

## Силовая электроника

УДК 004.94

В.Г. Артюхов, канд. техн. наук, І.В. Коноваленко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

### Схемотехнічне моделювання мемристора в середовищі MicroCap

Головна мета публікації – привернути увагу студентів, аспірантів та молодих спеціалістів до функціонально нового елемента електронних схем – мемристора, який має здатність до запам'ятовування опору. Поява в пакеті MicroCap 10 моделі мемристора дає можливість побудови та дослідження мемристорних схем: запам'ятовуючих схем, нейронних мереж і т.п. В роботі приведений детальний опис моделі мемристора та проведено моделювання простих мемристорних схем з джерелами струму та напруги. Отримані результати демонструють методику отримання характеристик мемристора та показують його властивості. Дана методика може бути використана при моделюванні більш складних мемристорних схем. Бібл. 5, Рис. 6.

**Ключові слова:** мемристор; MicroCap; моделювання; мемристивність; залежність опору від заряду та магнітного потоку.

#### Вступ

Як відомо, мемристор є четвертим пасивним елементом електричних схем, який безпосередньо пов'язує між собою магнітний потік та заряд (рис.1). Теоретичне обґрунтування мемристора пов'язане з роботою Чу, опублікованою у 1971 році [1], а його практична реалізація з'явилась у 2008 році, коли співробітники Hewlett-Packard продемонстрували експериментальну модель мемристора [2].

Електричний ланцюг може описуватися чотирма фізичними величинами: у кожній точці (перетині) - силою струму (I) і зарядом (Q), між двома точками (поверхнями) - напругою або різницею потенціалів (U) і магнітним потоком (Φ). Всі ці чотири величини попарно співвідносяться одна з одною, причому ці співвідношення представлені в фізичних елементах електросхеми. Так, резистор (опір) реалізує взаємозв'язок сили струму і напруги, конденсатор (ємність) - напруги і заряду, котушка індуктивності - магнітного потоку і сили струму. Ці три пасивних елемента - резистор, конденсатор і котушка індуктивності - вважаються базовими в електротехніці, оскільки

електричну схему будь-якої складності теоретично можна звести до еквівалентної схеми, побудованої виключно з опорів, ємностей і індуктивностей.

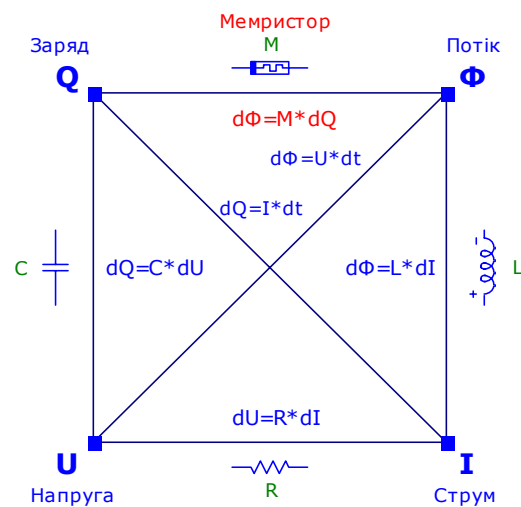


Рис. 1. Схема зв'язку електричних величин

У 1971 році американський фізик Леон О. Чу з Каліфорнійського університету в Берклі висунув гіпотезу, згідно з якою повинен існувати четвертий базовий елемент електросхеми, який описував би взаємозв'язок магнітного потоку з зарядом. Чу назвав "бракуючий" елемент мемристором - від слів "резистор" і "memory", тобто "пам'ять". Ця назва описує одну з характеристик мемристора, так званий гістерезис, "ефект пам'яті", що означає, що властивості цього елемента залежать від прикладеної раніше сили. У даному випадку опір мемристора залежить від пропущеного через нього заряду, що і дозволяє використовувати його, як елемент пам'яті. Цю властивість було названо мемристивністю (M), значення якої є відношенням зміни магнітного потоку до зміни заряду. Величина M залежить від кількості заряду, що пройшов через елемент, тобто від того, як довго через нього протікав електричний струм.

Принципова відмінність мемристора від більшості типів сучасної напівпровідникової па-

м'яті і його головна перевага перед ними полягають в тому, що він не зберігає свої властивості у вигляді заряду. Це означає, що йому не страшні витоки заряду, з якими доводиться боротися при переході на мікросхеми нанометрових масштабів, і що він повністю енергонезалежний. Простіше кажучи, дані можуть зберігатися в мемристорі до тих пір, поки існують матеріали, з яких він виготовлений. Для порівняння: флеш-пам'ять починає втрачати записану інформацію вже після року зберігання без доступу до електричного струму. Таким чином, на відміну від інших пасивних компонентів мемристор володіє пам'яттю, що відкриває широкі перспективи його використання в електроніці.

Разом з розробкою мемристора розроблена його модель [2], [4], що дає можливість моделювання та дослідження електронних схем з мемристорами. Ця модель з'явилась у 10-й версії пакету схемотехнічного моделювання електронних схем MicroCap разом з моделями інших пасивних компонентів з пам'яттю – ємнісними та індуктивними і коли з'явилися відповідні матеріали і технології.

Крім наукових співробітників Hewlett-Packard дослідженнями мемристорів займаються й інші колективи вчених. В американському Університеті Райса розробляють такі елементи пам'яті не з діоксиду титану, а з набагато більш дешевого оксиду кремнію, який легко отримати зі звичайного піску. Розрахункова товщина шару оксиду кремнію становить від 5 до 20 нм, швидкість перемикання - не більше 100 нс. В Університеті Райса була також успішно вирішена задача ба -

гаторазового запису в комірки пам'яті на основі мемристорів з оксиду кремнію.

В американському Національному інституті стандартів і технології (NIST) була розроблена технологія виготовлення гнучких елементів пам'яті на основі мемристорів з діоксиду титану. В якості підкладки був використаний полімерний матеріал, а отриманий елемент зберігає працездатність після чотирьох тисяч циклів вигину [3].

Використання мемристорної технології в комп'ютерній техніці може дозволити створювати комп'ютери абсолютно нового зразка, більш швидкі, енергоефективні, здатні обробляти паралельно величезні об'єми даних. На основі мемристорів вченими розроблюються нові підходи до створення систем із штучним інтелектом, здатних не просто запам'ятовувати, а й вчитися.

## Моделювання мемристора

### Модель мемристора

Опір мемристора  $R_{mem}$  виражається наступним співвідношенням:

$$R_{mem}(x) = R_{on} \cdot x + R_{off} \cdot (1 - x),$$

де  $x = W/D$ ;  $D$  – вся ширина точкової плівки мемристора ( $D = 10 \text{ нм}$ );  $W$  – фактична ширина легованої області;  $R_{on}$  – опір мемристора у стані «ввімкнений» ( $x = 1$ );  $R_{off}$  – опір мемристора у стані «вимкнений» ( $x = 0$ );  $R_{init}$  – опір мемристора у початковому стані ( $t = 0$ ).

Макромодель мемристора у середовищі MicroCap показана на рис. 2.

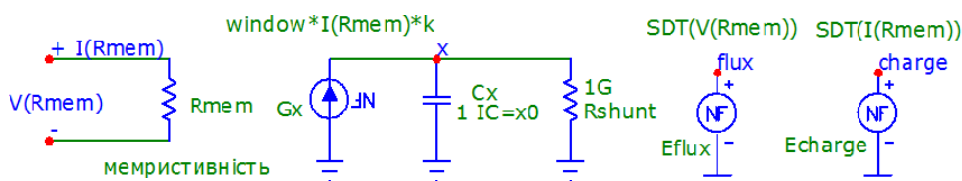


Рис. 2. Електрична схема макромоделі мемристора

Співвідношення  $x$  визначається струмом мемристора  $I(R_{mem})$  і обчислюється з рівняння:

$$\frac{dx}{dt} = k \cdot I(R_{mem}) \cdot [window],$$

де  $k = \frac{U_d \cdot R_{on}}{D^2}$ ,  $U_d$  – коефіцієнт домішкової

нелінійності ( $U_d = 10^{-14} \text{ (м}^2/\text{сек} \cdot \text{В)}$ );  $[window]$  – віконна функція моделювання нелінійності дрейфу  $f(x)$ .

В середовищі MicroCap можна задавати тип вікна, який буде використовуватись при моделюванні:  $[window\_type 0]$  – вибирається користувачем;  $[window\_type 1]$  – вікно Joglekar.

$$f(x) = 1 - (2x - 1)^{2p};$$

$[window\_type 2]$  – вікно Biolek.

$$f(x) = 1 - (x - stp(-I))^{2p};$$

$$stp(I(R_{mem})) = 1, I \geq 0$$

$$stp(I(R_{mem})) = 0, I < 0$$

$\rho$  – параметр моделювання нелінійності дрейфу ( $\rho = 1..25$ ).

Величина  $x$  формується джерелом струму  $G_x$ , залежним від струму мемристора та інтегруючого ланцюга  $C_x$ ,  $R_{shunt}$  з постійною інтегрування  $10^6$  сек.

### Моделювання мемристора з джерелом напруги

Електрична схема моделювання мемристора з джерелом напруги в системі MicroCap 10 показана на рис. 3.

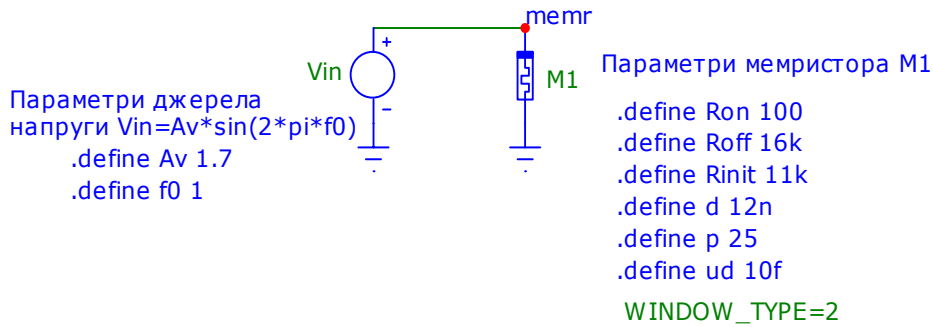


Рис. 3. Електрична схема моделювання мемристора з джерелом напруги

Схема складається з джерела синусоїдальної напруги ( $V_{in}$ ) та мемристора (M1). Параметри джерела напруги:

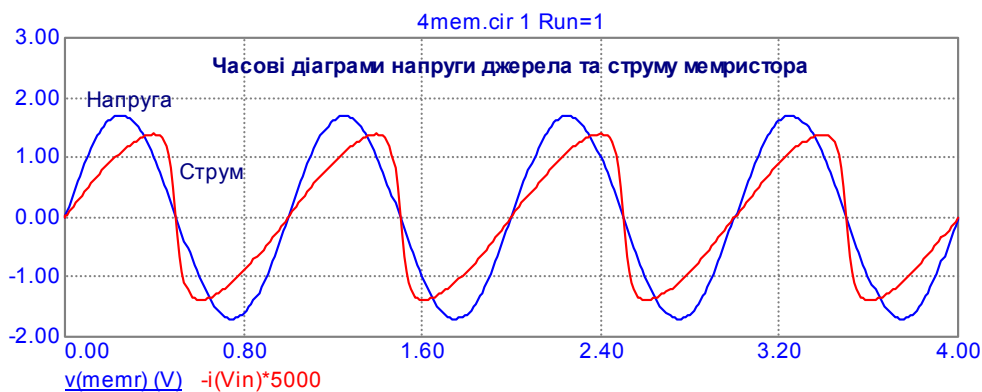
- Амплітуда сигналу ( $A_v$ ) = 1,7 В;
- Частота сигналу ( $F_0$ ) – 1 Гц;

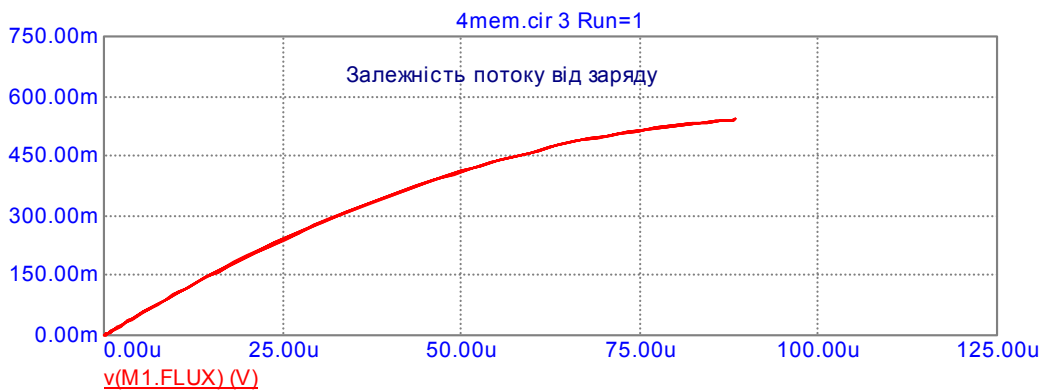
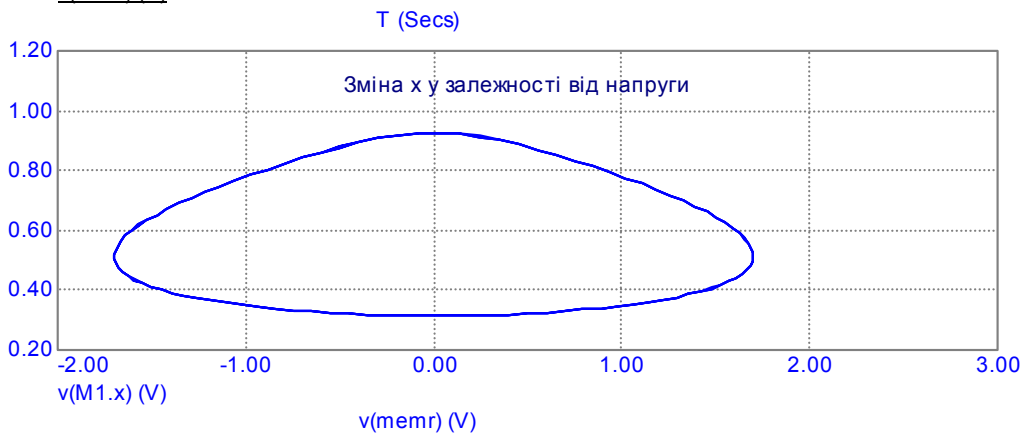
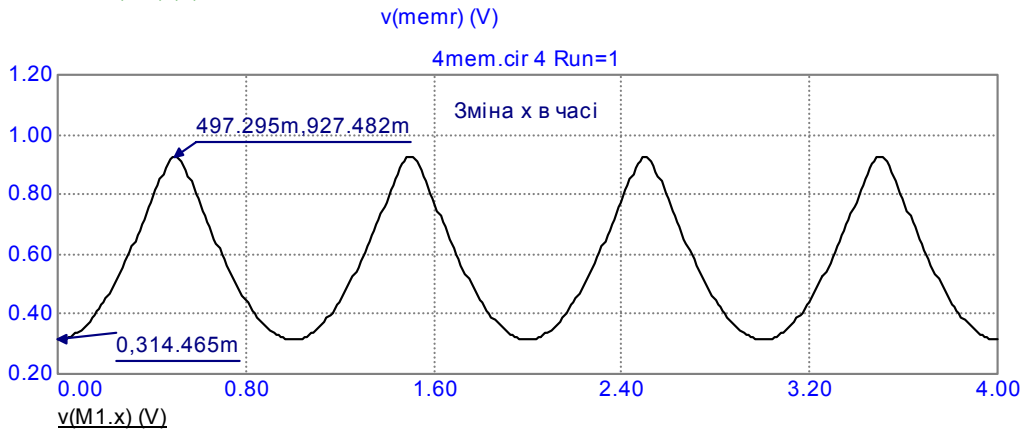
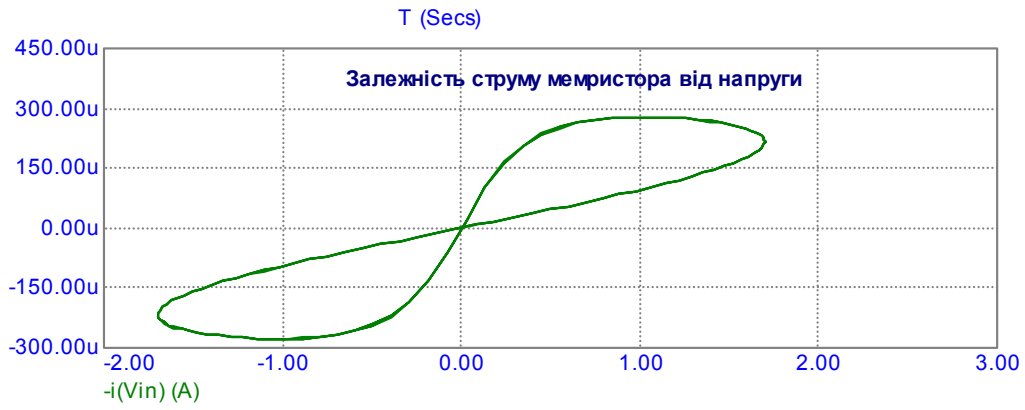
Параметри мемристора вибрані на основі рекомендацій [4]:

- $R_{on} = 100$  Ом;
- $R_{off} = 16$  кОм;
- $R_{init} = 11$  кОм;
- $D = 12$  нм;
- $\rho = 25$ ;

- $U_d = 10^{-12} \text{ м}^2/\text{сек} \cdot \text{В}$ ;

Результати моделювання показані на рис. 4. Як видно з рисунків, характер зміни опору мемристора має гістерезисний характер і змінюється в певних межах, відповідно до стану мемристора. При відключенні живлення, мемристор зберігає (запам'ятовує) величину опору в момент відключення. Опір елемента не зміниться до тих пір, поки не підключити живлення повторно. Діапазон зміни опору (мемристивності) в даному випадку коливається в межах від 11 кОм (початковий стан) до 1,253 кОм (в стані «ввімкнений»).





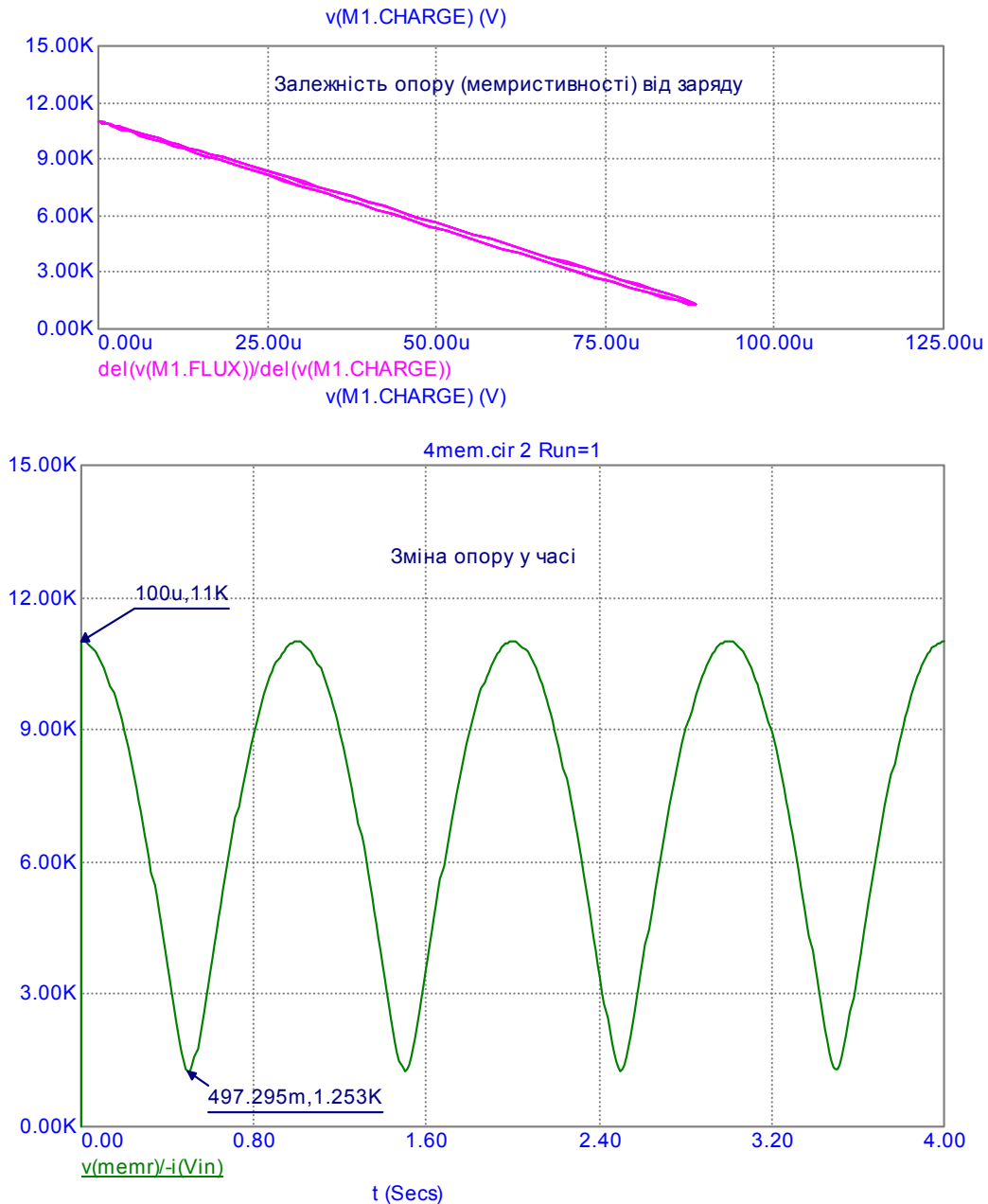


Рис. 4. Графіки результатів моделювання мемристора з джерелом напруги

Як видно з рисунків, мемристору властивий гістерезисний характер зміни своїх властивостей. Це гарно видно з його вольт-амперної характеристики. Залежність опору від заряду (рис. 6) є лінійною зі слабко вираженим гістерезисом.

#### Моделювання мемристора з джерелом струму

Електрична схема моделювання мемристора з джерелом струму в системі MicroCap 10 показана на рис. 5.

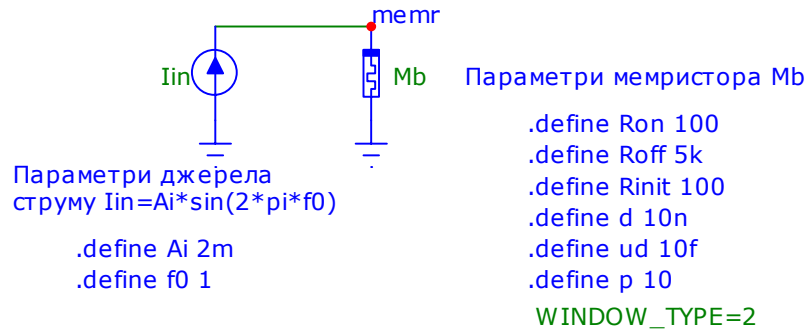


Рис. 5. Електрична схема моделювання мемристора з джерелом струму

Схема складається з джерела синусоїдального струму ( $I_{in}$ ) та мемристора ( $Mb$ ). Параметри джерела струму:

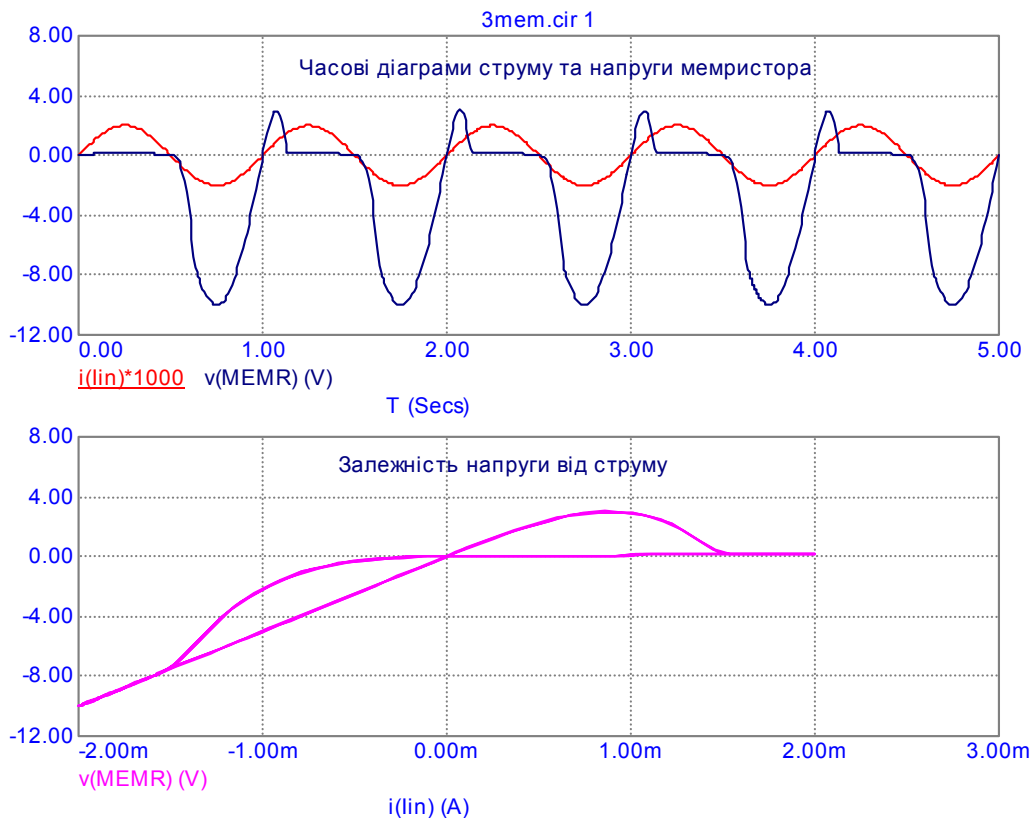
- Амплітуда сигналу ( $A_i$ ) = 2 мА;
- Частота сигналу ( $F_0$ ) – 1 Гц;

Параметри мемристора вибрані на основі рекомендацій [4]:

- $R_{on} = 100$  Ом;

- $R_{off} = 5$  кОм;
- $R_{init} = 100$  кОм;
- $D = 10$  нм;
- $p = 10$ ;
- $U_d = 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/сек\*В;

Результати моделювання показані на рис. 6



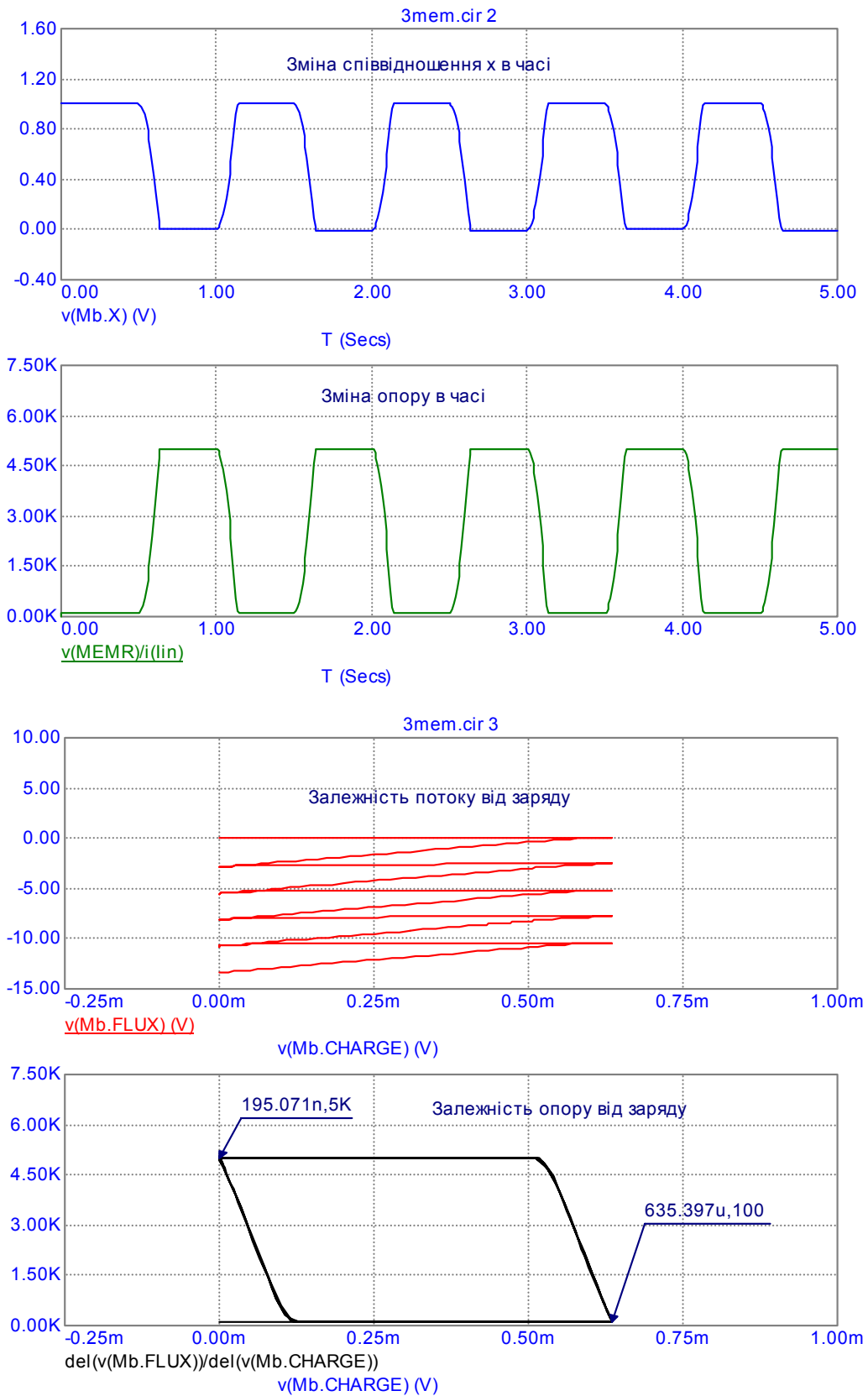


Рис. 6. Графіки результатів моделювання мемристора з джерелом струму

В схемі з джерелом струму, залежність опору від заряду має більш виражений гістерезис-

ний характер в порівнянні зі схемою з джерелом напруги. З'явилися ділянки, на яких опір мемри-

сторона не змінюється. Діапазон зміни опору (мемристинності) в даному випадку знаходиться в межах від 5 кОм (в стані «вимкнений») до 100 Ом (в стані «ввімкнений»). На відміну від аналогічної характеристики показаної на рис. 4, мемристор показує більш виражений гістерезисний характер зміни опору.

### Висновки

В роботі була запропонована методика моделювання характеристик мемристора. Дана методика може бути використана для дослідження, як для простих, так і для більш складних схем.

Моделювання проводилося на прикладі простих мемристорних схем з джерелом струму та напруги. Результати моделювання підтверджують гістерезисний характер залежності опору мемристора від заряду на елементі.

### Список використаних джерел

1. *Chua L.O.* Memristor – the missing circuit element // *IEEE Transactions on circuit theory.* 1971. V. 18. № 5. PP. 507-519.
2. *Strukov D.B.* [et al]. The missing memristor found // *Nature.* 2008. V. 453. PP. 80-83. DOI:10.1038/nature06932
3. *Nechay O.* Memristor: "The Missing Element" // *Computerra OnLine* URL: <http://old.computerra.ru/vision/591537/>.
4. *Biolek Z., Biolek D., Biolkova V.* SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift // *Radioengineering.* 2009. V. 18. № 2. PP. 210-214.
5. *Zaplatilek K.* Memristor modeling in MATLAB and Simulink // *Proceedings of the European computing conference.* 2011. PP. 62-67.

*Поступила в редакцію 26 марта 2015 г.*

УДК 004.94

**В.Г. Артюхов**, канд. техн. наук, **И.В. Коноваленко**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

## Схемотехническое моделирование мемристора в среде MicroCap

*Главная цель публикации - привлечь внимание студентов, аспирантов и молодых специалистов к функционально новому элементу электронных схем - мемристор, обладающего способностью к «запоминанию» сопротивления. Появление в пакете MicroCap 10 модели мемристора дает возможность построения и исследования мемристорных схем: запоминающих схем, нейронных сетей и т.п. В работе приведено подробное описание модели мемристора и проведено моделирование простых мемристорных схем с источниками тока и напряжения. Полученные результаты демонстрируют методику получения характеристик мемристора и показывают его свойства. Данная методика может быть использована при моделировании более сложных мемристорных схем. Библ. 5, Рис. 6.*

**Ключевые слова:** мемристор; MicroCap; моделирование; мемристинность, зависимость сопротивления от заряда магнитного потока.

UDC 004.94

**V.G. Artuhov**, Ph.D., **I.V. Konovalenko**

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute"  
#16 Polytechnichna Str., building 12, Kyiv, 03056, Ukraine.

## Memristor circuit simulation in MicroCap

*Main purpose of the publication - to attract the attention of students, graduates and young professionals to the new functional element of electronic circuits - memristor, having the ability to "memorize" the resistance. Appearance of memristor model in MicroCap 10 enables the ability to develop and research memristor circuits: memory circuits, neural networks, etc. In this article is given a detailed description of the model and made simulation of a simple memristor circuits with voltage and current sources. These*



---

results demonstrate the method of receiving the memristors characteristics and show its properties. This technique can be used for modeling more complex memristor circuits. Referenses 5, Figures 6.

**Keywords:** memristor; MicroCap; modeling; memristance, the dependence of the resistance of the charge flux.

### References

1. Chua L.O. (1971), «Memristor – the missing circuit element». IEEE Transactions on circuit theory.. Vol. 18. No 5. Pp. 507-519.
2. Strukov D.B. [et al]. (2008), “The missing memristor found”. Nature.. V. 453. Pp. 80-83. DOI:10.1038/nature06932
3. Nechay O. Memristor: “The Missing Element”. Computerra OnLine URL: <http://old.computerra.ru/vision/591537/>.
4. Biolek Z., Biolek D., Biolkova V. (2009), “SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift”. Radioengineering.. Vol. 18. No 2. Pp. 210-214.
5. Zaplatilek K. (2011), “Memristor modeling in MATLAB and Simulink”. Proceedings of the European computing conference. Pp. 62-67.