pg. 04-11, ISSN: 0974-6471.
3. Mladenov, V.; Kirilov, S., Analysis of an anti-parallel memristor circuit, *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska (IAPGOŚ)* 2018, 8(2), pp. 9–14, DOI: 10.5604/01.3001.0012.0696, <https://e-iapgos.pl/resources/html/article/details?id=173605>.
4. Mladenov, V.; Kirilov, S., Advanced Memristor Model with a Modified Biolek Window and a Voltage-Dependent Variable Exponent, *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska (IAPGOŚ)* 2018, 8(2), pp. 15–20, DOI: 10.5604/01.3001.0012.0697, <https://e-iapgos.pl/resources/html/article/details?id=173606>.

Статии, публикувани в сборници от международни конференции

1. Mladenov, V., St. Kirilov, Analysis of temperature influence on titanium-dioxide memristor characteristics at pulse mode, *International Symposium on Theoretical Electrical Engineering (ISTET)*, 24-26 June, 2013, Pilsen, Czech Republic.
2. Mladenov, V., St. Kirilov, Investigation of memristors' own parasitic parameters and mutual inductances between neighbouring elements of a memristor matrix and their influence on the characteristics, *International Symposium on Theoretical Electrical Engineering (ISTET)*, 24-26 June, 2013, Pilsen, Czech Republic.
3. Valeri Mladenov, Stoyan Kirilov, A Nonlinear Memristor Model with Activation Thresholds and Variable Window Functions, *Proceeding of 15th International*

- Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA)*, 23-25 August 2016, Dresden, Germany, ISBN 978-3-8007-4252-3.
4. V. Mladenov, S Kirilov, A Memristor Model with a Modified Window Function and Activation Thresholds, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2018, 1-5, DOI: 10.1109/ISCAS.2018.8351429, 2018.
 5. S. Kirilov, V Mladenov, Integrator device with a memristor element, *Proceedings of 7th International IEEE Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)* 2018, DOI: 10.1109/MOCASST.2018.8376656, 2018.
 6. V. Mladenov, Synthesis and Analysis of a Memristor-Based Artificial Neuron, *Proceedings of 16th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA)* 2018, August 28-30, 2018, Budapest, Hungary, ISBN: 978-3-8007-4766-5.
 7. Kirilov, S. Mladenov, V., Learning of an Artificial Neuron with Resistor-Memristor Synapses, *Proceedings of the workshop on Advances in Neural Networks and Applications 2018 (ANNA'18)*, VDE VERLAG GMBH, Berlin, Offenbach; pp. 13-17, ISBN 978-3-8007-4756-6.
 8. V. Mladenov, St. Kirilov, „Analysis of a serial circuit with two memristors and voltage source at sine and impulse regime”, *Proceeding of 13th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA)*, 3rd Memristor and Memristive Symposium, 29-31 August 2012, Turin, Italy, pp. 1-6.
 9. Mladenov, V., St. Kirilov, Syntheses of a PSpice Model of a Titanium-dioxide Memristor and Wien Memristor generator, *European Conference on Circuit Theory of Design (ECCTD)* 2013, Germany, 08-12 September, DOI: 10.1109/ECCTD.2013.6662302, pp. 1-4.
 10. Mladenov, V., A New Simplified Model for HfO₂-based Memristor. *Proceedings of 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)* 2019, 978-1-7281-1184-1/19/, 2019.
 11. Mladenov, V., S. Kirilov, A Comparison of Titanium Dioxide Memristor PSpice Library models, *Accepted for presentation in the International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems (MEMRISYS)* 2019, Dresden, Germany, 8-11 July, 2019, <https://www.iee.et.tu-dresden.de/mem2019/>.
 12. Kirilov, S., V. Mladenov, PSpice Library Models for HfO₂ memristors, *Accepted for presentation in the International Symposium on Theoretical Electrical Engineering (ISTET)* 2019, Sofia, Bulgaria, 21-24 July, 2019, <https://www.istet2019.eu/>.
 13. Mladenov, V., St. Kirilov, Analysis of the mutual inductive and capacitive connections and tolerances of memristor's parameters of a memristor memory matrix, *European Conference on Circuit Theory of Design (ECCTD)* 2013, Germany, 08-12 September, DOI: 10.1109/ECCTD.2013.6662269, pp. 1-4.
 14. Valeri M. Mladenov, Stoyan M. Kirilov, “Memristor modeling in Matlab® & Pspice®”, *Proc. of 29th European Conference on Modelling and Simulations (ECMS)*, 26.05.2015-29.05.2015, Albena (Varna), Bulgaria, ISBN: 978-0-9932440-0-1, pp. 432-437.

УСЪВЪРШЕНСТВАНО МОДЕЛИРАНЕ НА МЕМРИСТОРИ

Проф. д-р Валери Младенов

РЕЗЮМЕ

В дисертацията е направен преглед на основните публикации, свързани с мемристори и тяхното моделиране. Предмет на изследването са основно мемристорите от TiO_2 и HfO_2 . Разглеждат се основните класически модели – на Strukov-Williams, Joglekar, Biolek, Corinto-Ascoli и Lehtonen-Laiho. Основните проблеми при класическите модели са независимостта на нелинейността на прозоречната функция от напрежението и тяхната малка нелинейност. Във връзка с целта на дисертацията – отстраняването на тези проблеми и подобряване на моделите се предлагат две основни модификации на прозоречните функции: въвеждане на намаляваща зависимост между степенния показател и напрежението и използване на допълнителна синусоидална компонента за засилване на нелинейността. Разработена е усъвършенствана методология за моделиране на мемристори, чрез използване на модифицирани прозоречни функции с регулируеми параметри. Настройването на моделите се основава на сравняване на експериментални и симулирани характеристики напрежение-ток и минимизиране на средно-квадратичната грешка между тях. На база на математическите модели на мемристорите са разработени техни библиотечни PSpice модели, които са анализирани при режими на меко и твърдо превключване. Основните предимства на модифицираните модели по отношение на класическите са: възможност за работа при високочестотни сигнали и за настройка, широк диапазон на изменение на променливата на състоянието, изразяване на характеристиката състояние-поток чрез еднозначна крива при меко превключване. Разработените PSpice модели са използвани за анализ на мемристорни вериги и устройства. Потвърдена е способността им да функционират в електронни схеми. Изследвано е влиянието на температурата и паразитните параметри на мемристорите (собствените и взаимните им индуктивности и капацитети) върху тяхната работа. Установено е незначителното влияние на тези допълнителни фактори върху функционирането на мемристорните матрици и интегрални схеми, поради което те не се отчитат при моделирането. Анализирани са прости и сложни мемристорни вериги с класическите и модифицираните модели и са сравнени резултатите с акцент върху предимствата на предложените модели. Не са забелязани проблеми, свързани със сходимостта на изчислителните процеси. Основните приноси в дисертацията са разработването и внедряването на усъвършенствана методология за моделиране на мемристори чрез модифицирани прозоречни функции и настройка на техните параметри, установяване на незначителното влияние на температурата и паразитните параметри на мемристорите върху тяхното нормално функциониране в матрици и интегрални схеми с ултра-голяма степен на интеграция, разработването на PSpice модели на мемристори и тяхното използване за анализ на мемристорни вериги, сравняването на резултатите, получени при прилагане на класическите и модифицираните модели и установяване на техните преимущества.

ADVANCED MEMRISTOR MODELING

Prof. Dr.-Eng. Valeri Mladenov

SUMMARY

In the thesis a review has been made on the main publications related to memristors and memristor modeling, memristor circuits and devices. Subject of research are basically titanium dioxide and hafnium-dioxide memristors. The basic classic memristor models - Strukov and Williams, Joglekar, Biolek, Corinto-Ascoli and Lehtonen-Laiho are considered. The main problems and deficiencies in classic models are independent non-linearity of the used window function of voltage, and their low nonlinearity. In connection with the purpose of the thesis - compensating these issues and improving the memristor models, two basic modifications of window functions are offered: a hyperbolic decreasing dependency between the exponent in the window functions and voltage, and introducing additional sinusoidal component to strengthen the non-linearity of the models. A sophisticated methodology for modeling memristors has been developed using modified window functions with adjustable parameters. The setting of the authors' models is based on comparing experimental and simulated voltage-current characteristics and minimizing the mean square error between them. PSpice simulations have been performed on the customized models in soft and hard switching modes and their functionality is confirmed. Based on the mathematical models of the memristors, their PSpice library models have been developed, which are analyzed in soft and hard switching modes and their operational capability are confirmed. The main advantages of the modified models with respect to the classic models are established – possibility for operation with high-frequency signals, for tuning, wider range of variation of the state variable in relation to the classical models, expression of the state-flux characteristic by a single curve in soft switching mode. The developed PSpice library models are used to analyze memristor circuits and devices. Their ability to operate in electronic schemes is confirmed. The influence of temperature and parasitic parameters of the memristors (their own and mutual capacities and inductances are investigated and their negligible effect on the normal functioning of the memristor matrices and integrated circuits are established. Due to the negligible influence of these additional factors, they are not taken into account in memristor modeling. Simple and complex memristor circuits were analyzed with the classical and modified models and the results are compared, paying attention to the advantages of the modified models. During the simulations, no problems related to the convergence of the computational processes were noticed. The main contributions in the thesis are the development and implementation of an advanced methodology for memristor modeling using modified window functions and adjustment of their parameters, establishing the negligible influence of the temperature and the parasitic inductances and capacitances of memristor matrices on their normal operation, development of PSpice library models, their usage for memristor circuits analysis, comparing the results obtained by applying the modified and classical models and identifying their advantages.



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Faculty of AUTOMATICS

Department of THEORETICAL ELECTRICAL ENGINEERING

Prof. Dr.-Eng. Valeri Markov Mladenov

ADVANCED MEMRISTOR MODELING

A B S T R A C T

of a dissertation for obtaining the scientific degree
„DOCTOR OF SCIENCES”

Scientific Field: 5. Technical Sciences

Scientific Direction: 5.2. Electrical Engineering, Electronics and Automatics

Scientific Speciality: Theoretical Electrical Engineering

Reviewers:

1. Prof. Dr. Elisaveta Dimitrova Gadjeva
2. Prof. DSc. Galina Petkova Cherneva
3. Prof. DSc. Rumena Dimitrova Stancheva

Sofia, 2019

The dissertation work was discussed at a meeting of an extended departmental board of the Department of Theoretical Electrical Engineering at the Faculty of Automatics of the Technical University of Sofia on 10 June 2019.

The official defense of the dissertation will take place on 01.10.2019 at 15.00 o'clock in the conference room of the Library of the Technical University of Sofia at an open meeting of the scientific jury designated by Order №: ОЖ-5.2-73 / 14.06.2019 of the Rector of the Technical University of Sofia, comprising:

1. Prof. DSc. Georgi Slavchev Mihov – chairman
2. Prof. DSc. Petko Hristov Petkov – scientific secretary
3. Prof. Dr. Elisaveta Dimitrova Gadjeva – member
4. Prof. DSc. Galina Petkova Cherneva – member
5. Prof. DSc. Rumena Dimitrova Stancheva – member
6. Prof. DSc. Tihomir Borisov Takov – member
7. Prof. Dr. Kosta Petrov Boshnakov – member

The defense materials are deposited in the Faculty of Automation office, room № 2350 of the Technical University of Sofia.

The author is a regular professor at the Department of Theoretical Electrical Engineering at the Faculty of Automatics at the Technical University of Sofia.

Reviewers:

1. Prof. Dr. Elisaveta Dimitrova Gadjeva
2. Prof. DSc. Galina Petkova Cherneva
3. Prof. DSc. Rumena Dimitrova Stancheva

Author: Prof. Dr.-Eng. Valeri Markov Mladenov

Title: **Advanced Memristor Modeling**

Number of copies printed: 20

Printed at the Publishing House of TU – Sofia

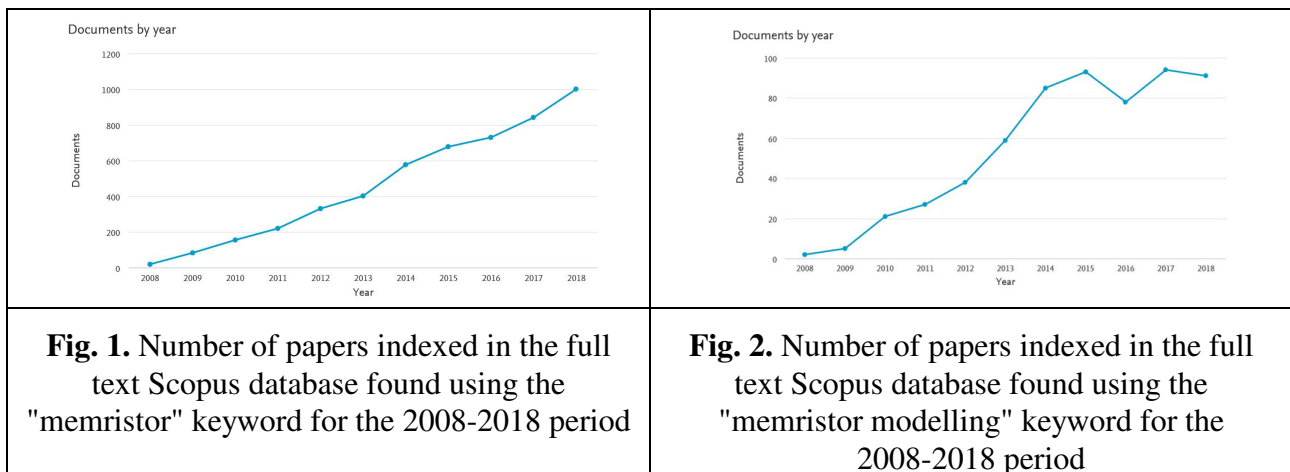
I. GENERAL CHARACTERISTIC OF DISSERTATION

Importance of the problem

After the theoretical prediction of the existence of a fourth basic electrical two-terminal element – the memristor (shortened by *memory + resistor*) by Leon Chua in 1971, alongside with the resistor, the inductor and the capacitor, and after the invention of the *first memristor prototype* by Williams in 2008 – there is a growing interest in *memristors*, *memristor circuits* and *memristor modelling*. The memristor has the extremely important and useful property *to memorize its resistance* and its stored charge, which determines its potential *applications in non-volatile integral memories, neural networks, analogue and digital programmable circuits*, and many other important areas of electronics.

Memristor modeling is of higher importance in order to carry out *precise preliminary analyses* and simulations of memristor circuits and devices. In connection with the study of memristors based on various materials (oxide, polymeric, ferroelectric, etc.), there are many memristor models in the scientific literature. Each model contains at least two basic equations: the first one describes the relationship between current and voltage, and the second equation expresses the relationship between the time derivative of the state variable of the memristor and current. The *main classical memristor models* (Williams and Strukov, Joglekar, Biolek, Ascoli-Corinto, Lehtonen-Laiho) use a window function in the state equation to take into account the non-linear ionic dopant drift and the boundary effects for hard-switching mode.

The rapid increase of the number of scientific publications in the major global databases – Scopus, Web of Science, IEEE Xplore and others confirms the importance of the problems associated with memristors, memristor circuits and memristor modelling. For example the time distribution of the papers found by the use of the key-word “memristor” in Scopus database for the period 2008-2018 is shown in Fig. 1. The time distribution of the papers found by the use of the key-word “memristor modelling” in Scopus database for the period 2008-2018 is presented in Fig. 2.



Purpose of the dissertation work, main tasks and methods for investigations

The purpose of the present research is to *develop and implement a new advanced methodology for modeling titanium dioxide and hafnium dioxide memristors using window functions, which reflect more realistically the physical processes* in the modeled memristors, and analyse various effects (changing the concentration of the oxygen vacancies in the volume of the memristor) related to the *influence of temperature and diffusion on the physical processes* in the memristor element and the parasitic inductances and capacitances in the memristor matrices.

The **tasks** related to the realization of this aim can be summarized as follows:

1. *Development of an advanced methodology for more realistic modelling of physical phenomena in the memristors by using modified window functions and tuning their parameters;*
2. *Application of the proposed methodology for modelling titanium dioxide and hafnium dioxide memristors and for the development of new models of the analyzed memristors;*
3. *Development of PSpice library models of titanium-dioxide and hafnium-dioxide memristors;*
4. *Application of the developed models in the study of memristor analogue and digital schemes, circuits and devices;*
5. *Comparison of the proposed memristor models;*
6. *Investigation of various effects related to the influence of temperature and diffusion on the physical processes in the memristor (change of the resistance, change of the concentration of oxygen vacancies in the volume of the memristor element) and the parasitic inductances and capacitances in the memristor matrices and integrated circuits with ultra large-scale integration (ULSI).*

The methods of mathematical modeling, of analytical investigations and simulations in PSpice and MATLAB environment are used in the dissertation.

Scientific novelty

A disadvantage of the basic titanium dioxide and hafnium oxide memristor models is their impossibility for realistic representation the switching processes in memristors for voltages with level higher than 1 V and for frequencies higher than 100 MHz. The Pickett memristor model is a high nonlinear one. It is based on physical measurements and on the mechanism of flow a current through a tunnel barrier. It represents the physical processes in memristors with the highest accuracy. It is frequently used as a reference model for tuning of other memristor models. Its main disadvantage is its extreme complexity and its inability to perform simulations due to the occurrence of multiple computational problems related to the convergence of iterative procedures. The non-linear Lehtonen-Laiho model is one of the most commonly used models. It has a satisfactory accuracy and the convergence of its compu-

tational processes is better than that of the Pickett memristor model. A common disadvantage of the models described above, as seen in the scientific literature, is the fixed value of the integer positive exponent in the window functions used. This reflects the non-linearity of ion charge displacements, and as its value increases, the more the nonlinearity of ionic dopant drift decreases. *However, the nonlinearity of the ionic dopant drift depends on the voltage applied to the memristor element. At higher voltage levels the non-linearity of the ion dopant drift increases.*

This is the main reason for the modifications of the basic titanium dioxide and hafnium-dioxide memristor models by introducing a hyperbolically similar fractional-linear relationship between the integer exponent in the window function used and the voltage proposed in the dissertation. To enhance the nonlinearity of the Biolek model, it is also suggested to add a weighted sinusoidal component to the window function used. After many analyses the possibilities of the modified titanium-dioxide and hafnium oxide memristor models for operating with high-level and high frequency signals, the realistic behaviour in electric field and the enhanced representation of the state-flux relationships for soft-switching mode are established.

In connection with the analyzes carried out, new PSpice library memristor models have been created, and their behavior is compared in operation in different circuits – analog circuits (series and parallel circuits, generators, integrators, etc.) and digital memristor circuits (memories, neural networks). *After analyzing it has been found that in the operating temperature and frequency range of the electronic apparatus the influence of the temperature, diffusion and parasitic parameters of the titanium dioxide memristors (own and mutual capacities and inductances) on the normal functioning of the memristor matrices and integrated circuits is negligible weak and these additional factors may not be considered in the modelling of memristors and memristor matrices.*

Practical applicability

During the development of the dissertation PSpice library models of the proposed titanium dioxide and hafnium-dioxide models have been created, as well as of the best classical models. They have been tested in PSpice environments for soft and hard switching modes. Their performance in sinusoidal and pulse mode has been confirmed. The developed library models have been used in the investigation of memristor analogue and digital devices (integrator devices, generators, neural networks, memories), where their main advantages are established with respect to the classical memristor models – obtaining a single-valued state-flux characteristic in soft-switching mode, representation the boundary effects with respect to the classical models *C1*, *C2* and *C5*, operation at high voltages and frequencies of the memristor models *M1*, *M2*, *M4*, *M5*, *M6*, *M7*, *M8*, with respect to the classical memristor models *C1*, *C2*, *C3*, *C5*, *C6*, *C7*.

Approbation

The dissertation work is written at the Technical University of Sofia, Faculty of Automatics, Department of Theoretical Electrical Engineering.

Approval of the work

The dissertation work has been reported to the Department of Theoretical Electrical Engineering, Faculty of Automatics, Technical University of Sofia and to the Faculty Council of the Faculty of Automatics.

Publications

The dissertation's results are published in 21 papers, three of which are in journals with impact-factor, 4 of which are in scientific journals, and 14 are published in proceedings of international conferences. Eight of the publications are referenced in Scopus Database.

Structure and volume of dissertation work

The dissertation work has a volume of 300 pages, including an introduction, 8 chapters, a list of the main contributions, a list of dissertation papers and used literature. A total of 240 literary sources are cited in Latin. The work includes a total of 125 figures and 14 tables. The numbers of the figures and the tables in the present abstract correspond to those in the dissertation.

II. CONTENTS OF DISSERTATION

CHAPTER 1. LITERARY SURVEY. INTRODUCTION IN MEMRISTORS

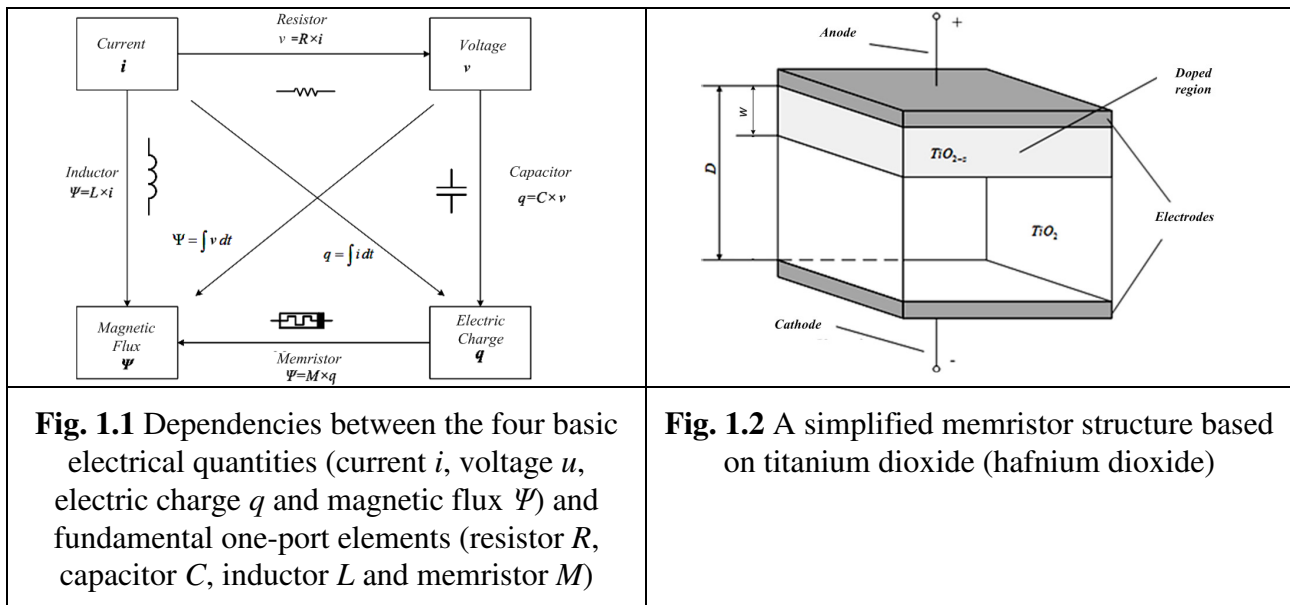
1.1. General information about the memristors

The phenomenon of resistance switching observed in a number of amorphous metallic and transition chemical oxides such as SiO_2 , Al_2O_3 , Ta_2O_5 has been explored since 1970. It has been found that such oxide materials, placed in a metal oxide structure, have the ability to change their resistance in accordance with the applied voltage and to maintain their state for a prolonged period of time. Oxides of metals from the transitional periods of the periodic system of the chemical elements previously subjected to an *electroforming process* have the *ability to accumulate electrical charges in their structure*, their quantity being proportional to the integral of the current as well as the applied voltage over time. The electroforming process consists essentially of applying a voltage of about 5 V to the oxide structure of about 10 nm thick, which results in partial evaporation of oxygen from the material, and oxygen vacancies are formed in the metal oxide structure. Like the holes in semiconductors, they have a positive fictitious charge and are formed around the anode. The layer containing these oxygen vacations is about 5 percent thick of the entire thickness of the oxide structure. Such a structure using titanium dioxide (TiO_2) is shown in Fig. 1.2. After the initial electroforming process, oxygen vacations remain in the layer (doped region) next to the anode, the other layer is of pure titanium dioxide. Under normal temperature conditions, the *diffusion rate* of oxygen vacancies is extremely low, and the described state of the oxide nanostructure can be practically maintained over a period of several months to about two years. The layer saturated with oxygen vacancies has a specific resistance of about 100 times lower than the specific resistance of the other layer, which consists of pure metal oxide material. In the structure thus formed, two types of electric charges are created: on the one hand these are the oxygen vacancies with fictitious positive charge and on the other hand there is also a presence of free electrons resulting from the thermal generation of charges and their passage from the valence zone to the zone of conductivity of the oxide material. When a positive voltage is applied (the positive potential is applied to the anode and the negative potential is connected to the cathode), the resulting electric field repels the oxygen vacancies and attracts the free electrons, whereby the boundary between the two layers of the oxide nanostructure begins to move towards the cathode. Its thickness increases, whereby the thickness of the layer of pure oxide material decreases. As a result the equivalent resistance of the entire structure diminishes. If the voltage source is interrupted at a certain moment, the current stops and the movement of the boundary between the two layers of the oxide structure stops. Upon applying reverse voltage, the boundary between the two sections begins to move to the anode, whereby the thickness of the oxygen-saturated layer decreases and the thickness of the pure metal oxide layer increases. As a result, the resistance of the entire nanoscale structure is increasing. Such unusual behavior was foretold for the memristor element by Leon Chua in 1971. The memristor element is proposed in ac-

cordance to the symmetry considerations and the relationship between the four basic electrical quantities (current, voltage, electric charge and magnetic flux) associated with two-terminal elements. The proposed fourth fundamental one-port element expresses the relationship between the flux, defined as the time integral of the voltage on the element, and the electrical charge defined as the time integral of the current through the element. The relationships between the described electrical quantities and the fundamental two-terminal elements are presented in Fig. 1.1.

1.2. Basic types of memristors

There are several major types of memristors – titanium dioxide, hafnium-dioxide, polymeric, ferroelectric memristors, electron spin memristors, etc. They are based on different chemical compositions and physical structures and differ in function. ***Particularly important for memristors and memristor circuits is their modeling with a view to the precise pre-study of memristor devices by computer simulations.*** The most widespread use of titanium dioxide and hafnium-dioxide memristors have been found and they are basically the subject of current research. Their structure and principle of operation are identical. In Fig. 1.2 a structure based on titanium dioxide is presented.



The idea of the memristor was developed by Professor Evgeni Filipov from the Technical University in Ilmenau, Germany and his students (Roland Zusse, Wolfgang Bütigg, etc.) in the theory of the elements of higher order. The Bulgarian professor Evgeni Filipov not only develops theory but also seeks practical application of these new elements. With their PhD student in Bulgaria they develop resistive frequency-dependent elements, as well as inductive and active filters of higher order and patent schemes of active analog filters of arbitrarily high order. In the Problem Research Laboratory of Semiconductor Chemical Technologies at Technical University of Sofia, led by Professor Philip Filipov, in cooperation with the Technical University of Ilmenau, a series of 20 Thin Layer Hybrid Integrated Circuits of Active Filters of Second Order have been designed and developed using

the scholarly solutions proposed by Prof. Evgeni Filipov and the PhD student Nina Marinova. Schemes are used in further studies of circuits with elements of higher order. The theory of higher order elements allows the design of new circuit solutions of filters with a high quality factor.

1.3. Modeling of titanium dioxide memristors

In connection with the modeling of memristors, the main terms and concepts used below are defined here.

- ✓ **Linear memristor model** – it uses a linear dependence between the time derivative of the state variable and current (voltage) in the state differential equation.
- ✓ **Non-linear memristor model** – it uses a non-linear relationship between the time derivative of the state variable and current (voltage) in the state equation.
- ✓ **Non-linear ionic dopant drift** – represents the non-linear dependence between the speed of movement of the oxygen vacancies in the memristor and the applied voltage.
- ✓ **Activation threshold of the memristor** – represents the level of voltage under which the state variable does not change and the memristor has a behaviour of a linear resistor.
- ✓ **Forward-biasing of a memristor** – when a positive potential is applied to the anode with respect to the cathode of the memristor.
- ✓ **Reverse-biasing of a memristor** – when a negative potential is applied to the anode with respect to the cathode of the memristor.
- ✓ **Boundary effects** – they represent the change of the state variable when it reaches its limiting values – when the memristor is forward-biased and the state variable have reached a value of unity after further increasing the voltage the state variable retains its previous value, and when the voltage change its polarity the state variable immediately starts decreasing its value. When the state variable reaches a value of zero and if the voltage decreases then it retains its value and if the voltage increases then the state variable increases too.
- ✓ **Switching the memristor** – changing the resistance of the memristor in a very wide range.
- ✓ **Soft Switching Mode** – changing the state variable over a wide range, where it does not reach its limiting values.
- ✓ **Hard switching mode** – changing the state variable in a very wide range, where it reaches and keeps its limiting values for a certain time.

The *state differential equation* of the memristor in a combination with the relationship between the current and the voltage of the memristor is described by the system of equations (1.15):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= k i f(x) \\ v &= i [R_{ON} x + R_{OFF} (1 - x)] \end{aligned} \quad (1.15)$$

where $f(x)$ is the applied window function, x is the state variable of the memristor, R_{ON} and R_{OFF} are the resistances of the element in closed and open states, k is a constant dependent on the physical parameters of the memristor.

1.3.1. Strukov-Williams memristor model (classical model C1)

The system describing this model is:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= k i f_{sw}(x) = k i [x(1 - x)] \\ v &= i [R_{ON} x + R_{OFF} (1 - x)] \end{aligned} \quad (1.19)$$

The dependencies between state and flux and between voltage and current of the memristor are shown in Fig. 1.8 c) and 1.8 d). The *state-flux characteristic* is a nonlinear rising curve, and the *voltage-current characteristic* is a pinched hysteresis loop.

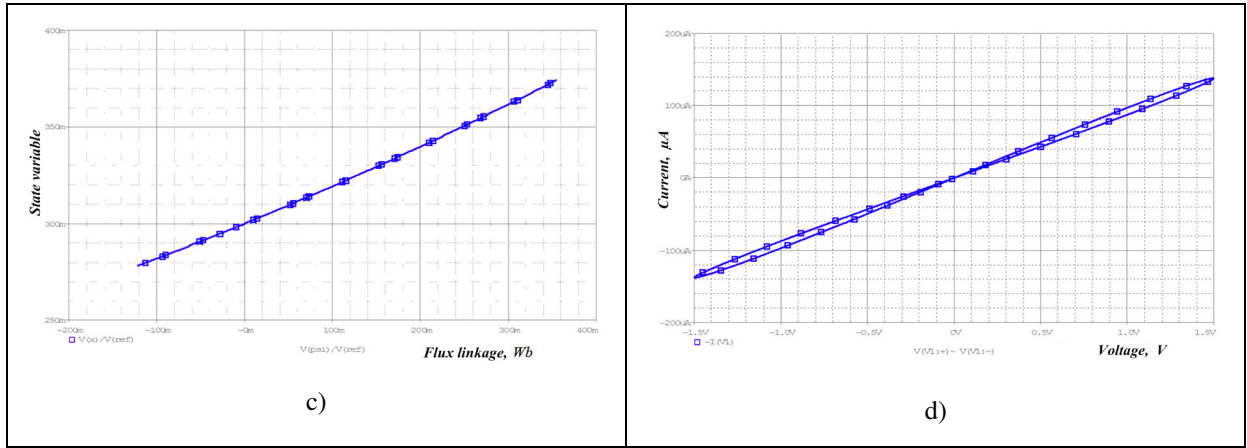


Fig. 1.8 (c) Dependence between state and flux; (d) a current-voltage characteristic

1.3.2. Joglekar memristor model (classical model C2)

The *state differential equation* of the memristor obtained by using Joglekar's window function in a combination with the *current-voltage dependence* is described by (1.25):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= k i f_j(x) = k i [1 - (2x - 1)^{2p}] \\ v &= i [R_{ON} x + R_{OFF} (1 - x)] \end{aligned} \quad (1.25)$$

where $f_J(x)$ is the *Joglekar window function* with an integer exponent p . The dependencies between state and flux and between voltage and current of the memristor are shown in Fig. 1.10 c) and 1.10 d).

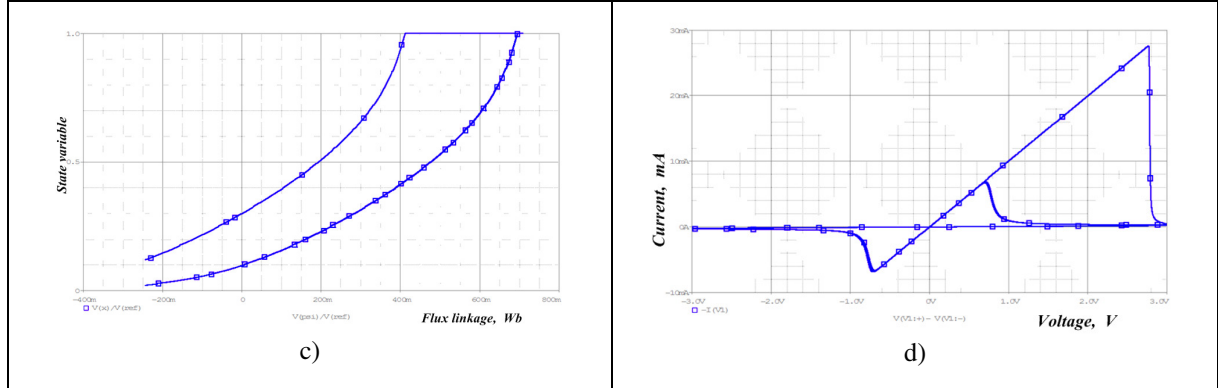


Fig. 1.10 (c) Dependence between state and flux; (d) a current-voltage characteristic

1.3.3. Biolek memristor model (classical model C3)

The state equation of the memristor obtained by applying the Biolek window function $f_B(x, i)$ in a combination with the current-voltage dependence is described by System (1.28):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= k i f_B(x, i) = k i \left[1 - (x - \text{stp}(-i))^{2p} \right] \\ v &= i [R_{ON} x + R_{OFF} (1 - x)] \end{aligned} \quad (1.28)$$

Dependencies between state and flux and between voltage and current in the hard-switching mode are shown in Fig. 1.12 (c) and (d).

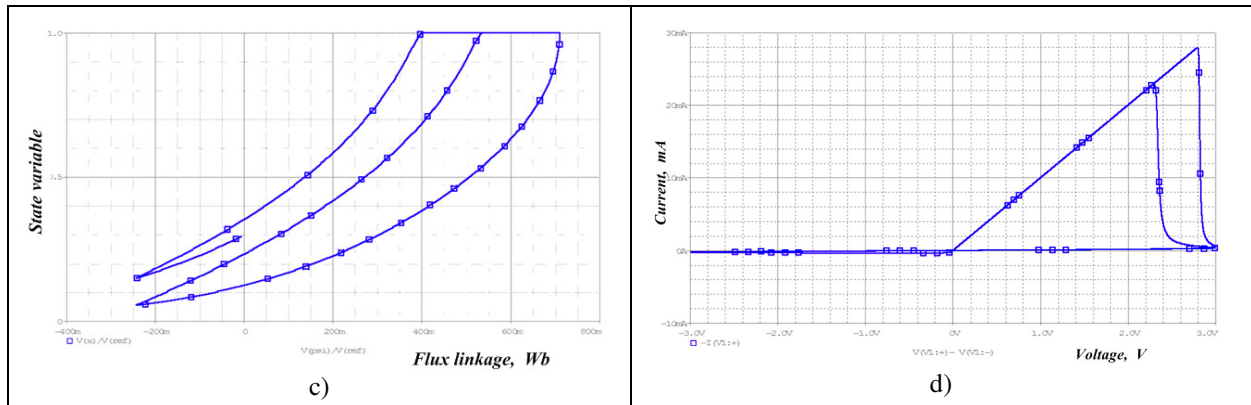


Fig. 1.12 (c) Dependence between state and flux; (d) a current-voltage characteristic

1.3.4. Boundary condition-based memristor model (classical model C4)

The state differential equation of the element obtained by applying the *window function of Corinto-Ascoli* in a combination with the current-voltage dependence is described by (1.30):

$$\frac{dx}{dt} = k i f_{BCM}(x) \quad (1.30)$$

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

where the window function $f_{BCM}(x)$ is:

$$\begin{aligned} f_{BCM}(x) &= 1, & x \in (0,1) \\ f_{BCM}(x) &= 1, & x = 0 \text{ \& } v \geq v_{thr} \\ f_{BCM}(x) &= 0, & x = 0 \text{ \& } v < v_{thr} , \\ f_{BCM}(x) &= 1, & x = 1 \text{ \& } v < -v_{thr} \\ f_{BCM}(x) &= 0, & x = 1 \text{ \& } v \geq -v_{thr} \end{aligned} \quad (1.31)$$

where v_{thr} is the activation threshold of the memristor. The dependencies between state and flux and between voltage and current of the memristor are shown in Fig. 1.14 (c) and (d).

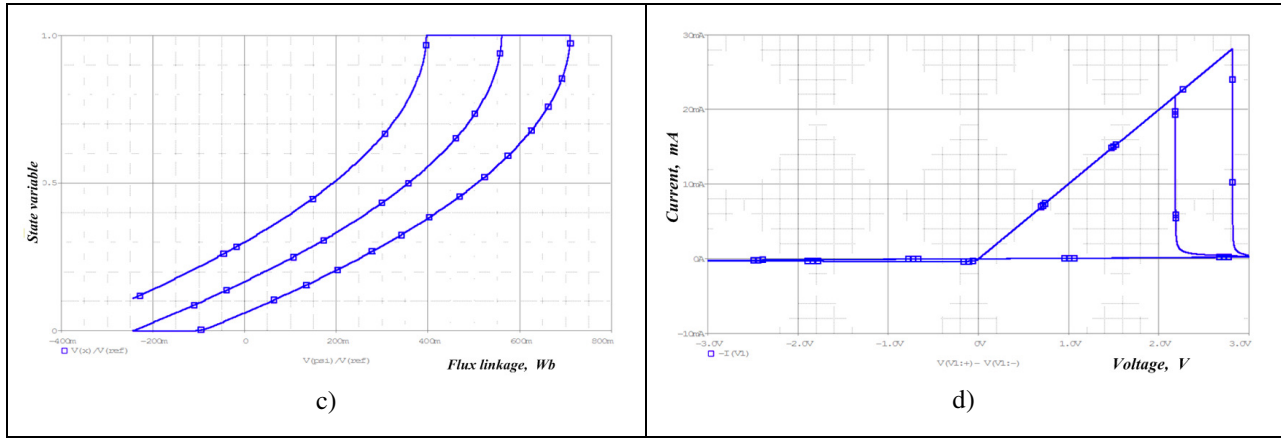


Fig. 1.14 (a) Dependence between state and flow; (b) a current-voltage characteristic

1.3.5. Lehtonen-Laiho model of a titanium dioxide memristor (classical model C5)

The state differential equation obtained by using the Biolek window function in combination with Lehtonen-Laiho current-voltage dependence is described in (1.33):

$$\frac{dx}{dt} = a f(x) v^m \quad (1.33)$$

$$i = x^n \beta \sinh(\alpha v) + \chi [\exp(\gamma v) - 1]$$

where $a, m, \alpha, \beta, \gamma, \chi, n$ are fitting parameters. The dependencies between state and flux and between voltage and current of the memristor are shown in Fig. 1.16 (c) and (d). In this case, it operates in a hard switching mode, the state-flux characteristic is a hysteresis cycle resulting from the boundary effects, and the voltage-current characteristic is an asymmetric curve.

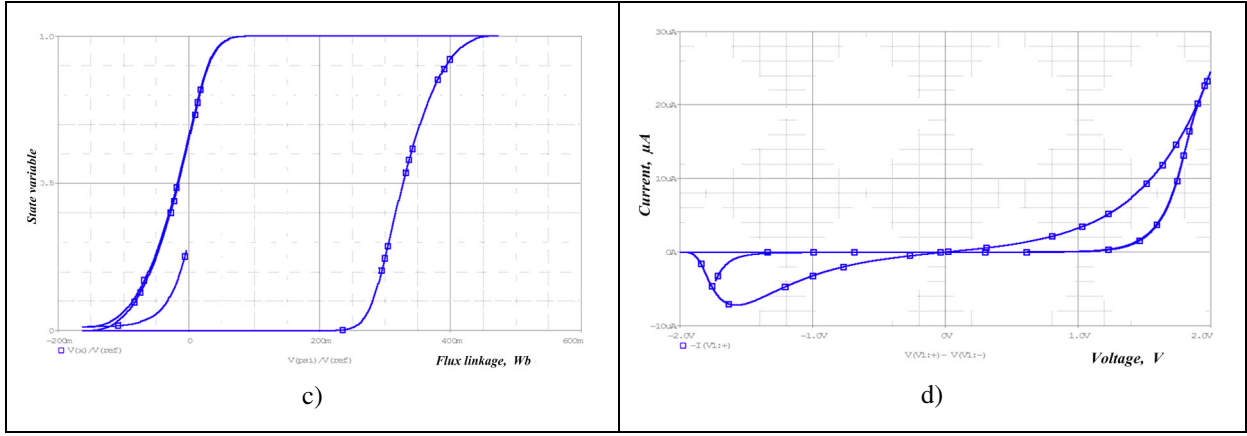


Fig. 1.16 (c) Dependence between state and flux; (d) a current-voltage characteristic

1.3.6. Pickett memristor model

The Pickett model is based on physical measurements and analyses of the mechanism of electric current flowing through a thin tunnel barrier into insulating oxide materials. The dependencies between state and flow and between voltage and current of the memristor are shown in Fig. 1.18 (c) and (d).

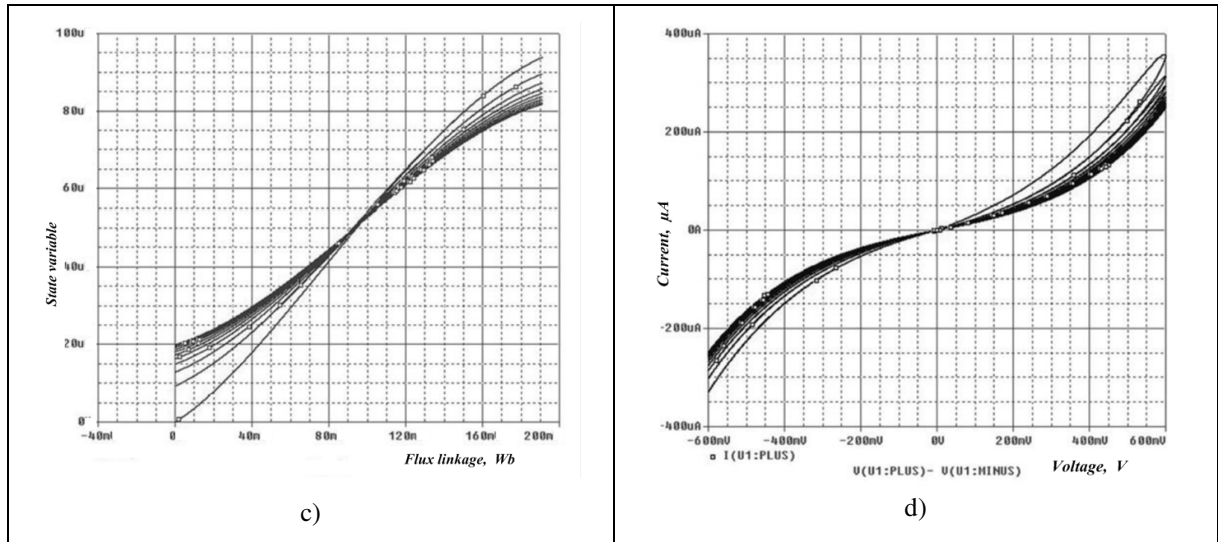


Fig. 1.18 (c) Dependence between state and flux; (d) a current-voltage characteristic

1.4. Hafnium dioxide memristor modeling

The major models of hafnium-dioxide memristors existing in the literature are to some extent inaccurate or very complex for realization. Better models also contain a window function on the right side of the second equation of the description system.

1.4.1. Classic model of hafnium-dioxide memristor without window function and with linear ionic dopant drift (Classic model C6)

The equations describing the considered memristor model are (1.45):

$$\begin{aligned}
v &= M i = [R_{ON} x + R_{OFF} (1 - x)] i \\
\frac{dx}{dt} &= \frac{v(t)}{t_{swp} v_{tp}}, \quad v > v_{tp} \\
\frac{dx}{dt} &= -\frac{v(t)}{t_{swn} v_{tn}}, \quad v < v_{tn} \\
\frac{dx}{dt} &= 0, \quad v_{tn} \leq v \leq v_{tp}
\end{aligned} \tag{1.45}$$

where M is the impedance of the memristor, u_{tp} and u_{tn} are activation thresholds, t_{swp} and t_{swn} are parameters for setting the model. The dependencies between state and flow and between voltage and current of the memristor element are shown in Fig. 1.19 (c) and (d).

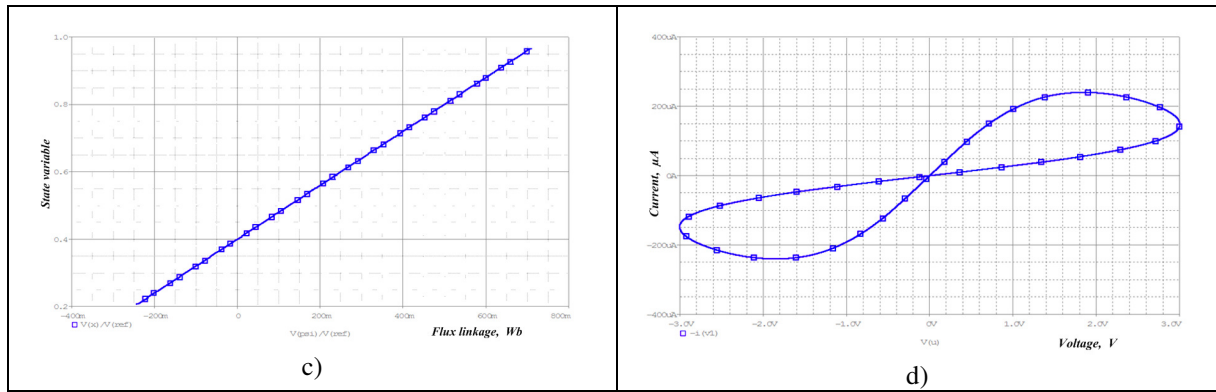


Fig. 1.19 (c) Dependence between state and flow; (d) a current-voltage characteristic

1.4.2. Classic model of hafnium-dioxide memristor with non-linear window function (Classic model C7)

The equations describing this model are:

$$\begin{aligned}
v &= [LRS x + HRS (1 - x)] i \\
\frac{dx}{dt} &= \frac{C_{LRS}}{\Delta r} \left(\frac{v - v_{tp}}{v_{tp}} \right)^{PLRS} f_{LRS}(x), \quad v > v_{tp} \\
\frac{dx}{dt} &= -\frac{C_{HRS}}{\Delta r} \left(\frac{v - v_{tn}}{v_{tn}} \right)^{PHRS} f_{HRS}(x), \quad v < v_{tn} \\
\frac{dx}{dt} &= 0, \quad v_{tn} \leq v \leq v_{tp} \\
C_{LRS} &= \frac{\Delta r}{t_{swp}}; \quad C_{HRS} = \frac{\Delta r}{t_{swn}} \\
f_{HRS}(x) &= \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{[LRS x + HRS (1 - x)] - \Theta_{HRS} HRS}{\beta_{HRS} \Delta r}\right)}, \quad v < v_{tn} \\
f_{LRS}(x) &= \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\Theta_{LRS} LRS - [LRS x + HRS (1 - x)]}{\beta_{LRS} \Delta r}\right)}, \quad v > v_{tp}
\end{aligned} \tag{1.46}$$

The dependencies between state and flow and between voltage and current of the considered memristor model are shown in Fig. 1.21 (c) and (d). In this case, the model represents a hard-switching mode of the memristor.

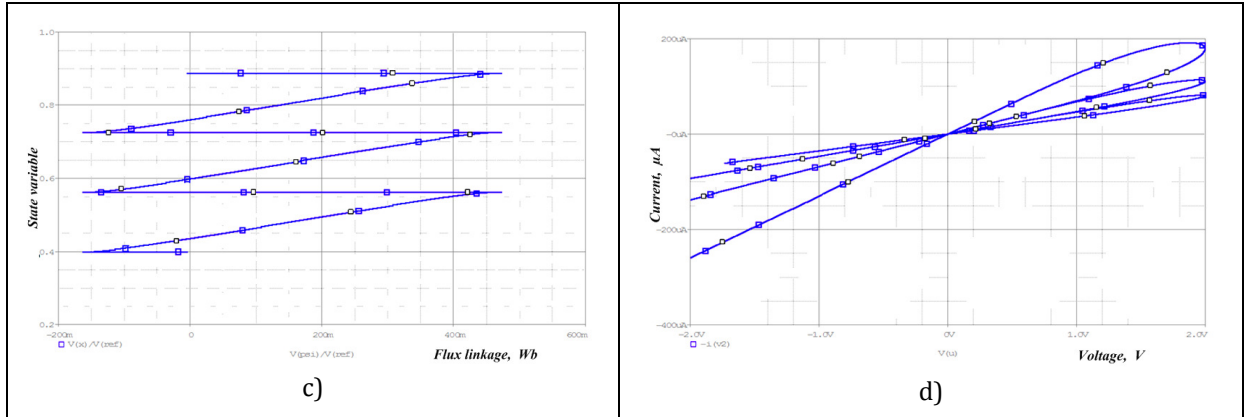


Fig. 1.21 (c) Dependence between state and flux; (d) a current-voltage characteristic

1.5. Motivation, purpose and tasks of the dissertation work

The *motivation* for the dissertation is *the identification of some incompleteness in the scientific literature, mainly related to the realistic representation of the non-linear ion drift of charges in titanium-dioxide and hafnium-dioxide memristor structures at high voltage levels and at high frequencies*. The most commonly used linear classical models (Williams and Strukov, Joglekar, Biolek) have the following drawbacks – satisfactory representation the ion dopant drift only at low voltage levels (up to 1 V) and at low frequencies, and along with some nonlinear models like Lehtonen -Laiho, they use window functions with fixed integer exponent and fixed non-linearity that do not present the realistic non-linear relationship between ionic dopant drift and voltage. In this connection, *there is a need to improve the behaviour of the described models*, which is the main reason for offering improved models. These improved models are tuned by *introducing a new methodology for modelling memristors associated with the use of modified window functions and adjustment of their parameters*.

Therefore, the aim of the present research is to *develop and implement a new advanced methodology for modeling memristors using window functions, which take into account more realistically the physical processes in the modeled memristors*, and study various effects (changing of the concentration of oxygen vacancies in the volume of the memristor) related to the *influence of temperature and diffusion on the physical processes in the memristor and the parasitic inductances and capacitances in the memristor matrices*.

The tasks related to the realization of this goal can be summarized as follows:

1. *Development of a methodology for more realistic modelling of physical phenomena in the memristors by using modified window functions and adjustment of their parameters;*
2. *Application of the proposed methodology for modelling of titanium dioxide*

and hafnium dioxide memristors and for the development of new models of the studied memristors;

3. *Development of PSpice library models* of titanium-dioxide and hafnium-dioxide memristors;

4. *Application of the developed models in the study of analogue and digital schemes, circuits and devices*;

5. *Comparison of the suggested memristor models*;

6. *Investigation of various effects related to the influence of temperature and diffusion on the physical processes in the memristor* (change of the resistance, change of the concentration of oxygen vacancies in the volume of the element) and *the parasitic inductances and capacitances* in the memristor matrices and integrated circuits with *ultra large-scale integration (ULSI)*.

The dissertation consists of 8 chapters and is organized as follows:

The following Chapter 2 describes the advanced methodology for modeling memristors of titanium dioxide, which has been applied to the proposed modified models. Chapter 3 describes the developed PSpice libraries with titanium dioxide memristors. Chapter 4 presents the study of memristor circuits and devices (memristor generators, integrators, counter-parallel and series circuits) with the proposed titanium dioxide models, the influence of temperature, diffusion and parasitic self and mutual inductances and capacitances and the negligible influence of these additional factors on the normal functioning of memristors in ULSI matrixes and ULSIs was found to be negligible, which is why they are not studied in the modeling of complex memristor schemes and circuits (neural networks, memories), attention is drawn to comparison with classical models and is confirmed the operational and realistic behavior of the modified models, as well as the main advantages, electrical parameters and properties of the proposed memristor models. Chapter 5 discusses the advanced modelling of hafnium-dioxide memristors and three modified models. Chapter 6 presents the PSpice library models of the hafnium dioxide memristors. Chapter 7 analyzes electronic circuits and devices using modified models of hafnium dioxide memristors, showing the advantages of the proposed models in relation to the classical models and their functionality in the examined electronic circuits. In Chapter 8 is presented a comparison of the studied models according to some basic parameters, characteristics and behaviour in an electric field. At the end of the manuscript the contributions, the dissertation papers, as well as the final remarks related to the research are presented.

CHAPTER 2. TITANIUM DIOXIDE MEMRISTOR MODELS

Chapter 2 proposes a methodology for advanced modeling of the physical phenomena in the memristors by using modified window functions and adjusting their parameters. Five new modified models of titanium dioxide memristors are proposed. The behavior of the modified memristor models developed in the dissertation is studied.

2.1. A Methodology for advanced modeling of the physical phenomena in the memristors by using modified window functions and adjusting their parameters

The proposed in this paragraph methodology for advanced modeling of physical phenomena in the memristors involves the use of various non-linear window functions with a voltage-dependent integer exponent as well as window functions with an additional non-linear sinusoidal component, by which the nonlinearity of the ionic dopant drift is more realistically modeled. These window functions have setup parameters that are used to adapt the model's current-voltage characteristics. The experimental current-voltage characteristic of the memristor obtained under certain conditions (voltage signal) is used as a reference model for setting the considered models. The developed models are adjusted by varying the tuning parameters to minimize the mean square error between the simulated and the experimental current-voltage characteristics. Once the proposed memristor model is tuned, it is tested for soft and hard switching modes and thus the basic characteristics of the modeled memristor are obtained – the voltage-current characteristic and the state-flux characteristic.

The proposed methodology can be presented as follows:

1. A certain number of working points are selected over a time span in the voltage range used to capture the memristor voltage-current experimental characteristic;
2. The current and voltage for the voltage-current experimental characteristic for each point (for each corresponding time point) are recorded;
3. Simulate the behavior of the memristor using the model. Initial values of the adjustment coefficients are selected arbitrarily if there is no initial information about them, then they change until the experimental and simulated voltage-current characteristics are obtained very close one to another.
4. The current and the voltage for the voltage-current characteristic simulated by the model of the memristor for the selected time points are recorded.
5. Calculate the mean-square error between the two current-voltage characteristics (experimental and simulated by the model).

6. The model parameters are varied and the mean square error, respectively the visual location of the two current-voltage characteristics, is monitored. Initially, an arbitrary step of modifying the parameters of the model is selected, and the proximity of the current-voltage characteristics decreases the parameter change step until a minimum value of the mean square error is obtained.

The proposed methodology is used for all proposed models discussed in the dissertation.

2.2. A memristor model with activation threshold and modified Joglekar window function with voltage-dependent exponent (model M1)

The state differential equation of the memristor obtained by applying the modified window function in a combination with the current-voltage dependence is described by (2.5):

$$i = \frac{v}{R_{ON}x + R_{OFF}(1-x)}$$

$$\frac{dx}{dt} = k \frac{v}{R_{ON}x + R_{OFF}(1-x)} \left[1 - (2x-1)^{2 \text{round}\left(\frac{b}{c+|v|}\right)} \right], \quad (2.5)$$

where b and c are setup parameters. The model setting is done by dividing the time interval of the variation of the linearly applied voltage to 100 equal parts, for each of these 100 points the current values are reported. Then the mean-square error between the simulated and the experimental voltage-current characteristics when varying the setting parameters b and c is calculated. The results are presented in table. 2.1. The voltage at which the experimental voltage-current characteristic is obtained is shown in Fig. 2.1 a). Some of the resulting graphical features in the vicinity of the minimal mean squared error are shown in Fig. 2.1 (b). The minimum error is for parameter values: $b = 9.5$, $c = 6$.

Table 2.1

Comparison of the experimental and simulated voltage-current characteristics according to the modified model M1 with respect to the mean square error, with some values of the setting parameters b and c

b	c	Error, %
10	6	6.93
10.5	6	7.60
9.5	6	6.84
9.5	6.5	6.86
9.5	5.5	7.01
11	5.5	6.95
11.5	5.5	6.98
11.5	6	7.02
11	7	7.12

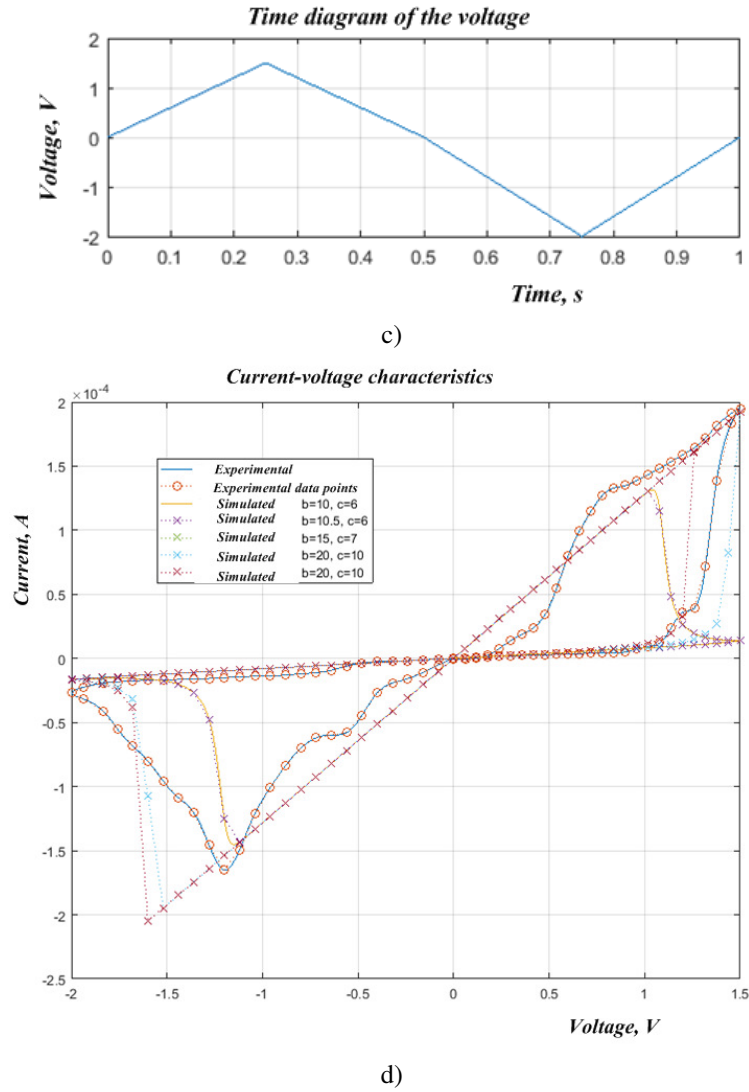


Fig. 2.1. (c) Time diagram of the tension of the memristor; (d) Comparison of the voltage-current experimental characteristic of titanium dioxide memristor with five simulated characteristics obtained by variation of the adjustment coefficients of the modified Joglekar – M1 model

After tuning the model *M1*, it is tested in PSpice environments for different signals to obtain the current-voltage and flux-state characteristics in soft and hard switching modes. The dependences between the state and flux and between the voltage and current of the memristor are shown in Fig. 2.2 (c) and (d).

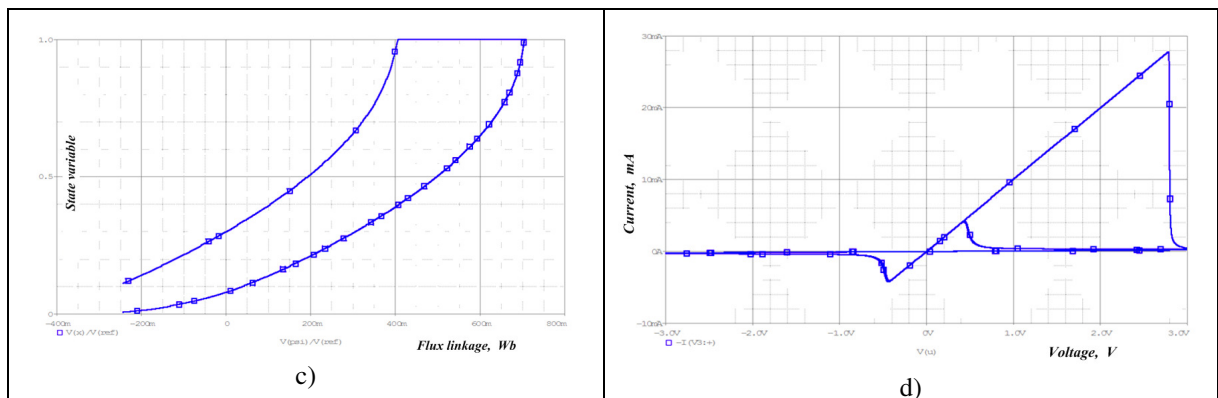


Fig. 2.2 (c) Dependence between state and flux; (d) Current-voltage characteristic

2.3. Non-linear ion drift model, modified *Biolek* window function with additional sinewave component and activation threshold (model *M2*)

The methodology for realistic modeling of physical phenomena in the memristors using the modified window functions and adjustment of their parameters, as described in 2.1 is applied here for the model *M2*.

The state differential equation of the memristor obtained by applying the modified window function in combination with the current-voltage dependence is described by (2.10):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \eta k i \left[\frac{-(x-1)^{2p} + 1 + m(\sin^2(\pi x))}{m+1} \right], & v(t) \leq -v_{thr} \\ \frac{dx}{dt} &= \eta k i \left[\frac{-x^{2p} + 1 + m(\sin^2(\pi x))}{m+1} \right], & v(t) > v_{thr} \\ \frac{dx}{dt} &= 0, & -v_{thr} \leq v(t) \leq v_{thr} \\ v &= R i = [R_{ON}x + (1-x)R_{OFF}] i \end{aligned} \quad (2.10)$$

where m and p are setup parameters. After minimizing the mean square error, the optimal values of the setting parameters are obtained: $m = 12000$; $p = 7$. The dependencies between state and flux and between voltage and current of the memristor are shown in Fig. 2.5 (c) and (d).

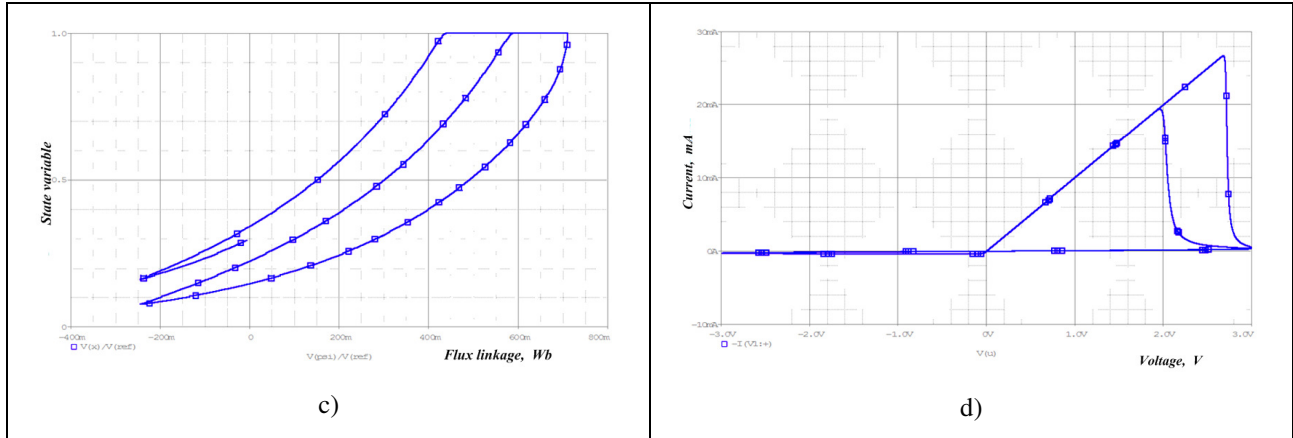


Fig. 2.5 (c) Dependence between state and flux; (d) a current-voltage characteristic

2.4. A memristor model with a modified *Biolek* window function with a voltage-dependent exponent (model *A3*)

A state equation of the memristor obtained by applying the modified window function in a combination with the current-voltage dependence is described in (2.13):

$$\begin{aligned}
\frac{dx}{dt} &= k \eta i \left[1 - (x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{B}{|v|+C}\right)} \right], & v(t) \leq 0, & [i(t) \leq 0] \\
\frac{dx}{dt} &= k \eta i \left[1 - x^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{B}{|v|+C}\right)} \right], & v(t) > 0, & [i(t) > 0] \\
v &= Ri = i [R_{ON}x + (1-x)R_{OFF}]
\end{aligned} \tag{2.13}$$

After minimizing the mean-square error the setting parameters are: $B = 2.3$, $C = 20.1$. The dependencies between state and flux and between voltage and current of the memristor are shown in Fig. 2.8 (c) and (d).

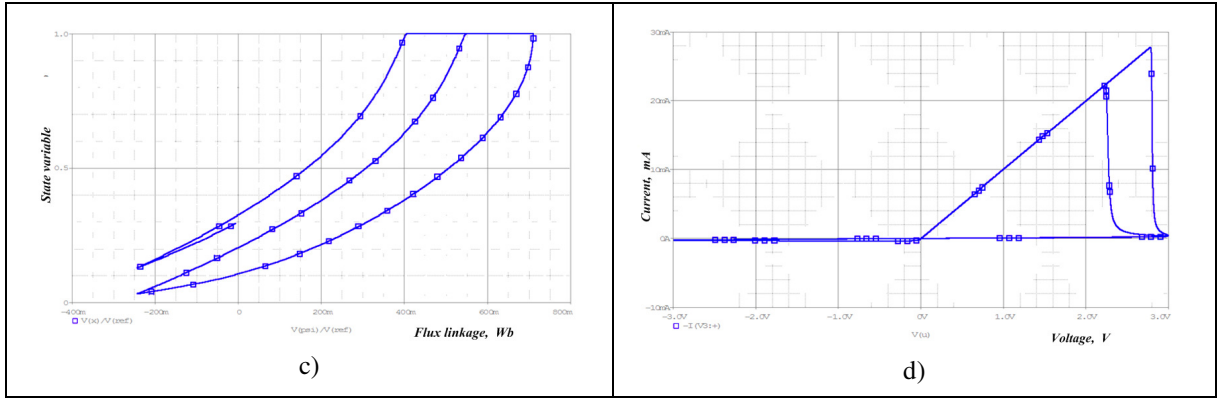


Fig. 2.8 (c) Dependence between condition and flow; (d) a current-voltage characteristic

2.5. A model with a modified *Joglekar-Biolek* window function with an activation threshold and a voltage-dependent exponent (model *M4*)

The state differential equation of the memristor obtained by applying the modified window function in a combination with the current-voltage dependence is described in (2.17):

$$\begin{aligned}
\frac{dx}{dt} &= \eta k i \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[(x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{A}{|v|+C}\right)} + (2x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{A}{|v|+C}\right)} \right] \right\}, & v(t) \leq 0 \\
\frac{dx}{dt} &= \eta k i \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[x^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{A}{|v|+C}\right)} + (2x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{A}{|v|+C}\right)} \right] \right\}, & v(t) > 0 \\
v &= Ri = [R_{ON}x + R_{OFF}(1-x)] i
\end{aligned} \tag{2.17}$$

After minimizing the mean square error, the optimal setting parameters are: $A = 2.34$, $C = 21.12$. The dependencies between state and flux and between voltage and current of the memristor are shown in Fig. 2.11 (c) and (d).

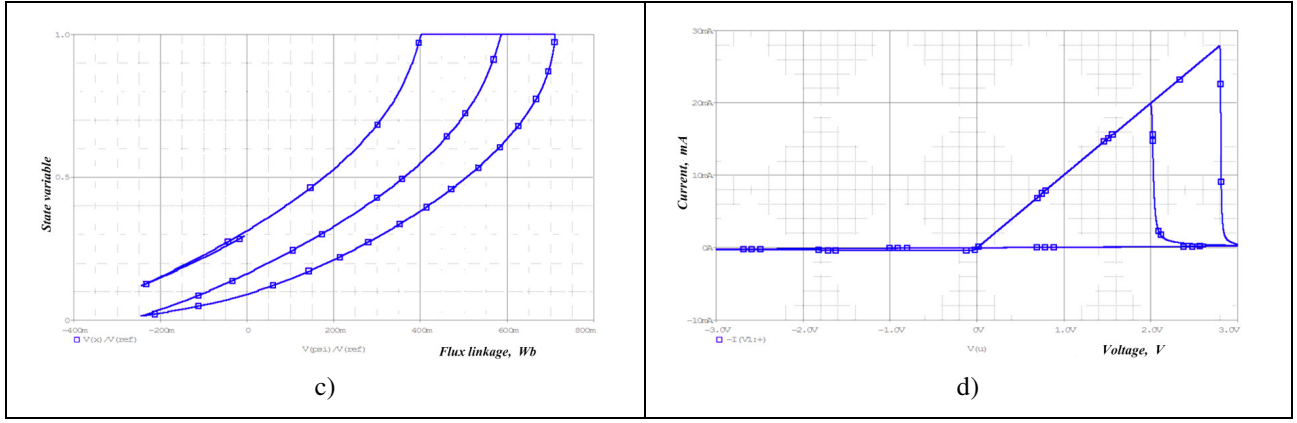


Fig. 2.11 (c) Dependence between state and flow; (d) Current-voltage characteristic

2.6. A nonlinear memristor model with a modified *Biolek-Joglekar* window function and a voltage-dependent exponent (model *M5*)

The state differential equation of the memristor obtained by the application of the window function in a combination with Lehtonen-Laiho current-voltage dependence is described in (2.23):

$$\frac{dx}{dt} = a \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[(x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{a}{|v|+c}\right)} + (2x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{a}{|v|+c}\right)} \right] \right\} v^m, \quad v(t) \leq 0$$

$$\frac{dx}{dt} = a \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[x^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{a}{|v|+c}\right)} + (2x-1)^{2 \cdot \text{round}\left(\frac{a}{|v|+c}\right)} \right] \right\} v^m, \quad v(t) > 0 \quad (2.23)$$

$$i = \chi [\exp(\gamma v) - 1] + \beta x^n \sinh(\alpha v)$$

After minimizing the mean error, the optimal values of the tuning parameters are: $a = 30.2$, $c = 2.3$. Dependencies between state and flux and between voltage and current are shown in Fig. 2.14 (c) and (d).

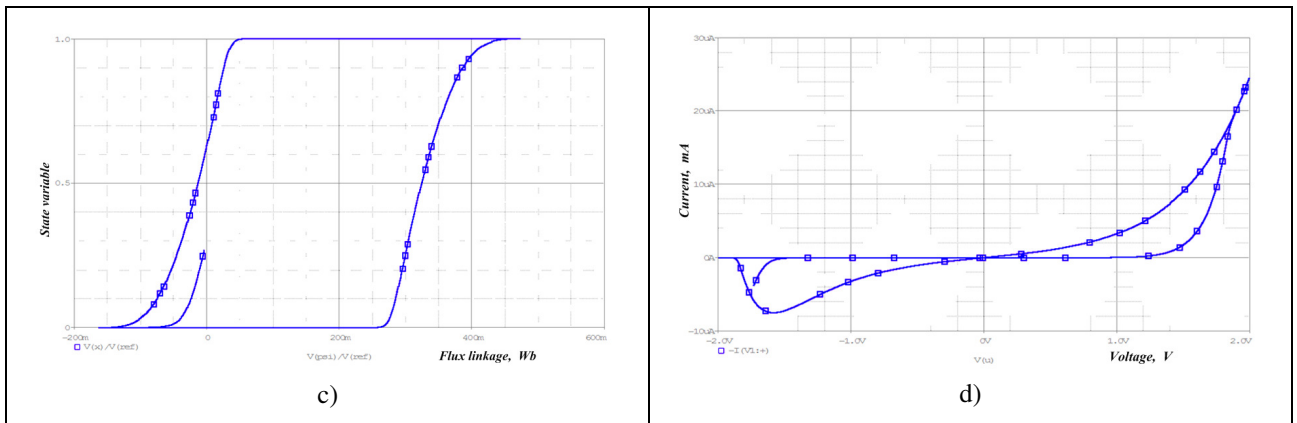


Fig. 2.14 (c) Dependence between state and flux; (d) a current-voltage characteristic

2.7. Conclusions

Chapter 2 of the dissertation proposes and examines modified models of titanium dioxide memristors – Modified Joglekar model with a voltage-dependent integer exponent (model *M1*), Modified Biolek model with additional sinewave component in the window function (model *M2*), Modified Biolek model with a voltage-dependent integer exponent (model *M3*), Modified model with Combined Biolek-Joglekar Window Function with voltage-dependent exponent (model *M4*), Modified Lehtonen-Laiho memristor Model with Biolek-Joglekar Window Function with a voltage-dependent exponent (model *M5*). Their main advantages have been identified. The improved behavior of the proposed models in electric field at high frequencies – the current-voltage characteristic closer to the experimentally recorded *i-v* characteristic and the single-valued state-flux characteristic in soft switching mode, has been confirmed as compared to Biolek model, which, under the same conditions, represents this characteristic with a multi-valued curve. Regarding Pickett's model, there are no problems with the convergence of computational processes. The proposed models with modified window functions are based mainly on the three classic models of memristors described above, Joglekar, Biolek and BCM, and have their basic properties and advantages. The main new advantages of the proposed models of memristors are related to the realistic representation of the ion drift of oxygen vacancies, depending on the applied voltage and the large non-linearity, which allows operation at high signal levels and high frequencies. Another advantage of the proposed models is the better proximity between the resulting voltage-current characteristics and the corresponding experimental current-voltage characteristics. Almost all of the proposed models, except for *M3*, use an activation threshold that enables them to be applied in devices that have to distinguish between low and high-level signals: for example memristor matrices, neural network and others described in Chapter 4. In Table 2.6 a comparison of the proposed models of titanium dioxide memristors is carried out using the main criteria for comparison to their behavior and peculiarities. The benchmarks are defined and described below.

1. **Complexity** – defined as the number of elementary mathematical operations used in the mathematical model of the memristor;
2. **Signal levels** – for low levels, voltages below 1 V, average of 1 to 1.5 V are considered, or above 1.5 V are considered high;
3. **Frequency of signals** – for low frequencies, those from 0.5 Hz to 1 KHz, for medium frequencies – from 1 kHz to 100 kHz, for high frequencies – from 100 KHz to 3 GHz;
4. **Nonlinearity** – qualitatively defined as the degree of deviation of the characteristic "time derivative of the state variable – current of the memristor" from the linear dependence;
5. **Expressing the boundary effects** – this criterion contains two requirements: on the one hand, limiting the state variable in the interval (0, 1), and on the other hand – when the state variable has a value of unity, it remains with this value at in-

creasing the voltage in the positive direction, and begin to decrease when the voltage drops; if the state variable has a value of zero, it keeps this value if the voltage decreases, and starts increasing as the voltage increases.

6. Representation the switching effects – the ability of the memristor model to show the change of the resistance in a wide range (for hard switching mode – from 100 Ω to 16 k Ω , for soft switching mode – from 2 k Ω to 14 k Ω).

7. Operating modes – soft-switching mode when the state variable does not reach its limiting values – zero and unity; hard switching mode – when the state variable reaches and holds its limiting values – zero and unity.

8. Model accuracy – defined as the ability of the model to show the voltage-current characteristic with a minimal error according to the experimental voltage-current characteristic derived under the same conditions. If the mean square error is less than 4%, the accuracy is assumed to be high, if the error is in the range of 4-6%, the accuracy is considered to be satisfactory, and if the error is over 6%, the accuracy of the model is low.

9. Convergence problems – defined as a violation of the normal running of computational operations during simulation and algorithm shutdown as a result of inappropriate convergence of computational operations.

10. Use of an activation threshold – this criterion indicates whether the model has a level of signals (threshold of activation) below which the memristor has a linear resistor behavior and over which the state variable is changed so that the element has a memristor behavior.

11. Opportunity to set the model – the ability of the memristor model to be adapted to a certain voltage-current experimental characteristic, when obtaining a minimal mean squared error.

12. Ability to express asymmetrical voltage-current characteristics – the ability of the model to express the voltage-current characteristic in modes close to hard-switching, with asymmetrical curves, and to express the rectification effect.

13. Expressing the dependence of non-linear ion drift on the voltage – the ability of the model to represent the nonlinearity of the ionic drift (which is inversely proportional to the integer exponent in the window function) as a function of the applied voltage. Such dependence is expressed either by introducing a hyperbolic function between the exponent in the window function and the voltage or by raising an odd degree of current or voltage in the equation expressing the dependence between the derivative of the state variable versus time and current.

14. Correct representation of the state-flux characteristic – the ability of the model to express the state-flux characteristic with a single-line curve in soft-switching mode with a hysteresis multi-valued curve in hard switching mode.

15. Complexity of model setup – determined by the number of coefficients in the model whose values can be changed to improve the match between the simulated and experimental voltage-current characteristics derived under the same conditions.

Table 2.6. Comparison of the proposed and classical titanium dioxide models of their behavior in an electric field and their peculiarities

Model	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	<i>M4</i>	<i>M5</i>
Signal levels	low and middle	low and middle	low and middle	low and middle	random	low and middle	random	random	random	random
Nonlinearity	middle	middle	middle	low	high	high	high	high	high	high
Expression of Boundary effects	partially	partially	yes	yes	partially	yes	yes	yes	yes	yes
Switching frequencies	low	low	low	low	low, middle and high	low and middle	low and middle	low and middle	low and middle	low, middle and high
Modes	soft-switching	soft switching	soft and hard switching	soft and hard switching	soft and hard switching	soft and hard switching	soft and hard switching	soft and hard switching	soft and hard switching	soft and hard switching
Accuracy	low	low	satisfactory	satisfactory	high	high	high	high	high	high
Activation thresholds	no	no	no	yes	no	yes	no	yes	yes	yes
Possibility for tuning the model	no	partial	partial	no	partial	yes	yes	yes	yes	yes
Expression of asymmetric i-v relationships	no	no	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Expressing the relationship between nonlinear ionic drift and voltage	no	no	no	no	no	yes	yes	yes	yes	yes
Representation the state-flux characteristics	no	partially, for middle and high frequencies	partially, for middle and high frequencies	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Application	analog and digital devices	analog and digital devices	analog and digital devices, neural networks	analog and digital devices	analog and digital devices, neural networks, memories	analog and digital devices, neural networks	analog and digital devices, neural networks	analog and digital devices, neural networks	analog and digital devices, neural networks, memories	analog and digital devices, neural networks, memories

CHAPTER 3. DEVELOPING PSPICE LIBRARIES WITH TITANIUM DIOXIDE MEMRISTOR

This chapter describes the development of PSpice library models of titanium dioxide memristors based on their mathematical models. The symbolic and library models of titanium dioxide memristors have been generated for their application in electronic circuits. The most well-known classical memristor models (Strukov Williams – *C1*, Joglekar – *C2*, Biolek – *C3*, Ascoli and Corinto – *C4*, Lehtonen – Laiho – *C5*), and the modified models of titanium dioxide memristors (Modified Joglekar model *M1*, modified Biolek model with additional sine-wave component in the window function *M2*, Modified Biolek model with voltage dependent exponent *M3*, Modified model with Biolek-Joglekar combined window function with a voltage-

dependent exponent – $M4$, modified Lehtonen-Laiho model with Biolek-Joglekar combined function with a voltage-dependent exponent – $M5$) have been considered. The functionality of the created PSpice Memristor Library Models has been confirmed.

3.1. General information for the development of titanium dioxide memristor models

Titanium dioxide memristor models are very important for their use in the analysis of memristor electronic circuits by computer simulations. Each model has basically two equations: the first one gives the dependence between current and voltage, where the state variable is also involved. The second equation gives the dependence of the time derivative of the state variable and the memristor current. These equations serve as a basis for generating library models of titanium dioxide memristors in PSpice environment. Here are the developed PSpice library models of the titanium dioxide-based memristors, based on their mathematical models, for their application in electronic circuits. The PSpice models are used to compare both the results and to confirm the functionality of the developed modified models and their more realistic behavior in various electronic circuits *at high frequencies*.

3.2. Development of PSpice library models of titanium dioxide memristors

This section describes the libraries of PSpice models of memristors developed in connection with the dissertation. The creation of the libraries of the memristor models takes place in the PSpice environment. It proceeds from the equation of the state variable of the memristor by starting a substitution scheme. The state variable is involved in the window function of the right part of the state differential equation. The current is expressed by the first equation of the system describing the respective model as a function of the voltage and the state variable. After obtaining the time derivative of the state variable, an integration block with an initial condition is used – the value of the state variable before the simulation is equal to the initial condition of the integrator. By using feedback, the substitution scheme is established by replacing the state variable from the first equation of the system and describing the memristor model. The flux is obtained from the output of an integrating unit and the signal of the memristor voltage is fed to its input. The simulation is performed in the time domain, the time-sampling step is selected according to the requirements for maximum accuracy of the results, i. e. it should be very small according to the selected simulation time of the circuit. As a signal source a VSIN sine wave source is used. The current flowing through the memristor, excited by the applied voltage, is obtained by connecting a current source controlled by a signal proportional to the current through the memristor – ABM library element connected in parallel to the voltage source.

The terminals of the memristor in the library model code are designated respectively as "a" for the anode and "c" for the cathode. The resulting code starts with the .SUBCKT MEMRISTOR A C command, following the description of the substitution scheme, which specifies the connections of the used elements between the nodes

of the circuit. The code ends with the .ENDS command. The resulting code is used to create a library model using the PSpice MODEL EDITOR tool. The library element is added to the other libraries used in PSpice. The library of developed models is shown in Fig. 3.1. The symbols of the developed models are given in Fig. 3.2.

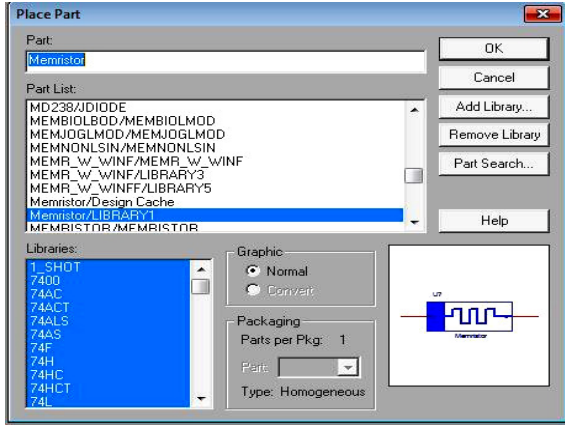


Fig. 3.1. Memristor models library

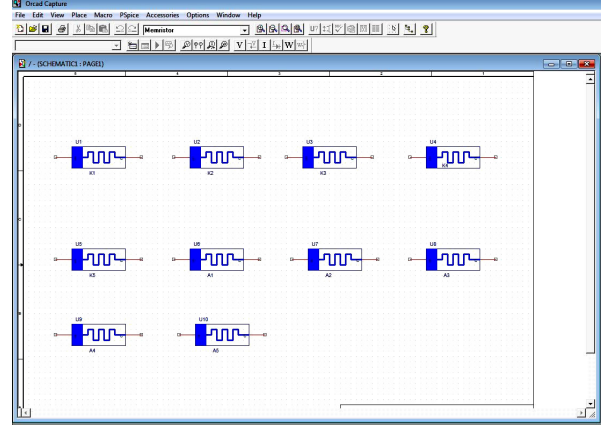


Fig. 3.2. Symbols of the classical and modified memristor models

3.2.1. A titanium dioxide memristor model without window function and with a linear ionic dopant drift

This paragraph describes the development of a PSpice library model of a titanium dioxide memristor without window function and with a linear ionic drift based on its mathematical model. The main quantities used in the mathematical model of the memristor element are:

$R_{ON} = 100 \, \Omega$ – minimal resistance of the memristor in a fully closed state; $R_{OFF} = 16 \, \text{k}\Omega$ – maximal resistance of the memristor element in a fully open state; $k = 10 \, 000 \, \text{C}^{-1}$ – this constant depends on the physical parameters of the memristor (from the mobility of the charges, the R_{ON} resistance and the length of the memristor D) the value used in the model is presented above; x – the state variable of the memristor equal to the ratio of the length of the doped region of the memristor w to its whole length D . The mathematical model of the memristor is:

$$\begin{cases} v = i [R_{ON}x + R_{OFF}(1-x)] \\ i = \frac{v}{R_{ON}x + R_{OFF}(1-x)} \\ \frac{dx}{dt} = ki = k \frac{v}{R_{ON}x + R_{OFF}(1-x)} \end{cases}$$

The corresponding PSpice code of this classical library memristor model is:

PSpice code of a library model of a titanium dioxide memristor without window function and with a linear ionic dopant drift

```
.subckt memr_w_winff a c
V_CONST1      N00513 0 DC 1.000
E_DIFF2       N00569 0 VALUE {V(N00513,X)}
E_GAIN3       N00778 0 VALUE {10E3 * V(IM)}
X_INTEG2      U PSI SCHEMATIC1_INTEG2
X_INTEG1      N00778 X SCHEMATIC1_INTEG1
E_GAIN2       N00619 0 VALUE {16E3 * V(N00569)}
R_R1          AC 1t
R_R2          C 0 1t
E_SUM1        M 0 VALUE {V(N00619)+V(N00558)}
G_ABMI1       AC VALUE { V(IM) }
E_DIFF1       U 0 VALUE {V(N00260,C)}
E_ABMI1       N00705 0 VALUE { 1/(V(M)) }
E_MULT1       IM 0 VALUE {V(N00705)*V(U)}
E_GAIN1       N00558 0 VALUE {100 * V(X)}
.ends memr_w_winff

.subckt SCHEMATIC1_INTEG2 in out
G_INTEG2      0 $$U_INTEG2 VALUE {V(in)}
C_INTEG2      $$U_INTEG2 0 {1/1.0}
R_INTEG2      $$U_INTEG2 0 1G
E_INTEG2      out 0 VALUE {V($$U_INTEG2)}
.IC          V($$U_INTEG2) = 0v
.ends SCHEMATIC1_INTEG2

.subckt SCHEMATIC1_INTEG1 in out
G_INTEG1      0 $$U_INTEG1 VALUE {V(in)}
C_INTEG1      $$U_INTEG1 0 {1/1.0}
R_INTEG1      $$U_INTEG1 0 1G
E_INTEG1      out 0 VALUE {V($$U_INTEG1)}
.IC          V($$U_INTEG1) = 0.4
.ends SCHEMATIC1_INTEG1
```

The developed PSpice library memristor model are analyzed in a sinusoidal mode. The resulting voltage-current characteristics are presented in Fig. 3.3 for soft switching mode. The results are in agreement with the expected behavior of the memristor and confirm the viability of the PSpice library memristor model and the possibility of its application in the study of memristor circuits.

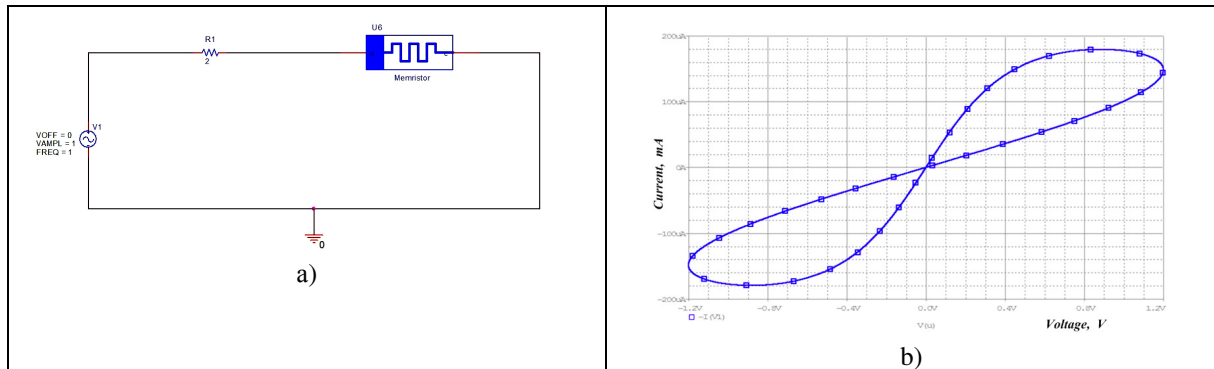


Fig. 3.3 (a) Memristor test scheme for sinusoidal voltage; (b) Voltage-current characteristic, derived using a non-windowed memristor model

3.3. Classical titanium dioxide memristor models

The classical memristor models of Strukov and Williams, Joglekar, Biolek, Corinto and Ascoli and Lehtonen-Laiho are used very often in the investigation of memristor devices and circuits. To compare the results obtained with the proposed and classical models their library PSpice models have been developed.

3.4. Modified memristor models based on titanium dioxide material

These models use modified window functions that realistically represents the physical phenomena in the memristors.

3.5. Conclusions

This chapter describes the development of PSpice library models of titanium dioxide memristors based on their mathematical models. The symbolic and library models of titanium dioxide memristors have been generated for their application in electronic circuits. The most well-known classical models (Strukov-Williams – *C1*, Joglekar – *C2*, Biolek – *C3*, Ascoli and Corinto – *C4*, Lehtonen – Laiho – *C5*) and the modified models – modified model with Joglekar window function with a voltage-dependent exponent *M1*, modified Biolek model with additional sine-wave component in the window function *M2*; Modified Biolek model with a voltage-dependent exponent *M3*, Modified Biolek-Joglekar combined window model with a voltage-dependent exponent – *M4*; a model of Lehtonen-Laiho combined with Biolek-Joglekar window function with a voltage-dependent exponent – *M5*) have been described. The generated library models have been tested in a sinusoidal mode. No convergence problems have been observed. The functionality of the developed library memristor models for the analysis of electronic circuits and circuits has been confirmed. The main advantages of the modified models with respect to the classical models have been found – greater nonlinearity of the ionic dopant drift, expression of state-flux characteristics with single-valued curves in soft switch mode and use of activation threshold.

CHAPTER 4. ANALYSIS OF MEMRISTOR CIRCUITS AND DEVICES WITH TITANIUM DIOXIDE MEMRISTOR MODELS

The main purpose of this chapter of the dissertation is the study of memristor electronic devices by the proposed models and comparison of the obtained results with those of the classical memristor models, as well as the analysis of the influence of temperature and parasitic parameters (own and mutual inductances and capacitances) on the normal functioning of memristor matrices and integrated circuits. The advantages of the proposed models with respect to classical models, their functionality and suitability for the investigation of complex electronic circuits and devices and their improved features and operation in electronic circuits have been confirmed. For this purpose, several basic electronic circuits (simple circuits – series memristor circuit, Wien bridge generator, parallel memristor circuit, integrating devices, memristor perceptron, and complex electronic circuits – neural networks, passive and hybrid memristor memories) have been analysed for soft switching and

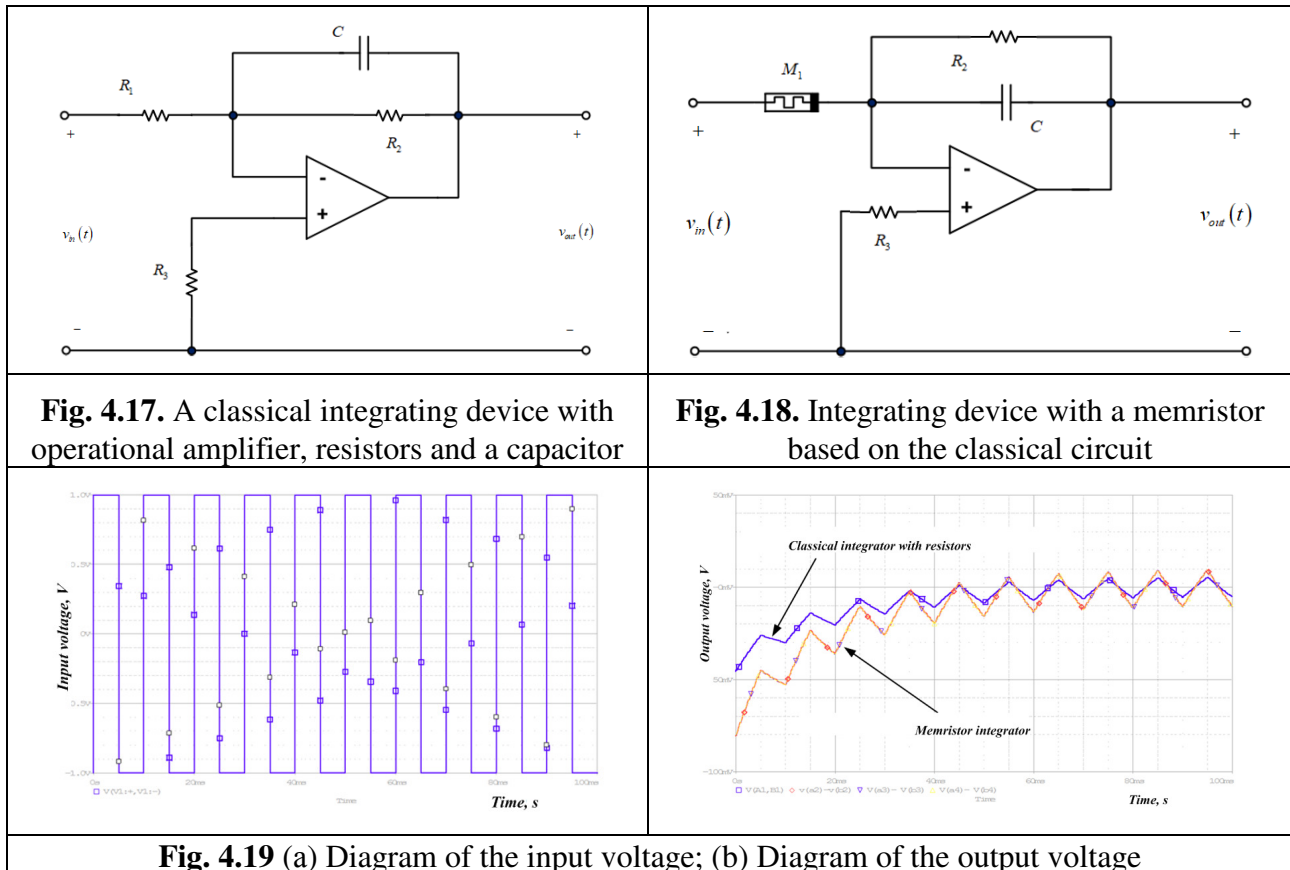
hard-switching mode, and the switching properties of memristor models and their peculiarities have been established.

4.1. Simple memristor circuits

In this section, electronic devices (series and parallel circuits, generator, integrating devices, memristor perceptron) with memristors, using the developed models and the classical memristor models, have been examined. A comparison of the results has been made and the main advantages of the proposed models with regard to the classical models of memristors have been established. The functionality of the modified models when operating in simple electronic circuits and devices has been confirmed.

4.1.4. Integrating devices with memristors

Integrator devices are important and widely applied modules in many complex radio-electronic circuits. The development of their new circuit designs is mainly related to their universal applications in electronics. The purpose of the study in this paragraph is to analyze the proposed memristor-based integrator device with an operational amplifier with the proposed new models and with the classical models in the dissertation and to compare the results. The circuit is based on the classical integrator with resistors and capacitors and an operational amplifier. In the proposed circuit, the resistor responsible for the integrating processes is replaced by a memristor. Figures 4.17, 4.18 show circuits of integrator with a resistor-capacitor circuit and its corresponding memristor analogue. The time diagrams of the input and output voltages are given in Fig. 4.19.



4.2. Investigation of physical dependencies and parasitic parameters of the titanium dioxide memristor

This section examines the influence of temperature on the behavior of the titanium dioxide memristors in an electric field, in particular the dependence of the mobility of the charges in the memristor on the temperature, its resistance in the on and off state, the speed of the diffusion processes between the doped and the undoped regions of the memristor, as well as the parasitic parameters of the memristors, organized in memristor matrices and integrated circuits with ultra large-scale integration (ULSI). Such type of research has not been found in the literature, so this section addresses these issues.

In organizing the memristors in memristor matrices representing ultra-high integrated circuits, in the processes of operation and thermal energy dissipation the temperature rises as a result of the close location of the memristors relative one to another. It is necessary to assess how its impact should be taken into account. The aim of the study is to show that the influence of temperature on the behavior of the memristors and in particular on the mobility of the charges, the resistance of the memristors and the diffusion processes in them, as well as the influence of the parasitic parameters of the memristor matrices (own and mutual capacitances and inductances) is negligible in the modeling of the memristors, which is why these additional factors can be ignored.

The purpose of this study is to determine the influence of temperature on the behavior of the titanium dioxide memristor in an electric field. The analysis of the dependence between the mobility of oxygen vacancies and the absolute temperature T is based on the use of literary data. From these data an approximate dependence between the mobility of oxygen vacancies and the absolute temperature of the material is obtained:

$$\mu_v = 3 \times 10^{-12} + 1 \times 10^{29} (-0.0005 \times T^{-18} - 0.2394 \times T^{-17}) \quad (4.19)$$

4.2.2. Dependencies between the ON and OFF resistances of the memristor and the temperature

This section explores the dependence of the *ON* and *OFF* resistances of the titanium dioxide memristor on the temperature based on experimental data. The purpose of this study is to determine the influence of temperature on the behavior of the titanium dioxide memristor in an electric field and its switching properties. Based on the experimental relationship between the specific conductivity σ of amorphous titanium dioxide and the absolute temperature T , the corresponding dependence is approximated:

$$\lg \sigma = 5.72 \lg T - 9 \quad (4.20)$$

Based on (4.20) the relationship between the specific conductance of the titanium dioxide and the temperature is established:

$$\begin{aligned}
\lg \sigma &= 5.72 \lg T - 9 \\
\sigma &= 10^{(5.72 \lg T - 9)} \\
\rho &= \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{10^{(5.72 \lg T - 9)}}
\end{aligned} \tag{4.21}$$

If the dimensions of the electrodes are 10 nm x 10 nm and the distance between them is 10 nm for the resistances of the memristor (R_{OFF} and R_{ON}) then the following results are obtained:

$$R_{OFF} = 2.06 \times 10^{18} T^{-5.72} \tag{4.22}$$

$$R_{ON} = 6.33 \times 10^{16} T^{-6} \tag{4.23}$$

In Fig. 4.29 the relationships between R_{OFF} and R_{ON} and the temperature t^0 are presented. The R_{OFF} and R_{ON} resistance decreases as the temperature of the memristor increases. In the operating temperature range of ICs and the Memristor Matrices (-15: 75°C), the change in the resistance of the memristors under the influence of temperature is in a relatively wide range, but in all cases R_{ON} is small enough and R_{OFF} is high enough, so the memristor works properly as an electronic switch. Therefore, the influence of temperature on the memristor resistances can be neglected in memristor modeling.

4.2.3. Analysis of diffusion processes in titanium dioxide memristors

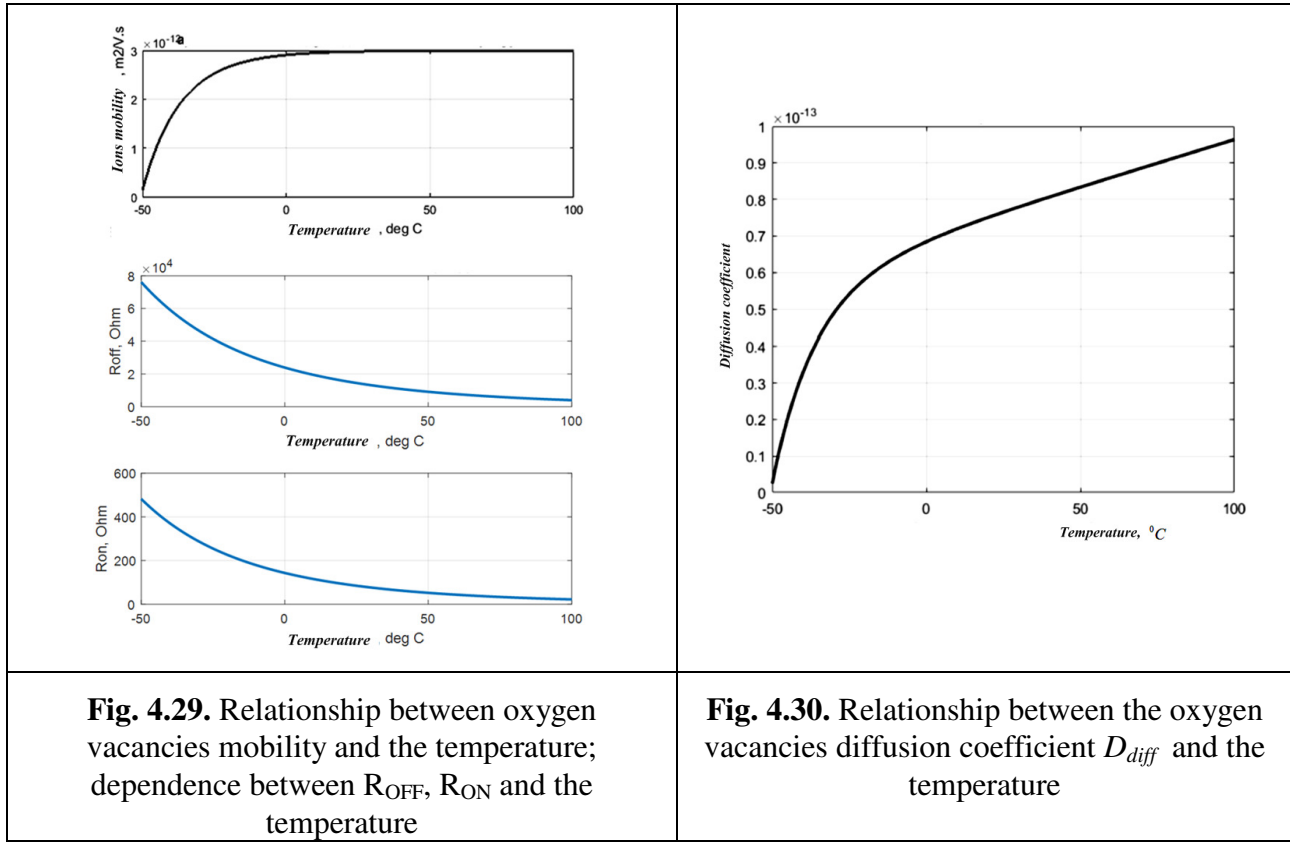
This paragraph examines the dependence of the diffusion rate of oxygen vacation from the doped to the un-doped layer of the titanium dioxide memristor on the temperature. Dependence is derived from experimental data. The purpose of this study is to determine the influence of temperature on the behavior of the titanium dioxide memristor in an electric field, taking into account the internal diffusion processes in the element. The concentration gradient of oxygen vacancies in the vicinity of the boundary between the doped and the un-doped region of the memristor causes diffusion processes from the anode to the cathode region of the memristor element that are equivalent to diffusion current:

$$J_{v_o} = -qD_{diff} \frac{\partial N}{\partial x}, \tag{4.24}$$

where q is the charge of an oxygen vacation and it can be expressed as follows: $q = 2 \cdot e = 3.2 \cdot 10^{-19}$ C, D_{diff} is the diffusion coefficient of oxygen vacancies, N is the volume concentration of the oxygen vacancies in the memristor element and x is the coordinate, on which diffusion is predominantly occurring. The diffusion coefficient of oxygen vacancies in the volume of the memristor according to the temperature is represented by (4.25):

$$D_{diff} = \frac{\mu_v k_B T}{q}, \tag{4.25}$$

where k_B is the Boltzmann constant and it is equal to $1.3787 \cdot 10^{-23}$ J / K, and μ is the oxygen vacation mobility given by (4.1). The dependence between the diffusion coefficient D_{diff} and the temperature t^0 , taking into account the ionic mobility of the temperature, is presented in Fig. 4.30.



This dependence must be taken into account when the memristor operates at different ambient temperatures. The diffusion coefficient D_{diff} increases with increasing the temperature. This phenomenon can be physically explained by increasing the kinetic energy of oxygen vacations and their facilitated penetration from the doped layer to the depletion of the charge (non-altered) region of the memristor. In the operating temperature range of the integrated circuits and the memristor matrices (-15: 75°C), the diffusion coefficient changes almost linearly. The maximum variation of the diffusion coefficient according to its room temperature value is about 20%, which will be taken into account when determining the storage time of the charge in the memristor. Fick's second law for the diffusion in the memristor element is represented by (4.26):

$$\frac{\partial N_{V(O)}}{\partial t} = D_{diff} \frac{\partial^2 N_{V(O)}}{\partial x^2}, \quad (4.26)$$

where $N_{V(O)}$ is the volume concentration of the oxygen vacancies. In the present case a diffusion process is occurring from a limited source (the doped layer) – oxygen vacancies. The initial conditions (concentration of oxygen vacancies) are given by (4.27):

$$N(t, x) = N_s, \quad t = 0, \quad x = 0, \quad (4.27)$$

where N_s is the surface concentration of the ions near the boundary between the altered and the non-altered region. At the beginning of the diffusion process for the boundary of the structure, the oxygen vacancy concentration has a maximum value of N_s . The relevant boundary conditions (the concentration of the doping component) are described by (4.28):

$$N(t, x) = 0, \quad t > 0, \quad x \rightarrow \infty. \quad (4.28)$$

The derivative of the charge concentration according to the coordinate x near the anode boundary of the memristor is expressed by (4.29):

$$\frac{dN(x, t)}{dx} = 0, \quad t \in (0, \infty), \quad x = 0 \quad (4.29)$$

The solution of equation (4.26) using the stated above initial and boundary conditions is:

$$N_{V(O)}(x, t) = N_s^I \exp\left(-\frac{x^2}{4D_{diff}t}\right) [m^{-3}] \quad (4.30)$$

With increasing the diffusion time, the concentration of ions in the depleted layer decreases. This is due to the penetration of the doping component into the volume of the memristor and the depletion of the material of oxygen vacancies. Depending on the doping source, oxygen concentration decreases. After a prolonged time interval (about 2 years), the concentration of the doping ions equals the entire memristor space and the stored information changes. With a maximum variation of the diffusion coefficient in the memristor operating temperature range (-15: 75 ° C) based on (4.25) and assuming the values of the maximum and the present volume concentration of the ions are the same, the ratio of relevant times for loss of information in the memristor is calculated:

$$\frac{N_{V(O)1}(x, t)}{N_{V(O)2}(x, t)} = \frac{N_s^I}{N_s^I} \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4D_{diff1}t_1}\right)}{\exp\left(-\frac{x^2}{4D_{diff2}t_2}\right)} = 1 \quad (4.31)$$

After processing of (4.31) the following result is derived:

$$t_2 = \frac{D_{diff1}}{D_{diff2}} t_1 \approx 0.8 t_1, \quad (4.32)$$

i. e. the time for loss of information in the memristor in the operating temperature range is reduced by about 20%, which can be practically ignored with regard to the time of data loss at room temperature (2 years) in the modeling of titanium dioxide memristors.

4.2.4. Analysis of own and mutual inductances and capacitances between the elements of a memristor matrix

In this paragraph, a detailed study of the influence of the parasitic parameters of the memristor (own inductances and capacitances) and the parasitic parameters of a memristor matrix (mutual inductances and capacities) between the elements on the functioning of the memristors in Integrated Circuits with ultra large-scale integration (ULSI) is made.

The coefficient of mutual induction between the memristor elements M is almost equal to each of its own inductances, due to the proximity of the elements in the memristor matrix and the practically complete coverage of the magnetic flux from the two platinum rims of the neighboring memristors – Fig. 4.31. Connection factor k has a value close to one. Three values of k : $k = 0.90$, $k = 0.95$ and $k = 0.99$ are applied in the study.

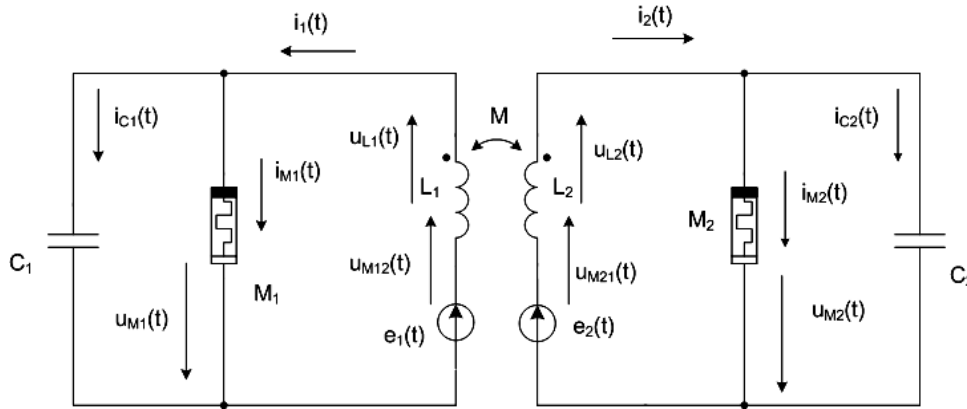


Fig. 4.31. An electrical substitution scheme of a memristor matrix fragment containing two adjacent memristors and corresponding parasitic parameters – inductances and capacities

The capacitances C_1 and C_2 are calculated as capacity of a flat capacitor. Parasitic capacity is a combination of the two capacities of the doped and the un-doped areas connected in series. The values of the relative dielectric permeability of the doped and the un-doped regions of the memristor (ϵ_{r1} and ϵ_{r2}) are respectively 170 and 150. The width of the memristor electrodes a is 10 nm. The lengths of the doped (D_1) and the un-doped (D_2) regions of the memristor are $D_1 = w_1 = 1$ nm, and $D_2 = D_1 - w_1 = 9$ nm. The equivalent capacitance between the memristor electrodes is given by (4.33):

$$C_{par} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{a^2}{D_1} \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{a^2}{D_2}}{\epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{a^2}{D_1} + \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{a^2}{D_2}} = 1 \times 10^{-17} \text{ F} \quad (4.33)$$

The parasitic own inductance is calculated by solving a determined two-sided integral and using the theory of electromagnetic field. An ended-length conductor 1 is located on the z -axis. The calculation assumes that a DC current i is passed through the conductor. At the center of the Cartesian coordinate system a current

element idl is placed (Fig 4.32)]. Induction lines of the magnetic field are concentric circles that are located in planes parallel to the coordinate xOy plane.

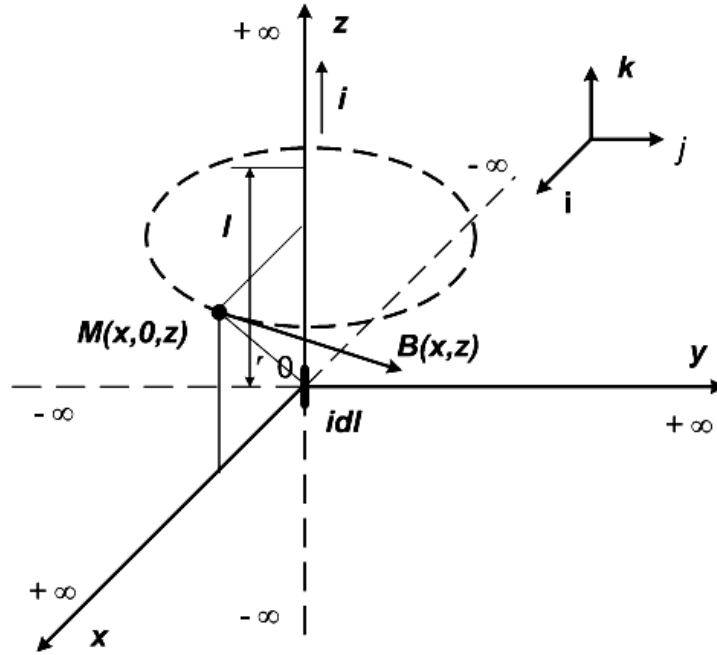


Fig. 4.32. The three-dimensional coordinate system used to obtain the titanium dioxide memristor self inductance coefficient

Taking into account the lengths of the corresponding memristor electrodes, the own inductance of the memristor element is (4.40):

$$L = \left| \frac{\Phi}{i} \right| = \left| \frac{\frac{\mu_0 i}{4} l}{i} \right| = \frac{\mu_0}{4} l = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{4} \times 0,03 = 9,4248 \times 10^{-9} H = 9,4 [nH] \quad (4.40)$$

The parasitic inductance of the memristory element at the center of the memory matrix memory matrix is $L = 9.4$ nH.

From the analyzes made it is found that the parasitic parameters (own and mutual inductances and capacities) of the matrix matrices have very low values with respect to the relevant parasitic parameters in CMOS integrated circuits and therefore they may not be taken into account in the modeling of the memristors in the working temperature and frequency intervals of integrated circuits and memristor matrices.

4.3. Complex memristor circuits

The purpose of the present research is to analyze neural networks and memristor memories using modified models and classical memristor models and comparison of results in order to express the peculiarities and advantages of modified memristor models according to the classical models of titanium dioxide memristors.

4.3.5. Hybrid resistance-switching memory

The purpose of this is to study hybrid memory with the modified models and the classical memristor models and to compare their characteristics derived in pulse mode operation.

Fig. 4.46 shows a fragment of a resistance-switching memory chip with four memristor cells and several separating MOS transistors. Selecting the relevant memory elements makes possible storing a bit of information – a logical unity or a logical zero in the memory. MOS transistors are used to eliminate the parasitic sneak paths between the bit lines and the corresponding word lines. The write and read enable signals are applied to the gates of the respective MOS transistors and thus the target element of the memory is selected. To record a logical unity, a positive voltage impulse is applied to the corresponding memristor. A negative signal is used to record a logical zero.

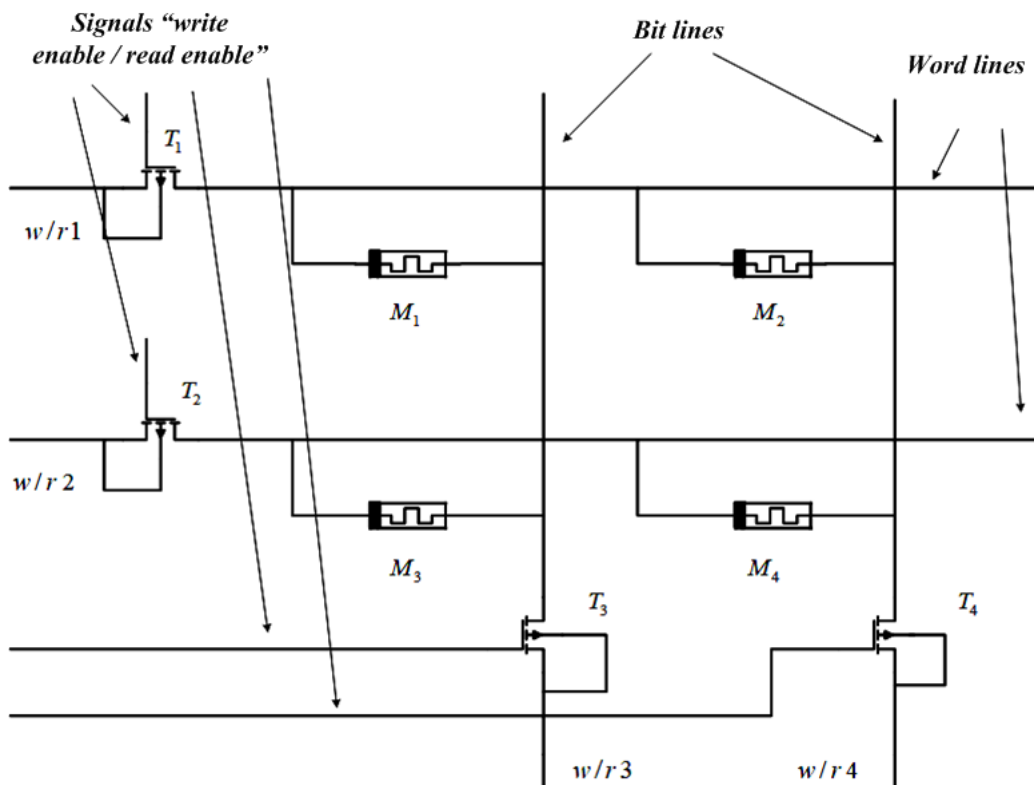


Fig. 4.46. A fragment of a hybrid resistance-switching memory crossbar

The potentials of the source electrodes of the MOS transistors T1 and T3 are pulses of different levels and polarities. After a comparison of the current-voltage dependences of the memristor element obtained using the applied model $M3$ and the classic model $C5$, a relatively good similarity between them is found. The voltage-current characteristic is given in Fig. 4.47. The time diagrams of the state variable and the resistance of the memristor element M_1 are shown in Fig. 4.48.

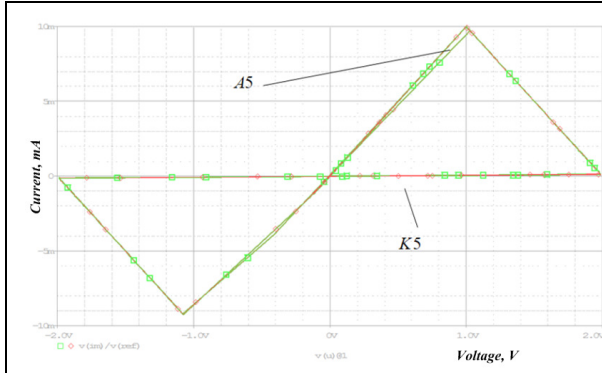


Fig. 4.47. Voltage-current characteristics of the memristors

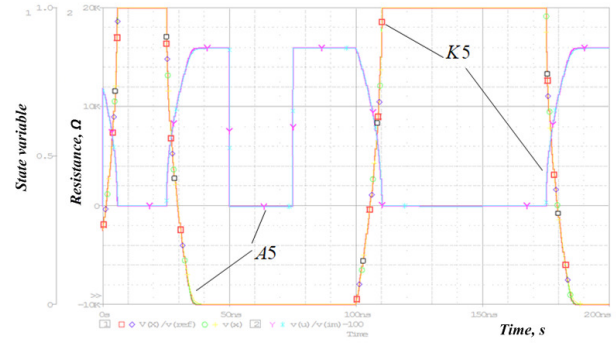


Fig. 4.48. Time diagrams of the state and the resistance

4.4. Conclusions

This chapter explores memristor electronic devices through the proposed improved models of the memristor, and compares the results obtained with those of the best classical memristor models. It confirms the functionality of the modified memristor models and their suitability for the study of complex electronic circuits and devices as well as their improved characteristics and behavior in such circuits. For this purpose, several simple electronic circuits (series and parallel circuits, Wien bridge generator, integrating device, memristor perceptron) and complex electronic circuits (neurons and neural networks, memristor matrices – passive and active memories) in soft-switching mode and in hard-switching mode, which examines the switching properties of the models and their features. In the studies, the negligible influence of temperature and parasitic parameters (own and mutual inductances and capacities) on the proper functioning of the matrix matrices and (ULSI) integrated circuits have been confirmed. The main advantages of proposed memristor models (high frequency operation) are associated with the use of windowed functions with increased non-linearity that improve the performance of the memristor model for higher voltages and frequencies and avoid some problems with the lack of convergence. In the analyses performed the negligible influence of temperature, diffusion and parasitic parameters (own and mutual inductances and capacities) of the memristors on the normal functioning of the matrix matrices and integrated circuits has been found.

CHAPTER 5. HAFNIUM DIOXIDE MEMRISTOR MODELS

Chapter 5 applies the methodology proposed in Chapter 2 for realistic modeling of physical phenomena in hafnium dioxide memristors by using modified window functions and adjusting their parameters. Chapter 5 applies the methodology proposed in Chapter 2 for realistic modeling of physical phenomena in hafnium dioxide memristors by using modified window functions and adjusting their parameters. The behavior of the modified memristor models is studied: Lehtonen-Laiho model with modified Biolek window with a complementary sinusoidal component (model *M6*),

Lehtonen-Laiho model with Biolek's modified window-dependent function, voltage-dependent model *M7*), Lehtonen-Laiho model with Joglekar modified window function with additional sinusoidal component (model *M8*).

5.1. A simplified hafnium-dioxide memristor model based on the Lehtonen-Laiho model and Biolek window with additional sinusoidal component (model *M6*)

The equations describing the A6 model are based on the Lehtonen-Laiho memristor model and the modified window function of Biolek with an additional sinusoidal component:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= a \cdot \left[\frac{1 - (x-1)^{2p}}{1+m} + \frac{m \left[\sin^2(\pi x) \right]}{1+m} \right] \cdot v^s, \quad v(t) \leq -v_{thr} \\ \frac{dx}{dt} &= a \cdot \left[\frac{1 - x^{2p}}{1+m} + \frac{m \left[\sin^2(\pi x) \right]}{1+m} \right] \cdot v^s, \quad v(t) > v_{thr} \\ \frac{dx}{dt} &= 0, \quad -v_{thr} < v(t) \leq v_{thr} \\ i &= x^n \beta \sinh(\alpha v) + \chi \left[\exp(\gamma v) - 1 \right] \end{aligned} \quad (5.4)$$

The state-flux and voltage-current characteristics are given in Fig. 5.2 (c), (d) for hard-switching mode. In this case, the voltage-current characteristic is an asymmetric curve.

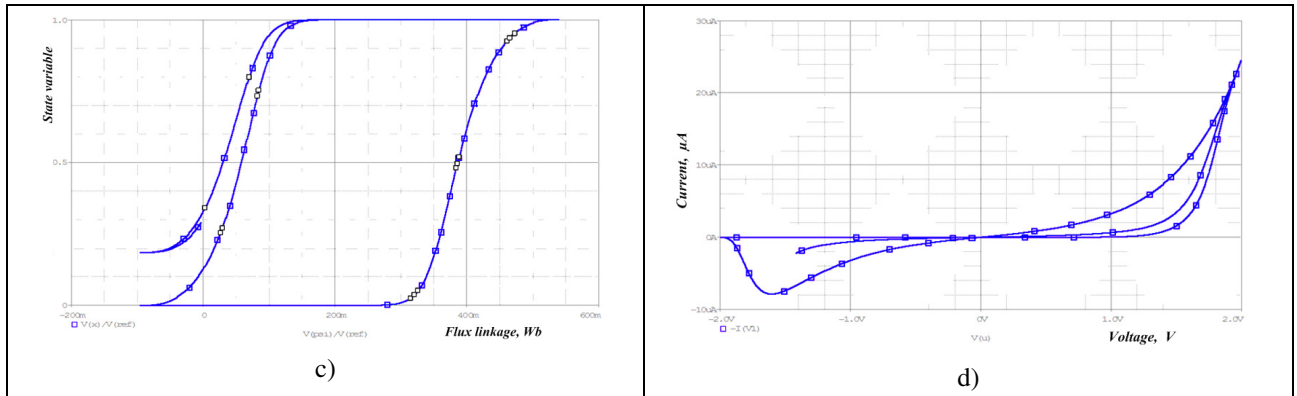


Fig. 5.2 (c) State-flux characteristic; (d) Current-voltage characteristic

5.2. A hafnium dioxide memristor model with a modified Biolek window function with a voltage-dependent exponent (model *M7*)

The equations describing this model are based on Lehtonen-Laiho's model and Biolek's modified window function with a voltage-dependent exponent:

$$\begin{aligned}
 i &= x^n \beta \sinh(\alpha v) + \chi [\exp(\gamma v) - 1] \\
 \frac{dx}{dt} &= a \cdot \left[1 - [x - \text{stp}(-i)]^{2p} \right] \cdot v^s \\
 p &= \text{round} \left(\frac{b}{|v| + c} \right)
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

The state-flux and voltage-current characteristics are given in Fig. 5.5 (a), (b). In this case, the voltage-current characteristic is asymmetrical one, and the state-flux dependence is a hysteresis multi-valued curve.

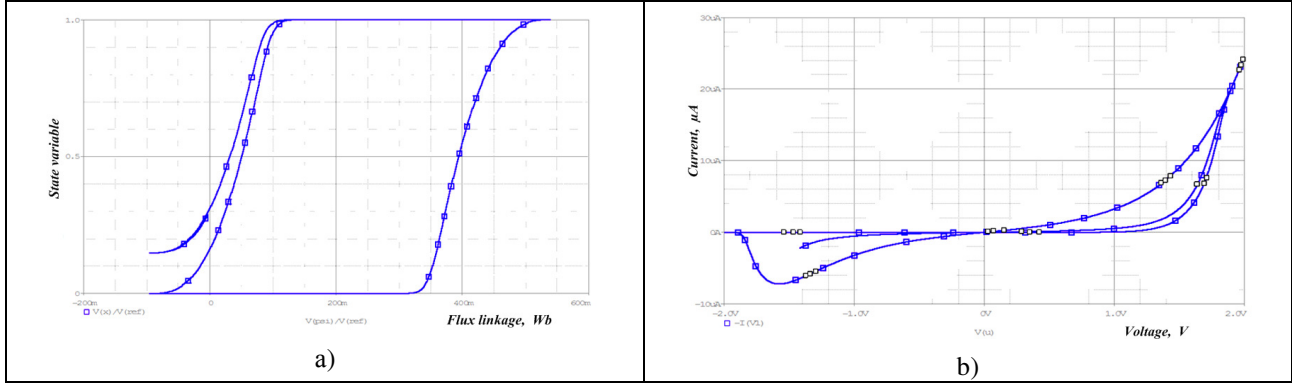


Fig. 5.5 a) State-flux characteristic; b) Current-voltage characteristic

5.3. A hafnium dioxide memristor model with a modified Joglekar window function with sinusoidal component (model M8)

The equations describing the M8 model are based on the Lehtonen-Laiho model and the modified Joglekar window function with an additional sinusoidal component:

$$\begin{aligned}
 i &= x^n \beta \sinh(\alpha v) + \chi [\exp(\gamma v) - 1] \\
 \frac{dx}{dt} &= a \cdot \left[\frac{d \cdot f_J(x) + g \cdot \sin^2(\pi x)}{d + g} \right] \cdot v^s
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

The state-flux and voltage-current characteristics are given in Fig. 5.8 (c), (d) for a hard-switching mode. In this case, the voltage-current characteristic is an asymmetric curve.

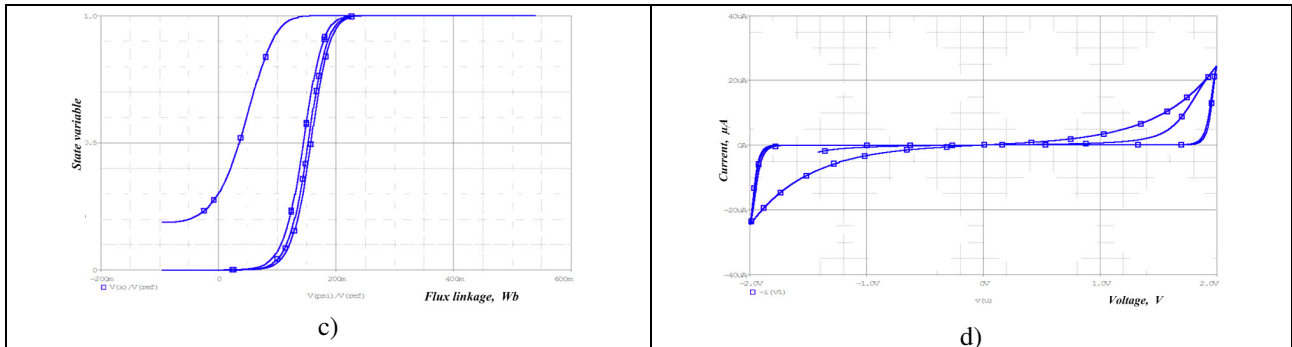


Fig. 5.8 (c) State-flux characteristic; (d) Current-voltage characteristic

The $C6$ and $C7$ models, as well as the proposed $M6$, $M7$ and $M8$ models, have been tested in a sinusoidal mode at different frequencies. Classical $C6$ and $C7$ models have similar results, so only those obtained from the $C6$ model analysis are presented. Similarly, it has been found that the $M6$, $M7$ and $M8$ models gave similar results, so the $M6$ model was studied. Results of the study of the $M6$ and $M7$ models in sinusoidal mode, amplitude 2V and at different frequencies are shown in Fig. 5.10. It could be noted that the model $C6$ operates in a soft-switching mode at a frequency of 1 Hz, while at the frequency of 100 Hz it does not change its state, i.e. does not switch. In contrast, the model $M6$ works in a hard-switching mode and at very high frequencies – Fig. 5.10 (f). This is the main advantage of the proposed $M6$, $M7$ and $M8$ models with respect to $C6$ and $C7$ models.

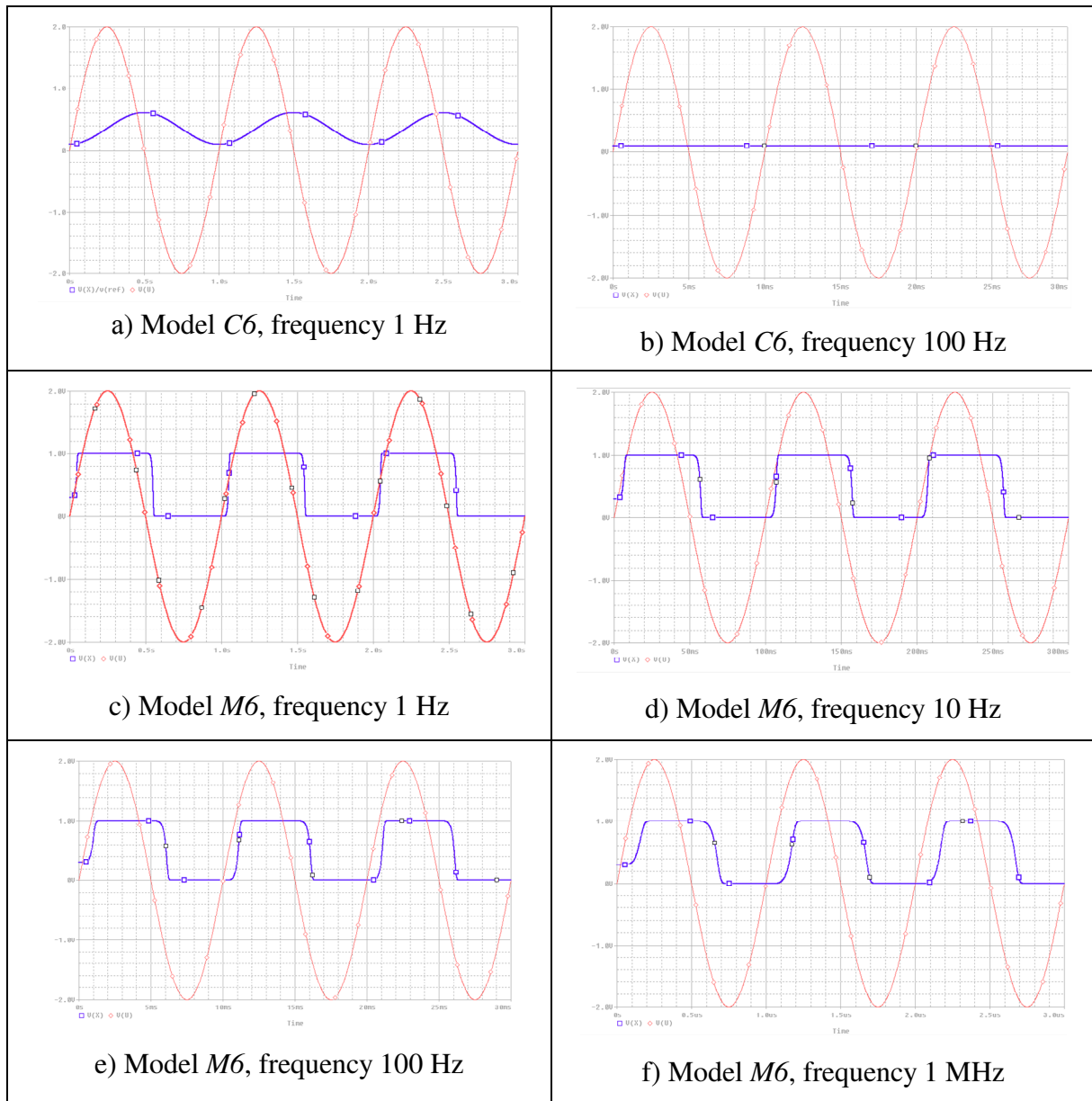


Fig. 5.10. Operating of the models $C6$ and $M6$ for different frequencies – time diagrams of the voltage and the state variable

5.4. Conclusions

This chapter describes three modified and improved memristor models of hafnium-dioxide memristors. They are based on the non-linear Lehtonen-Laiho model in a combination with the modified window functions proposed in the dissertation. The suggested models are tested for a sinusoidal signal, in soft and hard switching modes. Their good accuracy is established after adjustment according to the current-voltage characteristic. Table 5.4 compares the proposed models of hafnium dioxide memristors with different criteria to analyse their behavior and features as defined in section 2.7.

Table 5.4. Comparison of the Modified and Classical Hafnium-Dioxide Memristor Models using their Behavior in Electric Field and Their Specifics

Models	<i>C6</i>	<i>C7</i>	<i>M6</i>	<i>M7</i>	<i>M8</i>
Signal levels	low	middle	random	random	random
Nonlinearity	middle	high	high	high	high
Expressing the boundary effects	no	yes	yes	yes	yes
Switching frequencies	low	low and middle	all frequencies	all frequencies	all frequencies
Modes	soft-switching	soft-switching	soft and hard switching	soft and hard switching	soft and hard switching
Accuracy	low	satisfactory	high	high	high
Activation thresholds	yes	yes	yes	yes	yes
Possibility for tuning the model	partial	partial	yes	yes	yes
Expressing asymmetrical current-voltage relationships	partially	yes	yes	yes	yes
Expressing the dependence between the nonlinear ionic drift and the voltage	no	no	partially	partially	partially
Correct expressing the state-flux relationship	no	partially	yes	yes	yes
Application	analog and digital devices	analog and digital devices, neural networks	analog and digital devices, neural networks, memories	analog and digital devices, neural networks, memories	analog and digital devices, neural networks, memories

CHAPTER 6. DEVELOPMENT OF PSPICE LIBRARIES WITH HAFNIUM DIOXIDE MEMRISTOR MODELS

This chapter describes the creation of PSpice library models of hafnium-dioxide memristors based on their mathematical models. The symbolic and library models of hafnium-dioxide memristors have been generated for their application in electronic circuits and comparison of the results.

6.1. Generating PSpice models of hafnium dioxide memristors

This section describes the libraries of PSpice models of hafnium dioxide memristors developed in connection with the dissertation. The creation of Memristor models libraries is done in PSpice environment. These patterns are generated on the basis of mathematical models that describe the behavior of the memristor in an electric field. Mathematical operations according to the model equations are described in the substitution scheme using the standard blocks and functions of PSpice. The state equation of the memristor is used for starting a substitution scheme. The state variable is involved in the window function, in the right part of the state equation. The current is expressed by the first equation of the system describing the model as a function of voltage and state. After obtaining the time derivative of the state variable, an integrating block with a set initial condition is used – the value of the state variable. By using feedback, the substitution scheme is finalized by replacing the state variable in the first equation of the system describing the memristor model. The flux is obtained from the output of an integrating unit and its input signal is the memristor voltage.

The simulation is performed in the time domain, the time-sampling step is selected according to the requirements for maximal accuracy of the results, i. e. it should be very small according to the selected simulation time of the circuit. For a signal source, a VSIN sine wave source is used. The current flowing through the memristor is obtained by connecting a current source controlled by a signal proportional to the current across the memristor – ABM library element connected in parallel to the voltage source. The terminals of the memristor in the resulting code are replaced with “anode” and “cathode” designations.

The resulting code starts with the .SUBCKT MEMRISTOR A C command, following the description of the substitution scheme, which specifies the connection of the used elements between the nodes of the scheme. The code ends with the .ENDS command. The resulting code is used to create a library model using the PSpice MODEL EDITOR tool. The memristor library element is added to the other libraries in PSpice. The library of developed models is shown in Fig. 6.1. The symbolic designations of the developed memristor models are given in Fig. 6.2.

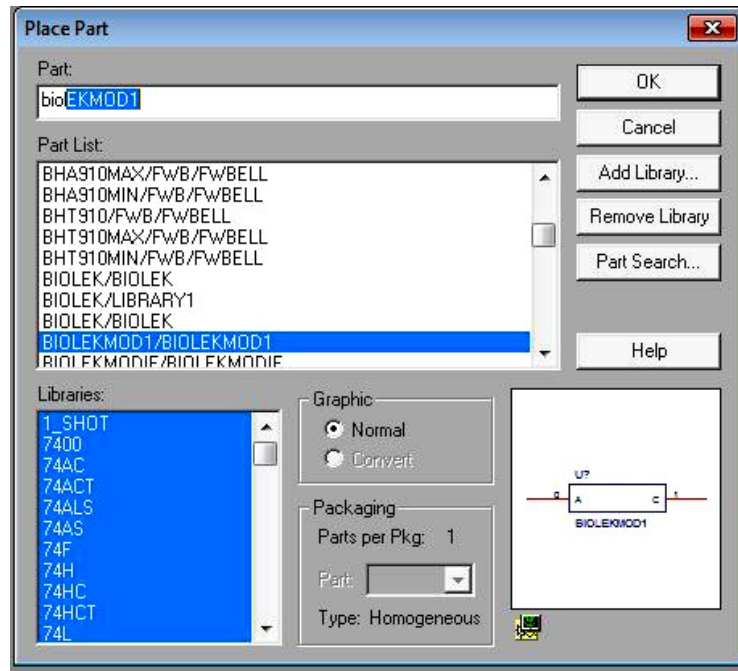


Fig. 6.1. PSpice library of the developed models

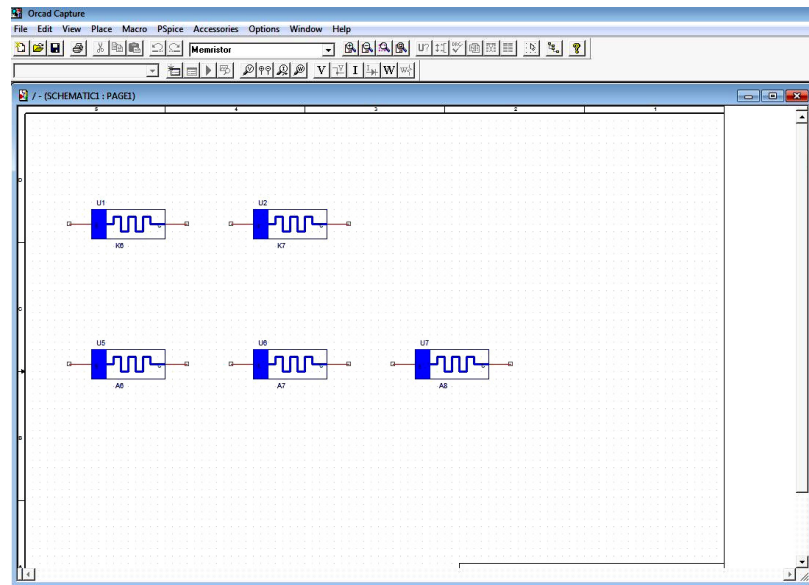


Fig. 6.2. Symbols of the developed classic and modified hafnium-dioxide memristor models

6.2. Generation of PSpice hafnium dioxide memristor models

This section describes the PSpice libraries of hafnium dioxide memristor models developed in connection with the dissertation.

6.3. Classical hafnium dioxide memristor models

In order to compare the results obtained by the use of the modified models, their library PSpice models and classic C6 and C7 models have been developed.

6.4. Conclusions

This chapter describes the development of Pspice library models of hafnium-dioxide memristors based on their mathematical models. The symbolic and library models of hafnium-dioxide memristors have been generated for their application in electronic circuits. The main classical models of hafnium dioxide memristors are: The model without window function (Classic model *C6*), Model with nonlinear window function (Classical model *C7*), and three suggested in the dissertation memristor models: a model based on the Lehtonen-Laiho current-voltage relation in a combination with a modified Biolek window function with an additional sinusoidal component (model *M6*); model based on Lehtonen-Laiho model with Joglekar-Biolek's modified window function with a voltage-dependent exponent (model *M7*); model based on the Lehtonen-Laiho mathematical model with Joglekar's modified window function with an additional sinusoidal component (model *M8*). The generated library models have been tested for sinusoidal and pulse mode. No convergence problems have been observed. The functionality of the developed library memristor models and the possibility for use in electronic circuit and for circuit analysis are established. The main advantages of the modified models with respect to the classical models are established – operation at high frequency, enhanced nonlinearity of the ionic dopant drift, expression of the state-flux characteristics with single-valued curves and using activation threshold of the memristors.

CHAPTER 7. ANALYSIS OF MEMRISTOR CIRCUITS AND DEVICES WITH HAFNIUM DIOXIDE MEMRISTORS

The main objective of this chapter of the dissertation is the analysis of memristor electronic devices by the proposed models of hafnium dioxide memristors and comparison of the obtained results with those of the classical models.

7.1. Analysis of a passive memristor memory crossbar

In Fig. 7.4 a part of a schematic of a passive memristor matrix memory from an ULSI integrated circuit is presented. The operating procedures are very similar to those described for the hybrid memory.

The corresponding time diagrams of the memristor resistance, the state variable and voltage and the corresponding current-voltage characteristics are presented in Fig. 7.5 (a). It is noted that the state variable and the resistance of the memristor change in a very wide range, and the mode corresponding to the memristor state is near to hard switching. In Fig. 7.5 (b) the voltage-current characteristic of the memristors corresponding to the hard switching mode is shown. In the present case, the parasitic sneak current paths do not greatly influence the proper functioning of the memory device. The comparison between a single memristor memory element, a *1T1R* cell and *10T25R* memory scheme is made in accordance to several basic parameters and features. The single cell of the memristor has the largest range of resistance variation.

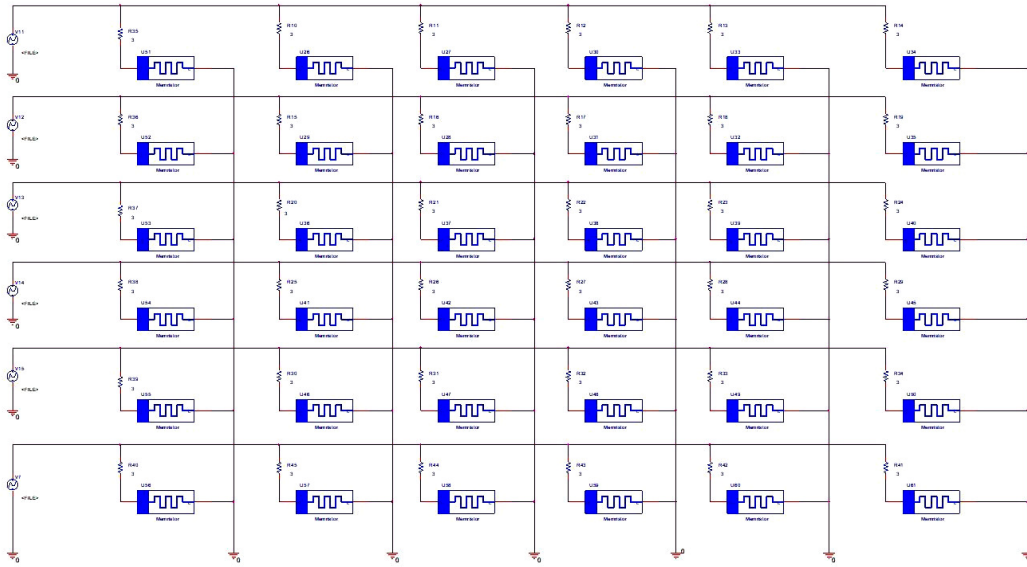


Fig. 7.4. A passive memristor memory circuit 6 x 6

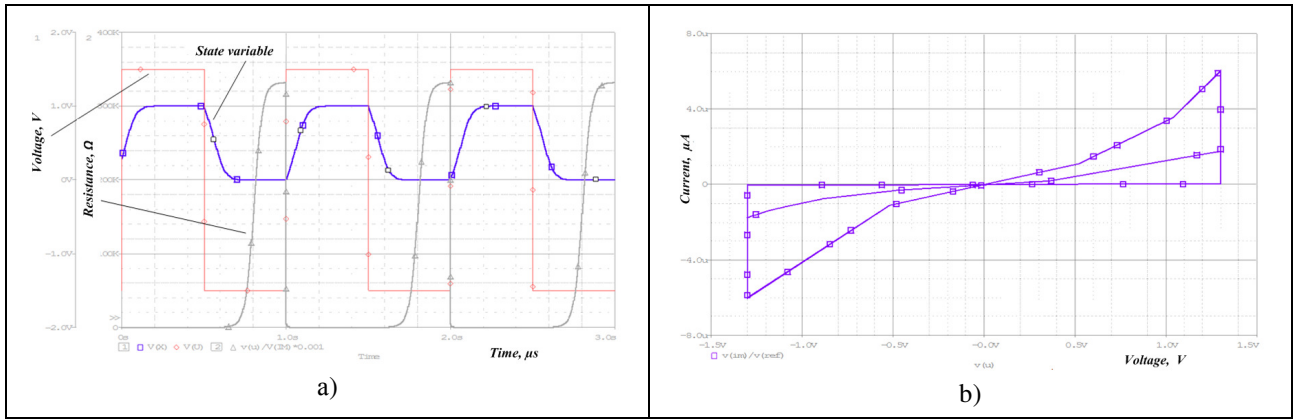


Fig. 7.5 (a) Time diagrams of the memristor voltage, the state variable and the resistance, according to the model of the memristor model with a modified Biolek window function; **(b)** Current-voltage relation of the memristors for the passive matrix during the processes of recording and reading of logical information – model A6

For a memory matrix with multiple memristors produced at the same chemical and physical processes and manufacturing conditions, the stability of the parameters and corresponding reliability are predicted to be higher than those of the single prototype memristor. The analyzes are made by a computer system with Intel Core i5, 2.5 GHz, 8 GB RAM. The corresponding simulation times for the *C6*, *C7*, *M6* and *M7* models are: $t_{K6} = 0.8935$ s, $t_{K7} = 0.9127$ s, $t_{A6} = 1.0564$ s, $t_{A7} = 0.9959$ s. Models with modified window functions require slightly longer simulation times than the *C6* and *C7* models due to the increased number of operations. Considering the present technology development, this increased simulation time does not significantly affect the analysis of the memory circuits. Advantage of the applied modified *M6* and *M7* models is the reduced relative mean square error with respect to the *M6* and *M7* models. Another advantage of the models used, alongside with the modified window functions used, compared to the Pickett model, is the better convergence of the computational procedures. An advantage of applied memristor models is the use of

additional highly non-linear window functions that make realistic representation of high frequency switching processes possible.

7.2. Analysis of a multilayer neural network with memristor synapses

The main purpose here is to study the processes of learning a multilayered memristor neural network using the *M5* modified model. The neural network shown in Fig. 7.6, contains 5 neurons in the hidden layer and one nonlinear neuron in the output layer. Its principle of training is based on the right transmission of the signal and back propagation of the error. It has been tested with the *M6* model and with the most used classical hafnium-dioxide models and has been compared to the results, and the advantages of the applied *M6* model have been evaluated.

The considered multilayer neural network is used for functional adapting of the input signal x according to the desired signal d . The input signal applied to the neural network in the time domain is: $x = 0.055 (1 - \exp(t + 0.4)) + 0.03 \exp(-5t) \sin(2\pi 20 t)$, V, which is sampled by a digital signal with a frequency of 50 Hz. The corresponding desired signal which has to be derived in the network output is: $d = 0.025 [1 - \exp(1.5 t)] - 0.17$ V. This signal is sampled by the same frequency as the input signal.

The synapses in the neural network are based on memristors and are implemented on a bridge circuit – Fig. 7.6. This type of synapses can store both positive and negative weights as well as zero values thanks to the bridge topology. The weight of the synapse depends on the resistance of the memristor M in the following way:

$$w = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{M}{M + R_2}. \quad (7.1)$$

The resistance of the memristor is:

$$M = \frac{v}{x^n \beta \sinh(\alpha v) + \chi [\exp(\gamma v)]}. \quad (7.2)$$

The change of the resistance of the memristor element is:

$$\Delta M_3 = M_{3new} - M_{3old} = \frac{R_1 \left(\Delta w + \frac{M_{3old}}{R_1 + M_{3old}} \right)}{1 - \left(\Delta w + \frac{M_{3old}}{R_1 + M_{3old}} \right)} - M_{3old}. \quad (7.3)$$

The corresponding change of the state variable is:

$$\Delta x = x_{new} - x_{old} = a \cdot \Delta T \cdot f(x_{old}) \cdot v^s. \quad (7.4)$$

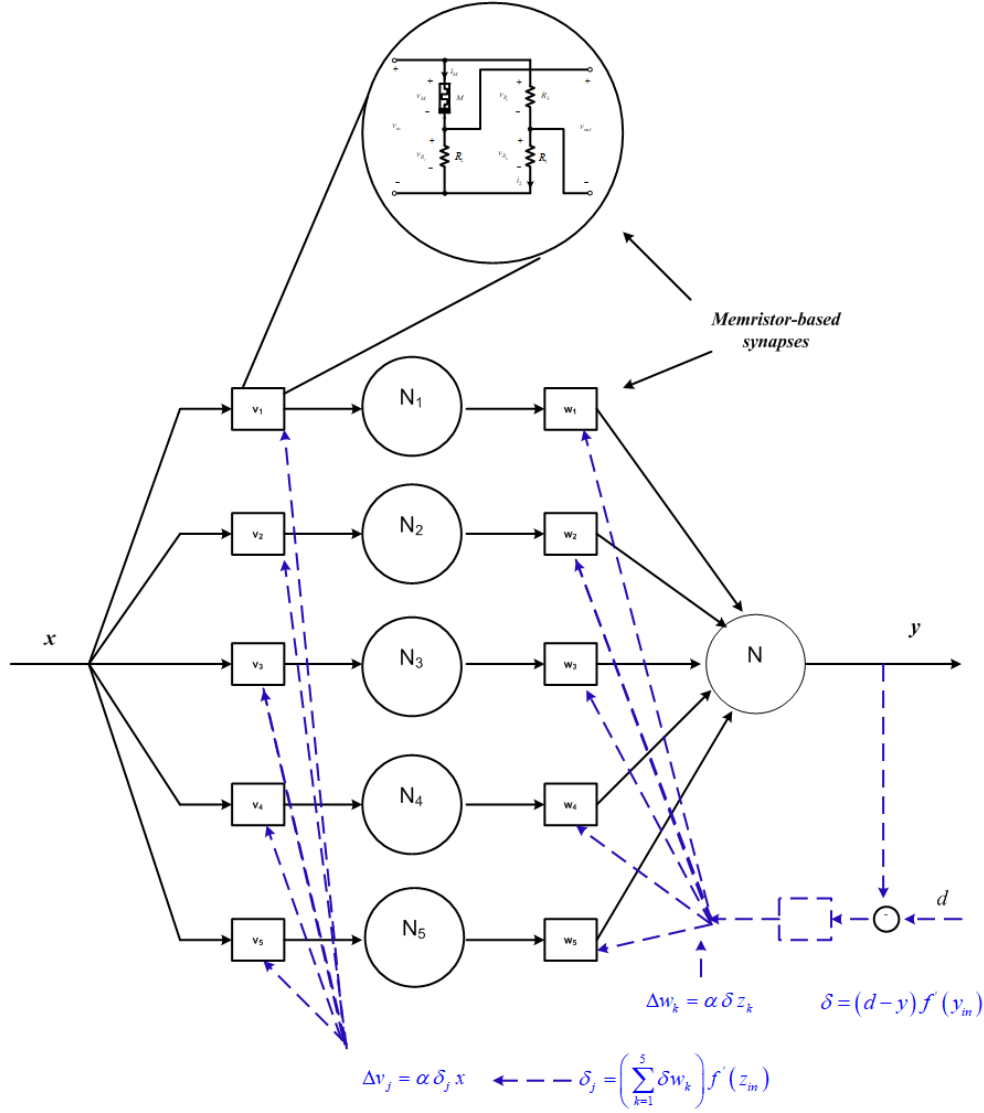


Fig. 7.6. A multilayer feed-forward and error back propagation neural network with memristor-based synapses

For changing the synaptic weight a rectangular pulse with a level of 1 V is used. Its duration is:

$$T_{pulse} = \int_{x_{old}}^{x_{new}} \frac{x_{new} - x_{old}}{a \cdot f(x)} dx. \quad (7.5)$$

Fig. 7.7 shows the time diagrams of the neural network input signal, the desired signal and the output signal obtained during the training and networking process. A detailed time diagram of the output signal and the corresponding values of the desired output signal are given in Fig. 7.7 (c). The network training process has a duration of about 0.7 s.

Finally, it should be noted that the investigated memristor-based neural network has been successfully tested with the *M6* memristor model and with the classical models of hafnium-dioxide memristors, and their behavior and the derived results are identical. However, the proposed modified memristor models work at high frequen-

cies, allowing them to be used at faster signals. This confirms the functionality of the *M6* model and its ability to be applied for analyzing complex electronic circuits.

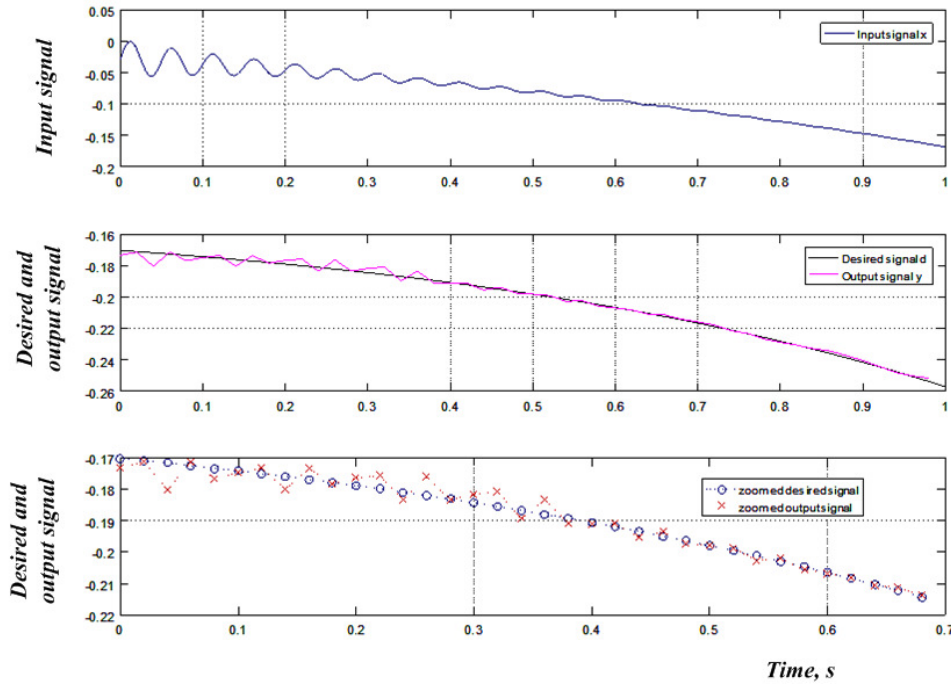


Fig. 7.7 (a) Time diagram of the input signal;
 (b) Time diagrams of the desired signal and the output signal;
 (c) A detailed time diagram of the sampled desired and output signals

7.3. Conclusions

This chapter of the dissertation examines memristor-based electronic devices using the proposed models of hafnium-dioxide memristors and two of the most used classical models and compares the derived results. Two classical hafnium-dioxide models have been used: a non-windowed hafnium dioxide memristor model with linear ionic dopant drift (*C6*) and a model of hafnium-dioxide memristor with nonlinear window function (*C7*) and 3 modified memristor models: a hafnium dioxide model of a memristor with an additional sinewave component of the modified Biolek window function (model *M6*), a model of a hafnium dioxide memristor with a modified nonlinear memristor model of Lehtonen-Laiho with a modified Biolek window function with a voltage-dependent exponent (model *M7*) and a model of hafnium-dioxide memristor with a modified nonlinear memristor model of Lehtonen-Laiho with Joglekar window function with a voltage-dependent exponent (model *M8*). Passive and hybrid memristor memories, implemented in integrated circuits with ultra-large scale integration, as well as a multi-layer neural network for noise filtering of signals have been studied. The derived results confirm the functionality of the modified memristor models and their suitability for the investigation of complex electronic circuits and devices, as well as their improved characteristics and behavior in electric field and their main advantages – the larger range of variation of the state variable in relation to that of the classic memristor models and the ability to operate at very high frequencies.

CHAPTER 8. A COMPARISON OF THE MEMRISTOR MODELS

In this chapter, a comparison of the main memristor models (based on titanium dioxide and hafnium dioxide materials) is made on their basic characteristics and behavior in electric field. The main criteria applied for model' comparison are defined in Chapter 2. The ability of the modified models to operate at high frequencies and high signal levels has been established. As a result of the comparisons, the more realistic behavior of the modified models with respect to the classical models is confirmed, their improved characteristics are established, and mainly the current-voltage characteristic is closer to the experimental compared to the classic models. It is shown that the state-flow characteristic, which in proposed models is expressed by a single-valued nonlinear curve in soft switching mode, unlike the classical models, which express the same characteristic by multi-valued curves.

8.1. A comparison of the memristor models using basic criteria

The analyzed classical memristor models and the modified models are mainly compared according to the complexity of the mathematical operations, the nonlinearity of the ionic dopant drift, the ability for representation the boundary effects and the switching properties in soft switching and hard switching modes as well as the precision of expressing the current-voltage characteristics with respect to the experimental characteristics derived under the same conditions.

8.2. Titanium dioxide memristor models – TiO_2 .

Basic existing in the literature classical memristor models

The main classical models of titanium dioxide memristors that are subject of a comparison are the windowless model, Strukov and Williams model (*C1*), Joglekar model (*C2*), Biolek model (*C3*), Ascoli-Corinto model (*C4*) and the Lehtonen-Laiho model with a Biolek Window function (*C5*).

8.2.1. A titanium dioxide memristor model with a Biolek window function

$(f_B) - TiO_2$ (*C3*)

- ✓ Complexity – middle
- ✓ Applied signals level – lower than 1 V
- ✓ Signal frequency – low and middle, lower than 100 Hz
- ✓ Ionic dopant drift linearity – low
- ✓ Boundary conditions representation – yes
- ✓ A possibility for representation the switching effects – only for low frequencies
- ✓ Modes – soft and hard switching
- ✓ Accuracy – middle
- ✓ Convergence problems – only for low frequencies and high level signals
- ✓ Application of activation thresholds – no
- ✓ A possibility for tuning the model – yes

- ✓ A possibility for expression of assymetrical current-voltage characteristics – yes
- ✓ A possibility for expression the dependence between the nonlinear ionic dopant drift and the voltage – no
- ✓ Correct representation of the state-flux relationship – only for low-level signals and middle and high frequencies
- ✓ Complexity of the model tuning – low

Advantages:

1. Successful expression the boundary effects for soft-switching and hard-switching modes;
2. Successful expression of the nonlinear ionic dopant drift according to the state variable
3. A comparatively low complexity of the describing equations
4. Satisfactory accuracy for low and middle level voltage signals

Applications:

Memristor memories, neural networks, digital devices. Soft switching and hard switching modes, high-level signals with low frequencies, when the representation of the boundary effects is very important.

Disadvantages:

1. Middle nonlinearity of the ionic dopant drift;
2. Lack of activation thresholds;
3. Splitting the Weber-Coulomb characteristic in soft switching mode and obtaining multi-valued characteristic, while under similar conditions this characteristic is single-valued and linear in the Joglekar and Williams memristor models.

8.3. Modified titanium dioxide memristor models

In this section five modified titanium dioxide memristor models are considered.

8.3.1. A modified Joglekar memristor model with a voltage-dependent integer exponent and activation threshold (f_{JM}) – TiO_2 (model *M1*)

- ✓ Complexity – middle
- ✓ Applied signals levels – low, middle and high
- ✓ Signal frequencies – low, middle and high
- ✓ Ionic dopant drift linearity – middle
- ✓ Representation the boundary effects – yes
- ✓ A possibility for representation the switching effects – only for low frequencies
- ✓ Modes – soft and hard switching
- ✓ Accuracy – middle
- ✓ Convergence problems – no
- ✓ Application of activation thresholds – yes

- ✓ Possibility for tuning the model – yes
- ✓ Possibility for expression asymmetric current-voltage relationships – yes
- ✓ Possibility for representation the dependence between the nonlinear ionic dopant drift and the voltage
- ✓ Correct representation the state-flux characteristic – only for low-level signals, for middle and high frequencies
- ✓ Complexity of tuning the model – middle

Advantages:

1. Accurate expression current-voltage and state-flux characteristics for low-level voltages ($\leq 1\text{ V}$), according to Joglekar model. This is associated with the used voltage-dependent exponent in the modified Joglekar window function.
2. Realistic representation the boundary effects for hard-switching mode.
3. Satisfactory expression the nonlinear ionic dopant drift.
4. Better convergency and lower complexity than these of Pickett.

Applications:

It is mainly used when the representation of non-linearity of ionic dopant drift in relation to the state variable is very important (memories, neural networks, tunable filters, generators).

Disadvantages: The linear dependence between the time derivative of the state variable and the current, and weak non-linear dependence between voltage and current, so the model can not realistically represent the behavior of the memristor for high level signals ($\geq 1\text{ V}$) and the corresponding switching effect.

8.3.3. A modified Biolek model of a titanium dioxide memristor with an additional sinusoidal component and window function f_{BMa} (model M2)

- ✓ Complexity – middle
- ✓ Signals levels – low, middle and high
- ✓ Signal frequencies – low and middle
- ✓ Ionic dopant drift linearity – low
- ✓ Representation of boundary effects – yes
- ✓ Possibility for representation the switching effects – only for low frequencies
- ✓ Modes – soft and hard switching
- ✓ Accuracy – high
- ✓ Convergence problems – only for low frequencies and high level signals
- ✓ Application of activation thresholds – yes
- ✓ Possibility for tuning the model – yes
- ✓ Possibility for expressing asymmetrical current-voltage relationships – yes

- ✓ Expression the dependence between the nonlinear ionic dopant drift and the voltage – no
- ✓ Correct representation the state-flux characteristic – only for low-level and middle- and high-frequency signals
- ✓ Tuning complexity – middle

Advantages:

1. Expresses more accurately the current-voltage and state-flux dependencies for low voltage signals ($\leq 1\text{V}$) with respect to the original Biolek model. This advantage is related to the increased non-linearity of the modified window function, due to the additional sinusoidal component.
2. Application of activation threshold.
3. Better convergency and lower complexity according to Pickett model.
4. The state-flux dependencies of Biolek's modified model for soft-switching mode are almost single-valued curves, which is an advantage with respect to Biolek's original model, which presents under the same condition the state-flow characteristics by multi-valued curves.

Application: When the representation of the nonlinear ionic dopant drift according to the state variable is very important (memristor memories, neural networks).

Disadvantages:

1. Due to the low nonlinear current-voltage dependence, the model can not realistically represent the behavior of the memristor for high-level signals ($\geq 1\text{V}$).
2. Lower accuracy than the modified Biolek model with voltage-dependent variable exponent.

8.4. Hafnium-dioxide memristor models – classical models

The hafnium-dioxide memristor models are described by a system of two equations. The first equation expresses the dependence between current and voltage, including the state variable (or resistance) of the memristor. The second equation gives the dependence between the time derivative of the state variable (the memristor resistance) and the current. The best memristor models use window functions.

8.5. Proposed hafnium dioxide memristor models (HfO_2)

In this section, three modified models of hafnium-dioxide memristors are considered: a non-linear model with Biolek modified window function with additional sinusoidal component (*M6*), a non-linear model of hafnium dioxide memristor with Biolek modified window function with a voltage-dependent exponent (*M7*), and a non-linear hafnium dioxide memristor model with Joglekar modified window function with additional sinusoidal component (*M8*).

8.6. Conclusions

In this chapter of the dissertation a comparison of the main classical and the modified in the work memristor models (based on titanium dioxide and hafnium dioxide materials) is made using their basic characteristics and behavior in electric field. The main criteria for model' comparison are their representation of the non-linearity of ionic dopant drift depending on the state variable (which is used mainly by the applied window functions) and the applied voltage and frequency range in which they operate, the complexity of the describing equations and the corresponding elementary computational operations, the ability to switch the resistance at medium and high voltage levels, the ability of tuning the models (mainly using the minimized square error between the experimental current-voltage characteristic and the obtained by simulation with the proposed models characteristics). The additional criteria described in Chapter 2 are also used. The main advantages of the developed models with respect to the classical memristor models, are the operation with high frequency signals and their suitability for investigation and realistic representation of memristor circuits and devices behaviour in electric fields.

CONTRIBUTIONS IN THE DISSERTATION WORK

SCIENTIFIC CONTRIBUTIONS

1. A new sophisticated methodology for a realistic modeling of the physical phenomena in titanium dioxide and hafnium dioxide memristors has been developed through the use of modified window functions and adjustment of their parameters. Several basic functions are proposed: a modified Joglekar window function with a voltage-dependent hyperbolic like decreasing integer exponent; a modified Biolek window function with an additional sine wave component for representation the high nonlinearity of ionic drift of the oxygen vacancies in the memristor; a modified Biolek window function with a voltage-dependent integer exponent; a modified Joglekar-Biolek window function with a voltage-dependent variable integer exponent. By varying the window function' parameters, a minimization of the mean square error between the experimental and the simulated with the modified memristor models voltage-current characteristics at the same input voltage has been achieved. The average square error in the models developed by the author is lower than the respective error in the classical memristor models.
2. Based on the developed advanced methodology for modeling titanium dioxide and hafnium dioxide memristors, 8 modified models – five models for titanium dioxide memristors ($M1$, $M2$, $M3$, $M4$, $M5$) and three models for hafnium-dioxide memristors $M6$, $M7$, $M8$) are proposed. The titanium dioxide models are based on Williams ($M1$, $M2$, $M3$ and $M4$) and Lehtonen-Laiho ($M5$) models with modified window functions. Modified hafnium-dioxide memristor models ($M6$, $M7$ and $M8$) are based on the Lehtonen-Laiho model in combination with the described window functions and Joglekar's modified window function with an additional sinusoidal component. The advanced memristor models have a high non-linearity of ionic dopant drift, and represent more realistically the physical processes in the memristors with respect to classical models.

SCIENTIFIC-APPLIED CONTRIBUTIONS

3. The models developed in the dissertation have been applied in the study of memristor analog and digital schemes, circuits and devices. Simple memristor circuits (series and anti-series with memristors, anti-parallel circuit, Wien-bridge generator with memristors, integrating devices, perceptron with memristor synapses) and complex circuits (memristor memories and neural networks) are analyzed. The main advantages of the modified memristor models (a more realistic representation of the state-flux and voltage-current characteristics, a lower average mean square error between the simulated and the experimental voltage-current characteristics, express-

ing the difference in the behavior of the memristors for voltages lower or higher than the activation threshold – $M1$, $M2$, $M4$ and $M5$ with respect to the classic memristor models $C1$, $C2$, $C3$ and $C5$ and $M6$, $M7$ and $M8$ on $C6$ and $C7$, operating with high-frequency signals are established. The titanium dioxide and hafnium dioxide memristor models proposed in the dissertation are compared to the best existing models of such memristors and their advantages and disadvantages have been assessed and it has been suggested in which cases it is more appropriate to apply them. Modified models based on Williams ($M1$, $M2$, $M3$ and $M4$) models in combination with modified window functions are used to study analog and digital devices at low and medium signals levels and frequencies. The developed models of titanium-dioxide memristors ($M5$, $M6$, $M7$) and hafnium dioxide ($M8$) memristors are based on the Lehtonen-Leich model in combination with modified window functions and are very appropriate for analysis of memristor devices for random levels at low, medium and high frequencies.

4. The models of titanium dioxide and hafnium-dioxide memristors proposed in the dissertation are compared to the best existing classical models of such memristors, their advantages and disadvantages being assessed and suggested in which cases they are appropriate for application. The modified memristor models based on the Williams model ($M1$, $M2$, $M3$ and $M4$) in combinations with the proposed modified window functions are used to investigate analogue and digital devices at low and medium levels and frequencies of the applied signals. The modified models of titanium dioxide memristors ($M5$), and hafnium-dioxide memristors ($M6$, $M7$, $M8$) developed in the dissertation are based on Lehtonen-Laiho memristor model in combination with the proposed modified window functions and they are most suitable for analysis of memristor circuits and devices at random levels of signals at low, medium and high frequencies.
5. The effects related to the influence of temperature in the operating interval $[-15, 75] ^\circ\text{C}$ and the corresponding diffusion of oxygen vacancies on the physical processes in titanium dioxide memristors (change of the memristor resistance, change of the concentration of oxygen vacancies in the volume of the memristor) are analysed. The influence of the parasitic parameters (own and mutual inductances and capacitances) between the titanium dioxide memristors in the memristor matrices realized in ULSI integrated circuits in the frequency range $[1\text{Hz} - 3\text{GHz}]$ is investigated on the normal functioning of the memristors. After the studies, it is found that in the considered temperature range, R_{ON} is little enough and R_{OFF} is large enough, so the influence of the temperature could not be taken into account in the modeling of the memristors. The studies on the intrinsic and mutual inductances and capacitances of the memristors show their much smaller values than those of the classical integrated circuits based on CMOS technology (33 nm), therefore the described parasitic parameters are not taken

into account in the modeling of titanium dioxide memristors in the considered conditions.

APPLIED CONTRIBUTIONS

6. PSpice library models of titanium-dioxide and hafnium-dioxide memristor models proposed in the dissertation have been developed. They have been tested in PSpice environments for soft and hard switching modes. Their performance in sinusoidal and pulse mode has been confirmed. The developed library models have been used in the study of memristor analog and digital devices, whereby their main advantages have been established with respect to the classical memristor models – obtaining a state-flux single-valued characteristic in soft switch mode, representing the border effects with respect to classical models, as well as representing the difference in the behavior of the memristors at a voltages higher and lower than the activation threshold, operating at high signal levels and high frequencies – *M1*, *M2*, *M4* and *M5* with respect to the classic memristor models *C1*, *C2*, *C3* and *C5* as well as *M6*, *M7* and *M8* with respect to *C6* and *C7*.

LIST OF DISSERTATION PUBLICATIONS

Papers in Impact-Factor Journals

1. V. Mladenov, Analysis of Memory Matrices with HfO₂ Memristors in a PSpice Environment, *Electronics* 2019, 8(4), 383; doi:10.3390/electronics8040383, <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/4/383>.
2. Mladenov, V., S. Kirilov, A Nonlinear Drift Memristor Model with a Modified Biolek Window Function and Activation Threshold. *Electronics* 2017, 6(4), 77; doi: 10.3390/electronics6040077, pp. 1 – 15, <https://www.mdpi.com/2079-9292/6/4/77>.
3. V. Mladenov, Analysis and Simulations of Hybrid Memory Scheme Based on Memristors, *Electronics* 2018, 7, 289; doi:10.3390/electronics7110289, <https://www.mdpi.com/2079-9292/7/11/289>.

Papers in Scientific Journals

1. Valeri Mladenov, Stoyan Kirilov, “Synthesis and Analysis of a Memristor-Based Perceptron Element for Logical Function Emulation”, *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, ISSN 0033-2097, R. 92 NR 4/2016, pp. 22-25, doi:10.15199/48.2016.04.06.
2. Stoyan Kirilov, Valeri Mladenov, Analysis of a Passive Memristor Crossbar, *Oriental Journal of Computer Science and Technology*, Vol. 11, No. (1) 2018, Pg. 04-11, ISSN: 0974-6471.
3. Mladenov, V.; Kirilov, S., Analysis of an anti-parallel memristor circuit, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska (IAPGOŚ)* 2018, 8(2), pp. 9–14, DOI: 10.5604/01.3001.0012.0696, <https://e-iapgos.pl/resources/html/article/details?id=173605>.
4. Mladenov, V.; Kirilov, S., Advanced Memristor Model with a Modified Biolek Window and a Voltage-Dependent Variable Exponent, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska (IAPGOŚ)* 2018, 8(2), pp. 15–20, DOI: 10.5604/01.3001.0012.0697, <https://e-iapgos.pl/resources/html/article/details?id=173606>.

Papers published in international conference proceedings

1. Mladenov, V., St. Kirilov, Analysis of temperature influence on titanium-dioxide memristor characteristics at pulse mode, *International Symposium on Theoretical Electrical Engineering (ISTET)*, 24-26 June, 2013, Pilsen, Czech Republic.
2. Mladenov, V., St. Kirilov, Investigation of memristors' own parasitic parameters and mutual inductances between neighbouring elements of a memristor matrix and their influence on the characteristics, *International Symposium on Theoretical Electrical Engineering (ISTET)*, 24-26 June, 2013, Pilsen, Czech Republic.
3. Valeri Mladenov, Stoyan Kirilov, A Nonlinear Memristor Model with Activation Thresholds and Variable Window Functions, *Proceeding of 15th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA)*, 23-25 August 2016, Dresden, Germany, ISBN 978-3-8007-4252-3.

4. V. Mladenov, S Kirilov, A Memristor Model with a Modified Window Function and Activation Thresholds, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2018, 1-5, DOI: 10.1109/ISCAS.2018.8351429, 2018.
5. S. Kirilov, V Mladenov, Integrator device with a memristor element, *Proceedings of 7th International IEEE Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)* 2018, DOI: 10.1109/MOCASST.2018.8376656, 2018.
6. V. Mladenov, Synthesis and Analysis of a Memristor-Based Artificial Neuron, *Proceedings of 16th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA)* 2018, August 28-30, 2018, Budapest, Hungary, ISBN: 978-3-8007-4766-5.
7. Kirilov, S. Mladenov, V., Learning of an Artificial Neuron with Resistor-Memristor Synapses, *Proceedings of the workshop on Advances in Neural Networks and Applications 2018 (ANNA'18)*, VDE VERLAG GMBH, Berlin, Offenbach; pp. 13-17, ISBN 978-3-8007-4756-6.
8. V. Mladenov, St. Kirilov, „Analysis of a serial circuit with two memristors and voltage source at sine and impulse regime”, *Proceeding of 13th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA), 3rd Memristor and Memristive Symposium*, 29-31 August 2012, Turin, Italy, pp. 1-6.
9. Mladenov, V., St. Kirilov, Syntheses of a PSpice Model of a Titanium-dioxide Memristor and Wien Memristor generator, *European Conference on Circuit Theory of Design (ECCTD)* 2013, Germany, 08-12 September, DOI: 10.1109/ECCTD.2013.6662302, pp. 1-4.
10. Mladenov, V., A New Simplified Model for HfO₂-based Memristor. *Proceedings of 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)* 2019, 978-1-7281-1184-1/19/, 2019.
11. Mladenov, V., S. Kirilov, A Comparison of Titanium Dioxide Memristor PSpice Library models, *Accepted for presentation in the International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems (MEMRISYS) 2019*, Dresden, Germany, 8-11 July, 2019, <https://www.iee.et.tu-dresden.de/mem2019/>.
12. Kirilov, S., V. Mladenov, PSpice Library Models for HfO₂ memristors, *Accepted for presentation in the International Symposium on Theoretical Electrical Engineering (ISTET)* 2019, Sofia, Bulgaria, 21-24 July, 2019, <https://www.istet2019.eu/>.
13. Mladenov, V., St. Kirilov, Analysis of the mutual inductive and capacitive connections and tolerances of memristor's parameters of a memristor memory matrix, *European Conference on Circuit Theory of Design (ECCTD)* 2013, Germany, 08-12 September, DOI: 10.1109/ECCTD.2013.6662269, pp. 1-4.
14. Valeri M. Mladenov, Stoyan M. Kirilov, “Memristor modeling in Matlab® & Pspice®”, *Proc. of 29th European Conference on Modelling and Simulations (ECMS)*, 26.05.2015-29.05.2015, Albena (Varna), Bulgaria, ISBN: 978-0-9932440-0-1, pp. 432-437.

ADVANCED MEMRISTOR MODELING

Prof. Dr.-Eng. Valeri Mladenov

SUMMARY

In the thesis a review has been made on the main publications related to memristors and memristor modeling, memristor circuits and devices. Subject of research are basically titanium dioxide and hafnium-dioxide memristors. The basic classic memristor models – Strukov and Williams, Joglekar, Biolek, Corinto-Ascoli and Lehtonen-Laiho are considered. The main problems and deficiencies in classic models are independent non-linearity of the used window function of voltage and their low non-linearity. In connection with the purpose of the thesis – compensating these issues and improving the memristor models, two basic modifications of window functions are offered: a hyperbolic decreasing dependency between the exponent in the window functions and voltage, and introducing additional sinusoidal component to strengthen the non-linearity of the models. A sophisticated methodology for modeling memristors has been developed using modified window functions with adjustable parameters. The setting of the authors' models is based on comparing experimental and simulated voltage-current characteristics and minimizing the mean square error between them. PSpice simulations have been performed on the customized models in soft and hard switching modes and their functionality has been confirmed. Based on the mathematical models of the memristors, their PSpice library models have been developed, which are analyzed in soft and hard switching modes and their operational capability are confirmed. The main advantages of the modified models with respect to the classic models are established – possibility for operation with high-frequency signals, for tuning, wider range of variation of the state variable in relation to the classical models, expression of the state-flux characteristic by a single curve in soft switching mode. The developed PSpice library models are used to analyze memristor circuits and devices. Their ability to operate in electronic schemes is confirmed. The influence of temperature and parasitic parameters of the memristors (their own and mutual capacities and inductances) are investigated and their negligible effect on the normal functioning of the memristor matrices and integrated circuits are established. Due to the negligible influence of these additional factors, they are not taken into account in memristor modeling. Simple and complex memristor circuits are analyzed with the classical and modified models and the results are compared, paying attention to the advantages of the modified models. During the simulations, no problems related to the convergence of the computational processes are noticed. The main contributions in the thesis are the development and implementation of an advanced methodology for memristor modeling using modified window functions and adjustment of their parameters, establishing the negligible influence of the temperature and the parasitic inductances and capacitances of memristor matrices on their normal operation, development of PSpice library models, their usage for memristor circuits analysis, comparing the results obtained by applying the modified and classical models and identifying their advantages.