



Љубиша М. Бојић^[1]

Истраживачко-развојни
институт за вештачку
интелигенцију Србије
Нови Сад (Србија)



Милан М. Чабаркапа^[2]

Универзитет у Крагујевцу,
Факултет инжењерских наука,
Катедра за електротехнику
и рачунарство
Крагујевац (Србија)

УДК 004.8(497.11)

001.895

Оригинални научни рад

Примљен: 20.06.2024.

Прихваћен: 09.07.2024.

doi: 10.5937/napredak5-51738

Стратешко улагање у истраживање и развој мемристор технологије у Републици Србији

Сажетак: Убрзани напредак вештачке интелигенције (ВИ) значајно је утицао како на развој високе технологије, тако и на економски и друштвени развој. Република Србија се стратешки оријентисала да подржи истраживање и развој у области ВИ. Имајући у виду драматичну динамику развоја ВИ, циљ овог рада јесте да идентификује и опише мемристор технологију као тренутно веома актуелну и атрактивну, како би се оствариле технолошке иновације, друштвено-економски беневити и потенцијално глобални продор. У раду је представљен преглед литературе како би се анализирали теоријски појмови, тренутни исходи истраживања и могуће примене мемристор технологије. Анализе указују на то да развој ове технологије у Србији може позиционирати земљу на место предводника у иновацијама код хардвера ВИ и подстаћи међународну сарадњу, стимулишући технолошки напредак целе привреде. Стога се овим радом предлаже да се будућа истраживања усмере на превазилажење практичних изазова у производњи мемристор технологије, развој хибридних архитектура и формулисање напредних неуроморфних алгоритама.

Кључне речи: мемристори, неуроморфно рачунарство, технолошке иновације, стратешко позиционирње, глобални продор

Увод

ВИ се брзо трансформисала од уске области рачунарских наука, до важног чиниоца који обликује привреду и друштво у читавом свету. Будући да смо на прагу нове технолошке револуције,

неопходно је да се идентификује специфична област у оквиру ВИ како би се усмерили ресурси у истраживање и развој, са циљем да се остваре технолошки напредак и друштвено-економски беневит. Међу значајнијим потезима које је Република Србија спровела како би подржала

[1] ljubisa.bojic@ivi.ac.rs ; <https://orcid.org/0000-0002-5371-7975>

[2] mcabarkapa@kg.ac.rs ; <https://orcid.org/0000-0002-2094-9649>

развој у овој области јесу усвајање Стратегије развоја ВИ за период од 2020. до 2025. године, оснивање института који је посвећен истраживањима и развоју ВИ, усвајање смерница за етички развој ВИ и успостављање законског оквира за аутономну вожњу (Strategija, 2020; IVI, 2022; Etika 2023; Auto, 2023). У погледу ове области, Република Србија је у предности у односу на многе земље у свету захваљујући свом геополитичком положају, јаким академским институцијама и научно-технолошком систему.

44 | Главно питање које ће се разматрати у овом раду јесте на који начин стратешко улагање Републике Србије у област ВИ може довести до технолошких иновација. Усред динамичног развоја ВИ, поред области које су већ идентификоване у актуелној Стратегији развоја ВИ, као и геополитичко повољне позиције за успостављање форума који би радио на глобалним решењима за регулисање и етику ВИ (Војис, 2024; Војис, 2022), мемристор технологија се појављује као интересантна због очекивања да реши проблем од виталног значаја, а то је висока потрошња електричне енергије система ВИ, као што су велики језички модели (ChatGPT) (Војис et al., 2024, Talanov et al., 2024). Ово је нарочито важно јер велике технолошке компаније развијају вештачку интелигенцију генералног типа, која ће бити примењена кроз различита решења и

услуге у свим аспектима друштва. Стога рад првенствено разматра могућност развоја мемристора, предлагајући да Република Србија започне улагање у ту врсту технологије за коју се очекује да омогући развој нове генерације неуралних мрежа и доведе до револуције у ВИ.

Мемристори и неуралне мреже треће генерације

Рад Леона Чуе (Leon Chua) из 1971. излаже теоријску основу о мемристорима у којој се они описују као елемент електричних кола, уз општепознате

елементе – отпорнике, кондензаторе и индукторе. Чуа објашњава да мемристори могу чувати и обрађивати информације слично активностима синапси у мозгу. Ова технологија на јединствен начин повезује електрични напон и магнетни ток, омогућавајући нелинеарну везу између напона и струје. Ова веза

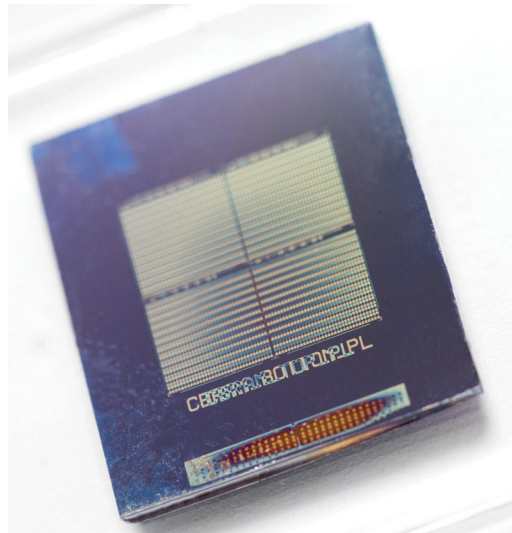
Мемристори представљају трећу генерацију неуралних мрежа које пружају већу ефикасност и могућност уштеде енергије код рачунарских процеса ВИ. Због карактеристике мемристор технологије да подражавају функције синапси мозга, ова технологија је погодна за примену у вештачкој интелигенцији.

омогућава мемристорима да задрже меморију без сталног напајања, што је карактеристика која подсећа на функционисање синапси мозга.

Мемристор технологија је била пуки теоријски конструкт све до 2008. када је конструисана помоћу нанометарске превлаке од титанијум-диоксида (Strukov et al., 2008). Ово откриће потврдило је претпоставке Леона Чуе и отворило пут за

Љубиша М. Бојић
Милан М. Чабаркапа

Стратешко улагање у истраживање и развој
мемристор технологије у Републици Србији



Мемристор, који су произвели Универзитет у Илиноису и Национална лабораторија за енергетску технологију Сједињених Америчких Држава који је изумео Леон Чуа 1971. године.

Фото: Wikipedia

даља истраживања. Синаптичка функционалност мемристор технологије проистиче из њене карактеристике да мења отпор на основу историје напона. Ово својство је познато као хистереза и оно опонаша синаптичку пластичност биолошких неуронских мрежа у којима синаптичка снага варира у зависности од неуронске активности.

Због тога што се у конструисању мемристор технологије користе нанометарске превлаке, могуће је значајно умањити потрошњу енергије у поређењу с традиционалним силиконским отпорницима. Пошто омогућавају брзу и ефикасну обраду информација, уређаји у којима се користе мемристоры могу створити способније системе ВИ, те се могу примењивати у различитим областима, од роботике до анализе података у реалном

времену. Скорија истраживања указују на примену неуронских мрежа заснованих на мемристорима у решавању задатака препознавања образаца (*pattern recognition*) (Prezioso et al., 2015), што поткрепљује чињеницу да системи мемристор технологије могу самостално учити и решавати проблеме на сличан начин као биолошки системи.

Технолошка достигнућа и изазови у конструисању мемристор технологије

Најзначајнија област истраживања у случају мемристор технологије односи се на материјале који се користе за њихову израду. Као што је поменуто,

прво се у изради користио титанијум-диоксид. Касније су се користили материјали као што су хафнијум-оксид, графен-оксид и органска једињења. Сваки материјал има јединствене особине које утичу на перформансе и трошкове производње мемристор технологије (Adhikari et al., 2012). Графен-оксид је погодан материјал због електричне проводљивости, механичке стабилности и флексибилности. Истраживање је показало да се мемристор технологија на бази графен-оксида одликује издржљивошћу и великом брзином функције прекидача (*switching speed*), што је веома важна карактеристика код примене у ВИ. Међутим, и даље постоје проблеми у вези с постизањем униформности у производњи. Променљивост својстава материјала доводи до неуједначених перформанси мемристор технологије. Зато су нове технике њене израде, као што су атомска депозиција и хемијска депозиција слојева превлака из парне фазе, предмет истраживања, а с циљем побољшања репродуктивности уређаја који користе мемристор технологије (Chang, Jo, Lu, 2011).

Примена мемристора у традиционалним рачунарским системима захтева иновативне приступе у дизајну електричних кола. За разлику од конвенционалних транзистора, нелинеарно понашање мемристор технологије захтева нове архитектуре електричних кола. Хибридна кола у којима мемристор допуњују традиционалне транзисторе могу допринети ефикасности рачунарских процеса (Wang et al., 2017). Значајан помак у развоју јесу попречни низови (*crossbar arrays*) у којима су мемристор распоређени по мрежној структури. Попречни низови омогућавају велику густину меморијског складиштења и паралелне рачунарске поступке. Истраживање је показало

да је могуће применити попречне низове у неуроморфним системима који су способни за препознавање образаца и самостално учење (Prezioso et al., 2015). Треба напоменути да је дизајнирање ефикасних механизма за читање и писање кола која су заснована на мемристорима неопходно за примену тих кола. Зато се истражују алгоритми читања и писања, као и технике за исправку грешака, како би се побољшала поузданост меморијских система који користе мемристор технологије.

Опонашајући пластичност синапси, мемристор може олакшати синаптичко вагање (*synaptic weighting*) и прилагођавање (Yang et al., 2013). Акцелератори засновани на мемристорима превазилазе традиционалне системе засноване на графичким процесорима (*graphics processing unit – GPU*). Ширењем интернета ствари (*Internet of Things*) све је потребније ефикасно ивично рачунарство (*edge computing*), у којем се подаци локално обрађују, уместо да се ослањају на удаљене сервере. Системи засновани на мемристорима погодни су за примену у ивичном рачунарству, али и у ивичној ВИ (Ambrogio et al., 2018). Ови системи могу се применити код паметних мрежа и аутономних возила, на пример, што су само неке од бројних могућих примена мемристор технологије.

Примене мемристор технологије у различитим индустријама

Примене мемристор технологије су разноврсне и обећавају револуционарне промене у различитим индустријама, од здравства и пољопривреде, до енергетике и аутомобилске индустрије. Захваљујући својој способности да увећа енергетску

ефикасност и омогући напредне рачунарске процесе, мемристор технологија се сматра кључним носиоцем иновација и технолошког прогреса. У овом поглављу анализираћемо најзначајније примене мемристора у разним областима, као и њихове предности и изазове.

Мемристор технологија може значајно унапредити здравствену дијагностику и терапију. Неуроморфни системи засновани на мемристорима омогућавају напредне методе анализе медицинских слика и препознавања образаца у сложеним биомедицинским подацима. Ови системи могу помоћи лекарима при доношењу прецизнијих дијагноза у краћем временском року.

Једна од иновативних примена мемристор технологије јесте у развоју имплантабилних медицинских уређаја, као што су неуростимулатори и пејсмејкери. Мемристори могу поделити енергетске захтеве ових уређаја, смањујући потребу за честим заменама батерија или пуњењем уређаја. Уз то, ови уређаји могли би имати способност да се прилагођавају индивидуалним потребама пацијента, захваљујући својој способности за самоучење.

Пољопривреда се суочава с великим изазовима у смислу одрживости и ефикасности. Мемристор технологија може допринети решавању ових проблема кроз развој паметних механизма за наводњавање и управљање ресурсима. Системи засновани на мемристорима могу анализирати велику количину података у реалном времену, укључујући влажност земљишта, временске услове, и стање усева, како би оптимизовали коришћење воде и других ресурса.

Поред тога, мемристор технологија омогућава развој аутономних робота који могу обављати пољопривредне активности као што

су сејање, жетва и контрола штеточина. Ови роботи би могли користити напредне алгоритме за самостално учење и адаптацију на различите услове, чиме би значајно увећали ефикасност пољопривредних процеса.

Енергетска индустрија може такође имати велике користи од мемристор технологије. Једна од најперспективнијих примена јесте у развоју паметних мрежа (*smart grids*). Ове мреже могу користити мемристоре за складиштење енергије и управљање њеним протоком на ефикасан начин. Мемристори могу омогућити брзу обраду података и доношење одлука у реалном времену, што је кључно за оптимизацију потрошње енергије и интеграцију обновљивих извора енергије као што су соларни и ветроелектрични системи.

Поред тога, мемристор технологија може играти важну улогу у развоју енергетски ефикасних уређаја и система за складиштење енергије. Велика густина меморијског складиштења и мала потрошња енергије чине мемристоре идеалним за примену у батеријама нове генерације и другим системима за складиштење енергије.

Аутомобилска индустрија се припрема за револуцију с развојем аутономних возила. Мемристор технологија може значајно унапредити могућности ових возила кроз напредне системе обраде података и самосталног учења. Аутономна возила захтевају брзу и тачну обраду великих количина података који долазе од сензора и камера, а мемристори би могли обезбедити значајно већу ефикасност у обради ових података у односу на традиционалне системе рачунара.

Мемристори могу такође допринети развоју енергетски ефикасних система за складиштење енергије у електричним возилима. Смањена

потрошња енергије и повећана густина меморијског складиштења могу побољшати перформансе батерија и продужити време рада возила између пуњења.

Интернет ствари (IoT) све више постаје део свакодневног живота, а мемристор технологија може омогућити значајна побољшања у овој области. Уређаји засновани на мемристорима могу обрађивати податке директно на извору (ивично рачунарство), што смањује зависност од централних сервера и облака и омогућава брже и ефикасније доношење одлука. Примена мемристора у IoT уређајима може обухватати паметне сензоре за праћење околине, управљање енергијом у паметним домовима и развој самосталних робота и дронова. Мемристор технологија је идеална за овакву примену захваљујући својој малој потрошњи енергије и способностима самосталног учења и адаптације.

Иако мемристор технологија нуди многе предности, постоје и изазови у вези са етичким и безбедносним аспектима њене примене. Развој система који могу самостално учити и доносити одлуке намеће питања о одговорности и транспарентности. Постоји потреба за развојем етичких стандарда и регулаторних оквира који ће осигурати да употреба мемристор технологије буде у складу с принципима друштвене одговорности и заштите приватности.

Безбедносни изазови укључују и заштиту система заснованих на мемристорима од злонамерних напада и манипулација. Обезбеђење података и интегритета система мора бити приоритет у развоју и примени мемристор технологије.

Примене мемристор технологије у различитим индустријама имају потенцијал да донесу

значајне иновације и унапреде ефикасност и одрживост различитих система. Без обзира на то да ли је реч о здравству, пољопривреди, енергетици, аутомобилској индустрији или интернету ствари, мемристори пружају основу за развој напредних и ефикасних технолошких решења.

Међутим, успех примене мемристора зависи и од решавања изазова у вези с њиховом поузданошћу, производним трошковима и етичким аспектима. Сарадња академске заједнице, привреде и државе може подстаћи убрзани развој и широко прихватање мемристор технологије, чиме би се Србија позиционирала као лидер у области технолошких иновација.

Закључак

Инвестирање у истраживање и развој ВИ може позиционирати Србију на сам врх технолошких иновација и економског раста. Усмеравањем истраживања на мемристор технологије, као трећу генерацију неуралних мрежа, Република Србија може искористити своје јединствене геополитичке и економске предности да постане значајна на глобалном плану истраживања ВИ.

Улагање у ВИ и мемристор технологије треба да допринесе економском расту, као и добробити друштва у целини. Мемристор технологија треба да доведе до револуције у технологији ВИ и учини рачунарску технологију ефикаснијом, енергетски исплативијом и употребљивијом. Опонашањем синаптичких функција биолошких неуралних мрежа мемристори омогућавају неуроморфно рачунарство и напредну примену ВИ. Примене мемристор технологије у неуроморфним системима и ивич-

Љубиша М. Бојић
Милан М. Чабаркапа

Стратешко улагање у истраживање и развој
мемристор технологије у Републици Србији

но рачунарство омогућавају ефикасно решавање друштвених проблема и побољшање квалитета живота. Према наведеним закључцима у овом раду, будућа истраживања треба усмерити на напредне материјале, хибридне архитектуре, неуроморфне алгоритме и решавање проблема променљивости и поузданости мемристор технологије како би се оствариле све могућности мемристор технологије.

Сарадња између академске заједнице, привреде и државе може подстаћи развој и примену

мемристор технологије. Њен развој и њена примена у системима ВИ у здравству, пољопривреди и ивичном рачунарству, на пример, поред тога што ће допринети добробити друштва, треба даље да усмере истраживање и развој. Стратешким улагањем у истраживање и развој мемристор технологије Србија може искористити трансформативни потенцијал ове технологије.

References/Литература

| 49

- Adhikari, S. P. et al. (2012). Memristor bridge synapse-based neural network and its learning. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, XXIII (9), 1426-1435. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2012.2204770>
- Ambrogio, S. et al. (2018). Equivalent-accuracy accelerated neural-network training using analogue memory. *Nature*, DLVIII (7708), 60-67. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0180-5>
- Auto (2023). *New steps in the development of the legal framework for autonomous driving*. Available at: <http://www.ai.gov.rs/vest/sr/771/novi-koraci-u-razvoju-pravnog-okvira-za-autonomnu-voznju.php>
- Bojic, L. (2022). Metaverse through the prism of power and addiction: What will happen when the virtual world becomes more attractive than reality? *European Journal of Futures Research*, X (1), 22. <https://doi.org/10.1186/s40309-022-00208-4>
- Bojic, L. (2024). AI alignment: Assessing the global impact of recommender systems. *Futures*, CLX, 103383 <https://doi.org/10.1016/j.futures.2024.103383>
- Bojic, L. et al. (2024a). *AI and Energy Consumption: Social Aspects*, 1-4. DOI: 10.23919/SpliTech61897.2024.10612493.
- Chang, T., Jo, S.-H. & Lu, W. (2011). Short-term memory to long-term memory transition in a nanoscale memristor. *ACS Nano*, V (9), 7669-7676. <https://doi.org/10.1021/nn202983n>
- Chua, L. (1971). Memristor-The missing circuit element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, XVIII (5), 507-519. <https://doi.org/10.1109/TCT.1971.1083337>
- Etika (2023). *Adopted ethical guidelines for the development and use of artificial intelligence*. Available at: <https://www.srbija.gov.rs/vest/692988/usvojene-eticke-smernice-za-razvoj-i-upotrebu-vestacke-inteligencije.php>
- IVI (2022). *Artificial Intelligence Research and Development Institutes*. Available at: <https://ivi.ac.rs/>
- Prezioso, M. et al. (2015). Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors. *Nature*, DXXI (7550), 61-64. <https://doi.org/10.1038/nature14441>
- Strategy (2020). *Strategy for the Development of Artificial Intelligence*. Available at: <https://www.srbija.gov.rs/tekst/437277/strategija-razvoja-vestacke-inteligencije.php>

- Strukov, D. B. et al. (2008). The missing memristor found. *Nature*, CDLIII (7191), 80–83. <https://doi.org/10.1038/nature06932>
- Talanov, M., Vallverdu, J., Bojic, L. (2024b). Neuropunk revolution: memristive spinal CPG learning approach. *9th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SPLITECH)*, June 25–28, 2024, Split, Croatia.
- Wang, Z. et al. (2017). Memristors with diffusive dynamics as synaptic emulators for neuromorphic computing. *Nature Materials*, XVI (1), 101–108. <https://doi.org/10.1038/nmat4756>
- Yang, J. J., Strukov, D. B., Stewart, D. R. (2013). Memristive devices for computing. *Nature Nanotechnology*, VIII (1), 13–24, <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.240>

Ljubiša M. Bojić

Institute for Artificial Intelligence Research
and Development of Serbia
Novi Sad (Serbia)

Milan M. Čabarkapa

University of Kragujevac,
Faculty of Engineering Sciences,
Department of Electrical Engineering and Computing
Kragujevac (Serbia)

Strategic Investment in the Research and Development of Memristor Technology in the Republic of Serbia

Summary

The rapid advancement of Artificial Intelligence (AI) has significantly impacted both high technology development and economic and social progress. The Republic of Serbia has been strategically supporting research and development in the field of AI. Given the dramatic dynamic development of AI, the aim of this paper is to identify and describe memristor technology as currently very relevant and attractive, in order to achieve technological innovation, socio-economic benefits, and potentially global breakthroughs. The paper presents an overview of literature to analyze theoretical concepts, current research outcomes in AI, and possible applications of memristors. The analyses indicate that adoption and development of memristor technology in Serbia can position the country as a leader in AI hardware innovation, attracting international partners and fostering a technologically advanced industrial system. Therefore, this paper suggests that future research should focus on overcoming practical challenges in the production of memristors, developing hybrid architectures, and formulating advanced neuromorphic algorithms.

Keywords: memristors, neuromorphic computing, technological innovation, strategic positioning, global breakthrough