педагогических наук создания эффективных систем обучения, отвечающих современным уровням осведомленности и профессиональной компетентности молодого поколения, настраивали бы их на внедрение инновационных учебных технологий, способных обеспечить и удовлетворить общественные и личностные потребности каждого человека.

Ключевые слова: компетентность, компетенция, обучение, личностно-ориентированное обучение, урок, учитель, образование.

N. I. Nimchuk

Kamianets-Podilskyi National Ivan Ohiienko University

DEVELOPMENT OF A COMPETENT PROFESSIONAL IN THE CONDITIONS OF PERSONAL ORIENTAL EDUCATION

Today's education requires intensive and highly effective learning technologies. In this vein, curricula and manuals are developed that are able to change traditional approaches to the study of subjects of natural and mathematical direction towards the improvement of students' content and practical knowledge, skills and skills. However, the analysis of scientific and pedagogical sources shows that the research activity of students in the general methodology of teaching physics is steadily declining.

One of the important areas of education in Ukraine is the creation of prerequisites for the formation of an educated, creative personality, a competent specialist, capable of life and self-realization in today's globalized society. This is emphasized in the National Doctrine of the Development of Education of Ukraine, which requires the psycho-pedagogical sciences to create effective systems of education that would meet the modern levels of awareness and professional competence of the young generation, set them up to introduce innovative educational technologies that can provide and satisfy the public the needs of each person.

Key words: competence, competence, learning, person-oriented learning, lesson, teacher, education.

Отримано: 22.09.2019

УДК 519.3

DOI: 10.326626/2307-4507.2019-25.137-139

Р. А. Поведа, С. В. Оптасюк

Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка

e-mail: povedar@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕМРИСТОРА У КУРСІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ В УНІВЕРСИТЕТІ

У статті зосереджено увагу на актуальності та доцільності введення в курс навчання бакалаврів та магістрів фізико-математичних спеціальностей функціонально нового та перспективного елемента електронних схем – мемристора. Описано його фізичні основи роботи та основні електричні властивості. Змодельована на цій базі еквівалентна схема та вольт-амперна характеристика мемристора.

Ключові слова: віртуальна модель, мемристор, гістерезис.

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 [1]. Чу назвав «відсутній» 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 струму, що пройшов через елемент раніше. 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 кількості заряду. Тобто, величина *M* залежить від кількості електрики, що пройшла через елемент, тобто від того, як довго через нього протікав електричний струм (*рис. 1*).

Уперше ефект мемристивності був експериментально продемонстрований у 2008 році для системи метал-діелектрик-метал Pt-TiO2-TinO2n-1-Pt [2]. Показано, що мемрістівний ефект виникає в нанорозмірних структурах метал-діелектрик-метал за рахунок переміщення зарядів в надтонкому діелектричному шарі в присутності електричного поля, наприклад, при русі вакансій кисню в шарі діоксиду титану.

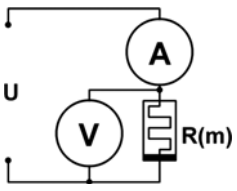

***Рис. 1**. Умовне позначення мемристора та спосіб вивчення ВАХ*

Також ефект мемристивності був продемонстрований в системі нанокомірка-іонний розчин, в пристроях на основі електропровідних полімерів і протеїнових молекул, наночастинок монокристалічного магнетиту (Fe_3O_4). Проте, мемристори на основі подібних матеріалів не є технологічними для сучасних інтегральних схем що, відповідно, істотно ускладнює інтеграцію мемристорів у сучасне виробництво.

Тому в якості основи мемристорних електронних приладів перспективніше використовувати структури метал-діелектрик-метал, які легко інтегруються в сучасний силіконовий технологічний цикл. Де в якості діелектричного шару застосовують оксид титану TiO_2-Ti_nO_{2n-1} товщиною 5-40 нм, а також інші оксиди металів: ZrO_2-ZrO_{2-x}, HfO_2-HfO_{2-x}, $Ti_aZr_bHf_cO_2$-$(Ti_dZr_eH_f)_nO_{2n-1}$, VO_2-V_nO_{2n-1}, $V_aNb_bTa_cO_2$-$(V_dNb_eTa_f)_nO_{2n-1}$, Nb_2O_5-, NbO_2, Ta_2O_5-TaO_2, MoO_3-Mo_nO_{3n-1}, WO_3-W_nO3_{n-1}, $Cr_aMo_bW_cO_3$-$(Cr_dMo_eW_f)_nO_{3n-1}$, Fe_2O_3-Fe_3O_4, Ni_2O_3-Ni_3O_4, Co_2O_3-Co_3O_4.

Існує кілька загальноприйнятих моделей резистивного ефекту. Загальноприйнятий в якому реакція обумовлена відновленням/окислюванням оксиду, діелектрика МДМ-структури мемристора. Реакцію відновлення/окислювання оксиду супроводжує дрейф іонів кисню і, відповідно, вакансій кисню в плівці оксиду. Вакансії кисню є пастками для електронів, за якими відбувається перенiс заряду від одного неметалевого електрода до іншого [3]. Залежно від конценції вакансій кисню і їх розподілу в оксиді МДМ-структура може перебувати в високоомному або низькоомними стані.

На *рис. 2* схематично показано фізичну модель мемристора на основі МДМ-структури, яка пояснює принцип дії. Між металевими

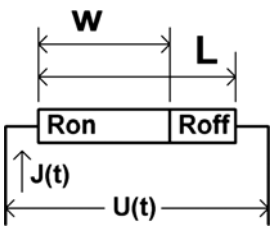

***Рис. 2.** Фізична модель мемристора*

© Поведа Р. А., Оптасюк С. В., 2019

електродами формується плівкова структура товщиною L, що складається з двох областей: з високою R_{ON} і низькою R_{OFF} провідністю. Межа цих областей w здатна змінювати своє положення в залежності від кількості заряду що пройшов через мемристор. Якщо область з високою провідністю розшириться до всієї товщини плівки, то відношення w/L=1 і провідність мемристора повністю визначається опором цієї області $\boldsymbol{R_{ON}}$. При зменшенні області з високою провідністю до нуля w/L=0 і опір мемристора визначається тільки областю з високим опором R_{OFF}. Математична модель такого мемрістора може бути представлена рівняннями:

$$R_M(w) = \left(R_{ON}\frac{w}{L} + R_{OFF}\left(1 - \frac{w}{L}\right)\right),\ J(t) = R_M^{-1}(w)U(t),$$

де U – напруга на мемристорі, J – струм через мемристор, R_M – опір мемристора.

Зміна з часом меж областей з високою R_{ON} і низькою R_{OFF} описується наступним рівнянням:

$$\frac{dw(t)}{dt} = k\frac{R_{ON}}{L} + \frac{\chi^2}{L}J(t),$$

де k – коефіцієнт, що характеризує властивості плівки.

Інтегруючи наведене рівняння, можна отримати залежність величини w від кількості заряду q, що пройшов через мемристор:

$$w(t) = w_0 + k\frac{R_{ON}}{L}q(t),$$

де w_0 – постійна інтегрування, фізичним змістом якої є початкове значення величини w.

В основному, сучасні пристрої комп'ютерної пам'яті для зберігання інформація працюють на двох основних принципах: на основі збереження заряду, як наприклад, довгострокова флеш-пам'ять, або оперативна пам'ять на основі тригерних схем; і другий спосіб збереження інформації – на основі магнітного гістерезису. У цьому випадку зберігається залишкова намагніченість магнітопроводу після пропускання струму або тієї частини феромагнітної поверхні, поруч з якою пройшла електрична котушка головки запису-зчитування що фіксує рівень і напрямок магнітного потоку частини поверхні – домену.

Мемристори відкривають перспективи створення комірок пам'яті на основі електричного гістерезису. На початку 2009 року в Hewlett-Packard була розроблена така гібридна мікросхема. Чіп є матрицею з 32 провідників діаметром 50 нм, 16 з яких натягнуті паралельно один одному, а інші 16 – перпендикулярно. Шар діоксиду титану товщиною 20 нм розташований між взаємно перпендикулярними провідниками, і в цих місцях формуються мемристори. Навколо цієї «сітки» розташований масив польових транзисторів, підключених до контактів мемристорів для комутації струмів (*рис. 3*).

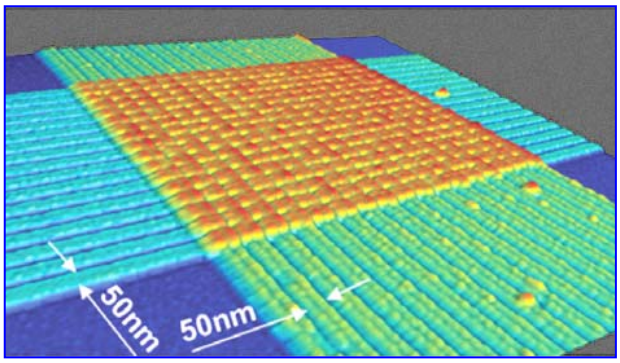

***Рис. 3**. Фрагмент мікросхеми мемристорної пам'яті*

Крім того, властивості мемристорів дозволяють говорити про те, що на їх основі можна створювати комп'ютери принципово нової архітектури. Сучасні комп'ютери побудовані на базі архітектури фон Неймана: і дані, і програми зберігаються в пам'яті машини в двійковому коді, причому обчислювальний модуль відділений від пристроїв зберігання, а програми виконуються послідовно, одна за одною.

У мемристорному комп'ютері паралельно і незалежно один від одного можуть працювати безліч модулів, що відтворюють структуру нейронів. Комп'ютер на базі мемристорів може стати суттєвим кроком вперед, оскільки на сьогодні мемристор є єдиним неживим матеріалом, що наближається за своїми електричними властивостями до властивостей синапсів живого мозку, який здатний моделювати роботу людського мозку, в якому немає якогось єдиного центру збору та обробки інформації і в перспективі наблизити створення штучного інтелекту.

Все це вимагає приділяти мемристорам більше уваги в навчальних програмах ЗВО [4]. Оскільки як дискретний елемент мемристор поки що не поширений, а самостійний синтез вимагає значної науково-технічної бази, альтернативою може бути моделювання електричних властивостей мемристора за допомогою еквівалентної схеми в віртуальній лабораторії такій, як наприклад MultisimWorkBench.

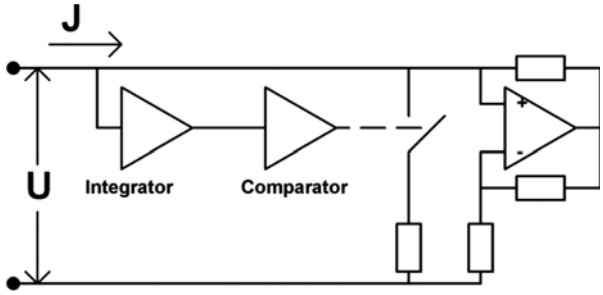

***Рис. 4**. Функціональна блок-схема моделі мемристора*

На *рис. 4* запропонована функціональна блок-схема моделі мемристора, реалізація якої дозволяє моделювати електричні властивості елемента (див. *рис. 5*).

На *рис. 6* наведено результат моделювання ВАХ мемристора в MultisimWorkBench з джерелом струму. Вимірювальний прилад «oscilloscope XSC1» включений в режим побудови по осях струм-напруга, де залежність опору від заряду має виражений гістерезисний характер.

Висновки. Враховуючи досвід використання в навчальному процесі віртуальних моделей електронних компонентів, функціональних блоків та електронних схем [4, 5, 6, 7], була запропонована еквівалентна схема та методика моделювання електричних характеристик мемристора. Дана методика може бути використана для дослідження, як для простих, так і для більш складних схем з використанням мемристорів як основних елементів схеми нейронних мереж. Моделювання проводилося на прикладі простої мемристорної схеми з джерелом струму. Результати моделювання підтверджують гістерезисний характер залежності опору мемристора від заряду на елементі.

Список використаних джерел:

1. Chua L.O. (1971), «Memristor – the missing circuit element». *IEEE Transaction son circuit theory*. Vol. 18. No 5. P. 507-519.
2. D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, R.S. Williams. Nature 2008, 453, p. 80.
3. Sh. Yu, X. Guan, H.-S. Ph. Wong. Appl. Phys. Lett. 2011. 99, p. 063507

4. Поведа Р.А. Деякі актуальні доповнення до курсу електро- та радіотехніки у вищих навчальних закладах. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна*. – Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2011. Вип. 17: Інноваційні технології управління компетентнісно-світоглядним становленням учителя: фізика, технологія, астрономія. С. 250-254.
5. Поведа Р.А. Застосування програм символьної математики для моделювання складних електронних процесів під час вивчення дисциплін (професійного) фізико-математичного циклу в університеті. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна* / [ред-кол.: П.С. Атаманчук (голова, наук. ред.) та ін.]. Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2018. Випуск 24: STEM-інтеграція як важлива передумова управління результативністю та якістю фізичної освіти. 194 с. С. 73-76.
6. Поведа Р.А Моделювання експериментів Ніколи Тесла у віртуальній лабораторії Workbench. *Наукові праці Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка*: збірник за підсумками звітної наукової конференції викладачів, докторантів та аспірантів: у 5-ти томах. Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка. 2010. Вип. 9. Т. 2. С. 44-45.
7. Поведа Р.А, Оптасюк С.В., Криськов Ц.А. Основи сучасної електроніки. Лабораторний практикум. Частина 1. Кам'янець-Подільський: Аксіома, 2018. 70 с.

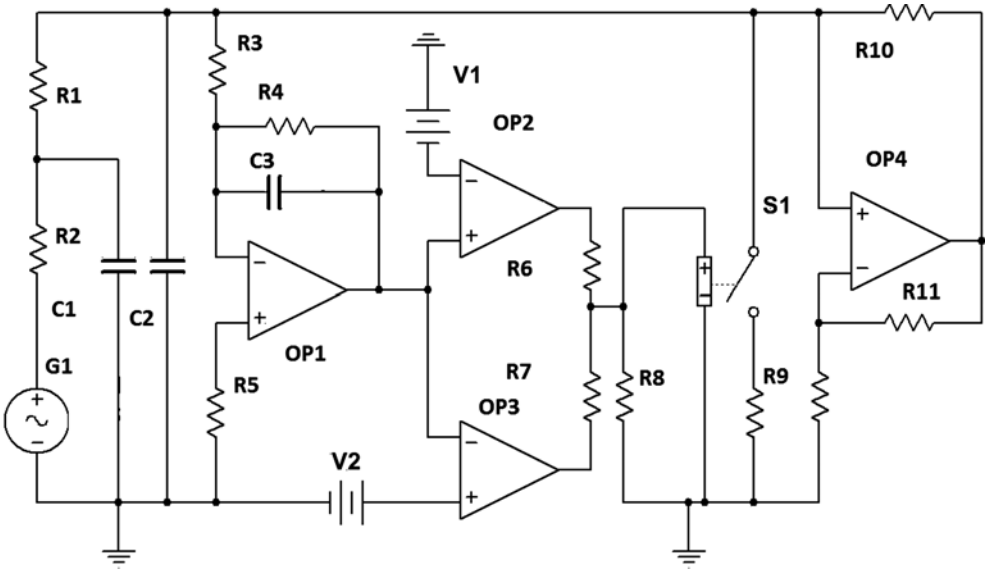

Рис. 5. *Фактична схема моделі мемристора в MultisimWorkBench*

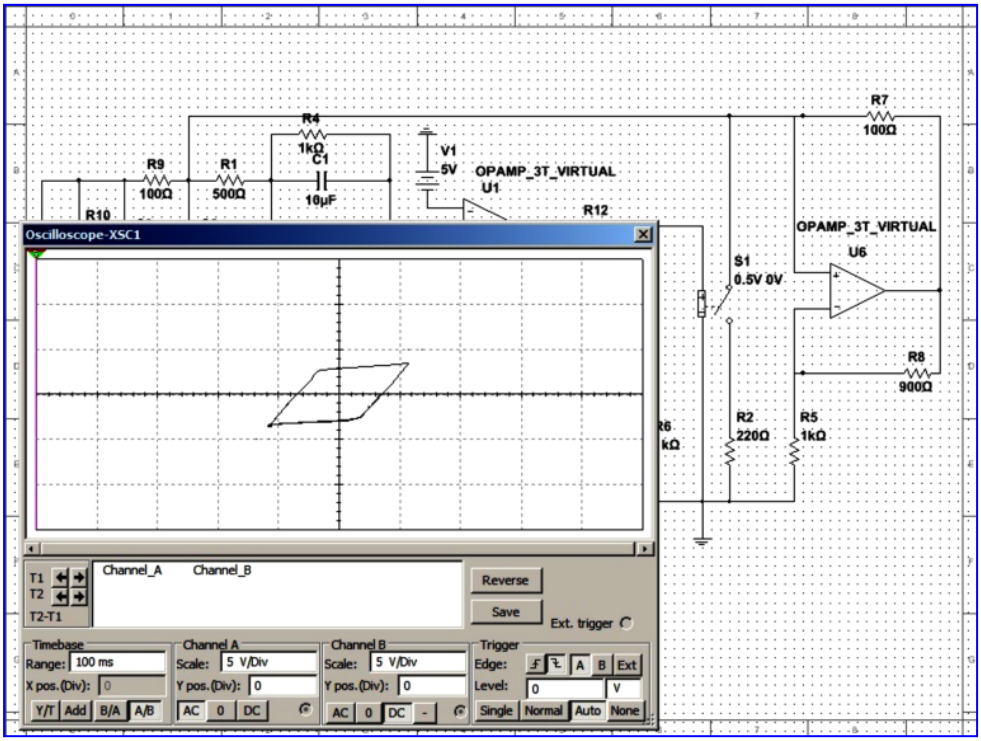

Рис. 6. *Результат моделювання ВАХ мемристорав MultisimWorkBench*

стров физико-математических факультетов функционально нового и перспективного элемента электронных схем – мемристора. Описаны его физические основы работы и основные электрические свойства. Смоделировано эквивалентную схему и ВАХ мемристора.

Ключевые слова: виртуальная модель, мемристор, гистерезис.

Р. А. Поведа, С. В. Оптасюк

Каменец-Подольский национальный университет имени Ивана Огиенко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В КУРСЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ В УНИВЕРСИТЕТЕ

В статье сосредоточено внимание на актуальности и важности введения в курс обучения бакалавров и магистров физико-математических факультетов функционально нового и перспективного элемента электронных схем – мемристора. Описаны его физические основы работы и основные электрические свойства. Смоделировано эквивалентную схему и ВАХ мемристора.

Ключевые слова: виртуальная модель, мемристор, гистерезис.

R. A. Poveda, S. V. Optasyuk

Kamianets-Podilskyi National Ivan Ohiienko University

MODELING OF ELECTRICAL PROPERTIES IN THE COURSE OF LABORATORY WORKS AT THE UNIVERSITY

The relevance of introducing in to the training of bachelors and masters functionally new and promising element of electronic circuits – memristoris considered. The physical basics of work and basic electrical properties are described. The equivalent circuit and the volt-ampere dependence of the memristor are modelled on these bases.

Key words: virtual model, memristor, hysteric's.

Отримано: 23.09.2019