

ЛИНЕЙНАЯ ФАЗИРОВАННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЁТКА С МЕМРИСТИВНОЙ ЛИНИЕЙ ЗАДЕРЖКИ

Д.А. Шершов¹, И.А. Сафонов¹, С.М. Фёдоров^{1,2}, А.А. Силонов¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: анализируются возможность интеграции мемристоров в структуру фазированной антенной решётки (ФАР), оценка их влияния на характеристики антенны и демонстрация преимуществ перед традиционными подходами. Актуальность данного процесса обусловлена необходимостью преодоления ограничений классических ФАР. Существующие технологии управления фазой часто требуют сложных схем питания, обладают инерционностью и ограниченной надежностью, особенно в экстремальных условиях. Мемристорные решения, напротив, предлагают высокое быстродействие, низкое энергопотребление и возможность сохранения состояния при отключении питания. Несмотря на растущий интерес к мемристорам в микроэлектронике, их применение в антенных решетках остается малоизученным, что определяет научную новизну исследования. Представлен обзор принципов работы ФАР и ключевых свойств мемристоров, предложена концепция фазированной антенной решётки и описаны методы её моделирования, рассматривается анализ результатов и сравнение с традиционными системами, обсуждаются перспективы внедрения технологии и возможные направления дальнейших исследований. Проведенное исследование вносит вклад в развитие адаптивных антенных систем, сочетающих высокую производительность с миниатюризацией и энергосбережением, что особенно востребовано в спутниковой связи, интернете вещей (IoT) и мобильных сетях пятого поколения (5G) и Beyond

Ключевые слова: мемристор, фазированные антенные решетки (ФАР), антенна, антenna решётка, 2.4 ГГц, патч-антенна, мемристивная линия задержки (МЛЗ)

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» (№ FZGM-2024-0003)

Введение

Современные телекоммуникационные системы, радарные технологии и системы беспроводной связи сталкиваются с возрастающими требованиями к скорости передачи данных, энергоэффективности и адаптивности. Одним из ключевых компонентов, обеспечивающих выполнение этих задач, являются фазированные антенные решетки (ФАР). Эти устройства позволяют динамически формировать и направлять электромагнитный луч без механического перемещения элементов, что достигается за счет управления фазой и амплитудой сигналов в каждом излучателе решетки [1]. Однако традиционные ФАР, основанные на полупроводниковых фазовращателях или микроэлектромеханических системах (MEMS), имеют ряд ограничений, включая высокое энергопотребление, значительные габариты и сложности масштабирования. В этом контексте поиск инновационных решений для управления фазой сигнала становится критически важным.

В последние годы внимание исследователей привлекли мемристоры — нелинейные

элементы памяти, способные изменять свое сопротивление в зависимости от протекавшего через них заряда. Благодаря уникальным свойствам, таким как энергонезависимость, наноразмерные габариты и возможность аналого-вой настройки, мемристоры нашли применение в нейроморфных вычислениях, энергоэффективной электронике и системах хранения данных. Их интеграция в ФАР открывает перспективы для создания компактных, перестраиваемых и энергосберегающих антенных систем. Например, мемристоры могут заменить традиционные фазовращатели, обеспечивая управление задержкой сигнала через изменение сопротивления, что упрощает архитектуру решетки и снижает энергозатраты [2].

Принцип работы ФАР

Фазированная антenna решётка — антenna, которая формирует и направляет луч за счет точного управления фазой сигнала в каждом из множества излучающих элементов. Это обеспечивает беспрецедентную скорость, гибкость и надежность по сравнению с механически сканирующими антеннами, что делает ФАР ключевой технологией в современных радиолокационных и телекоммуникационных системах.

Принцип работы фазированных антенных решеток (ФАР) основан на управлении фазой сигнала в отдельных излучающих элементах для формирования и электронного управления лучом в пространстве без физического перемещения антенны [3].

Структура ФАР

ФАР состоит из множества отдельных излучающих элементов (вибраторов, щелей, патчей и т.д.), расположенных в определенном порядке (линейно, плоски, концентрически). Каждый элемент подключен к своему фазовращателю (ФВ). Фазовращатели управляются системой управления (контроллером). Ключевой принцип – Сигнал от передатчика разделяется и подается на все излучающие элементы. Фазовращатель под управлением контроллера изменяет фазу сигнала, проходящего через каждый элемент на определенную величину ($\Delta\phi$). В определенном направлении (θ) сигналы от всех элементов складываются синфазно (в фазе), усиливая друг друга. Это и есть направление главного луча антенны. В других направлениях сигналы складываются не синфазно (в противофазе или со случайными фазами), ослабляя или гася друг друга. Направление луча (θ) зависит от разности фаз ($\Delta\phi$) между сигналами соседних элементов. Контроллер рассчитывает и устанавливает необходимый сдвиг фаз для каждого элемента, чтобы максимум излучения (луч) был направлен в нужную точку пространства (θ). Чтобы переместить луч в другое направление (θ), система управления мгновенно пересчитывает и устанавливает новые значения фазовых сдвигов для всех элементов. Физическое движение антенны при этом не требуется. Управляя не только фазой, но и амплитудой сигнала в каждом элементе (с помощью аттенюаторов), можно дополнительно формировать:

- Ширину луча – усиление сигналов по краям решетки сужает луч.
- Уровень боковых лепестков – ослабление сигналов по краям решетки снижает нежелательные боковые лепестки диаграммы направленности.
- Форму луча – создавать лучи специальной формы (например, cosec^2 для обзора поверхности).

Принцип работает и в обратную сторону (прием). Сигналы, приходящие с определенного направления (θ), будут суммироваться на выходе решетки с максимальной амплитудой, если фазовращатели настроены на соответствующую разность фаз для этого направления.

Это позволяет электронно «наводить» антенну на источник сигнала [4].

Преимущества ФАР

- Очень высокая скорость сканирования – луч перемещается со скоростью электронных переключений (микросекунды).
- Отсутствие механических частей – повышает надежность, снижает инерционность, позволяет создавать очень большие антенны.
- Гибкость управления лучом.
- Быстрое переключение луча между целями.
- Одновременное сопровождение многих целей несколькими независимыми лучами (МФАР - Многофункциональные ФАР).
- Быстрое изменение формы луча (сканирующий луч, луч сопровождения, луч связи).
- Адаптивное подавление помех.
- Высокая надежность – выход из строя части элементов не приводит к полному отказу антенны, только к некоторой деградации характеристик.
- Потенциально высокая мощность – суммарная мощность передатчика распределяется по многим элементам.

Недостатки ФАР

- Высокая сложность и стоимость – множество элементов, фазовращателей, сложная система управления и питания.
- Ограниченный угол сканирования – как правило, до $\pm 60^\circ$ от нормали к плоскости решетки (из-за роста уровня боковых лепестков и уменьшения эффективной площади антенны).
- Вычислительная сложность – требуется мощный процессор для расчета фазовых распределений в реальном времени.
- Потери в фазовращателях снижают общий КПД антенны.

Применение ФАР

Радиолокация: радиолокационные станции (РЛС) противовоздушной обороны (ПВО) (С-300, С-400, Patriot, Aegis), бортовые РЛС истребителей (AN/APG-77/81 на F-22/F-35), метеорологические РЛС, РЛС космического базирования.

Связь: Спутниковая связь (наземные станции, спутники), системы 5G/6G (базовые станции Massive MIMO), тропосферная связь.

Радиоастрономия: Крупные радиотелескопы (например, ALMA).

Электронная борьба (РЭБ): Системы постановки помех.

Свойства мемристоров

Ключевые свойства мемристоров (резистивных элементов памяти) вытекают из их фундаментального принципа работы — изменения электрического сопротивления (R) под действием протекшего через них заряда (q) и способности «запоминать» это состояние при отключении питания [5, 6]. Вот основные свойства:

- Гистерезис вольтамперной характеристики (BAX) — это главная отличительная черта. Ток через мемристор зависит не только от текущего напряжения, но и от предыстории (величины и направления протекшего заряда). BAX имеет характерную «петлю гистерезиса». При изменении напряжения сопротивление меняется нелинейно и зависит от предыдущего состояния.

- Резистивная память (Memory Resistance) — мемристор может находиться в двух или более стабильных резистивных состояниях (например, высокоомное состояние HRS и низкоомное состояние LRS). Переключение между состояниями происходит при приложении напряжения определенной величины и полярности («запись»). Состояние сохраняется при снятии напряжения («неразрушающее считывание» и энергонезависимость).

- Энергонезависимость — записанное резистивное состояние (HRS или LRS) сохраняется после отключения питания. Это делает мемристоры перспективными для энергонезависимой памяти (ReRAM).

- Аналоговое поведение (плавное переключение) — в отличие от транзисторов в цифровых схемах (вкл/выкл), сопротивление мемристора можно изменять плавно и непрерывно с помощью приложенных импульсов напряжения/тока. Это позволяет реализовать множество промежуточных резистивных состояний (мультиуровневая ячейка памяти).

- Структуры мемристоров (например, металл-диэлектрик-металл) могут быть изготовлены с очень малыми размерами (единицы нанометров).

- Энергоэффективность — переключение между состояниями требует очень малой энергии (порядка фемтоджоулей на бит или даже меньше). Считывание состояния также может быть малопотребляющим.

- Высокая скорость переключения — мемристоры способны переключаться между

состояниями очень быстро (наносекунды и даже пикосекунды).

- Совместимость с комплементарной структурой металл — оксид — полупроводник — технологии изготовления мемристоров часто совместимы со стандартными процессами производства КМОП-интегральных схем, что упрощает их интеграцию в существующие электронные системы.

Исследование и моделирование антенны

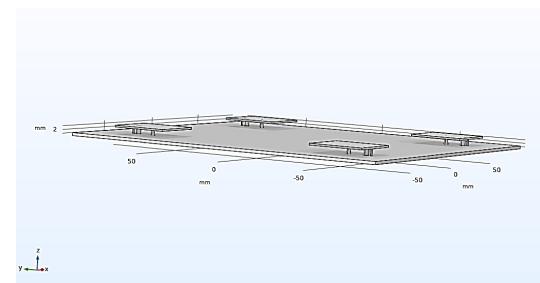
После долгих математических расчетов была представлена следующая структура ФАР (табл. 1, рис. 1-2).

Таблица 1

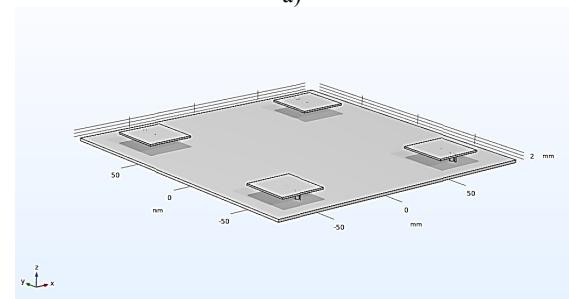
Состав и структура ФАР

Антенна	Материал	Размеры
Патч	Медь	30x30мм
Подложка	Воздух	180x180мм
Заземление	Нержавеющая сталь	180x180мм
Стойки/опоры (цилиндр/конус)	Медь	1.5x5.8мм 1.5(0.5)x5.8 мм
Мемристор (Нижний электрод/основная часть/верхний электрод)	Платина Оксид Гафния (II) Нитрид Титана	0.5x0.0001мм 0.5x0.00003мм 0.5x0.00005мм

Исходя из этих параметров, рабочий диапазон антенны составляет примерно от 2.3 ГГц до 2.5 ГГц, однако основные этапы моделирования будут проводиться для частоты 2.4 ГГц, а именно, изменение диаграммы направленности данной антенны путём изменения тока, поступающего на мемристор.



а)



б)

Рис. 1. Внешний вид антенны



Рис. 2. Структура используемого мемристора

Было проведено три моделирования с разными токами: 100 мкА, 250 мкА, 50 мкА, по ним построены графики диаграммы направленности в 3D- и 2D- представлениях (рис. 3-4).

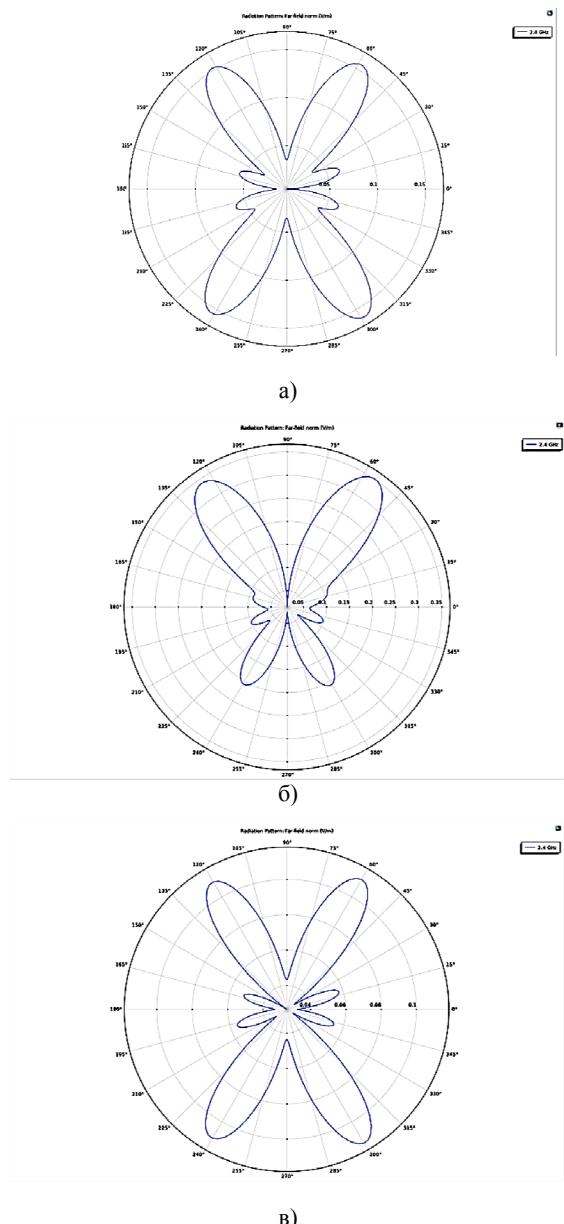


Рис. 3. Графики измерения в дальней зоне для антенны при: а) 100 мкА; б) 250 мкА; в) 50 мкА

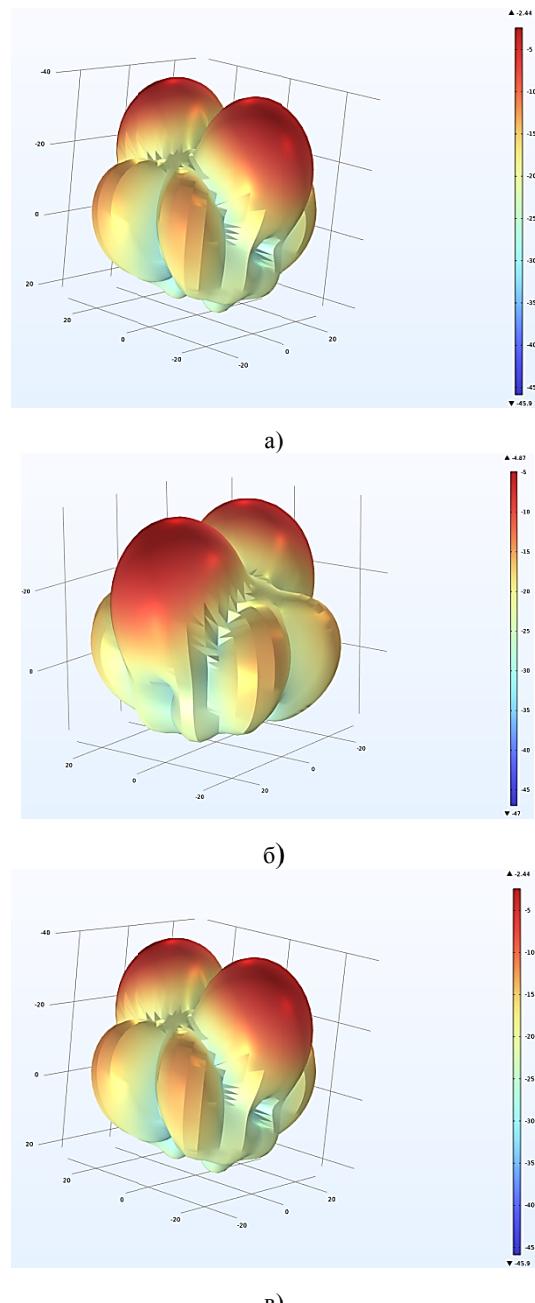


Рис. 4. Графики трёхмерного измерения в дальней зоне для антенны при: а) 100 мкА; б) 250 мкА; в) 50 мкА

Заключение

Фазированные антенные решетки (ФАР) являются ключевой технологией для современных систем связи (5G/6G), радаров и радиоастрономии. Их основное преимущество — электронное управление лучом без механического перемещения антенны. Традиционные ФАР используют активные фазовращатели (на основе PIN-диодов, FET-транзисторов или жидкких кристаллов), которые могут быть сложными, дорогими и потреблять значительную мощность. Предложение использо-

вать мемристивные линии задержки (МЛЗ) в составе четырехэлементной патч-антенной решетки представляет собой инновационный подход к управлению лучом, обладающий уникальными потенциальными преимуществами [7, 8].

Анализ ключевых компонентов:

1. Четырехэлементная патч-антенная решетка:

Преимущества – микрополосковые патч-антенны компактны, легки, имеют низкий профиль, просты в изготовлении и интеграции на печатных платах, совместимы с планарными технологиями. Четыре элемента – это минимальная конфигурация для двумерного сканирования (по азимуту и углу места), обеспечивающая разумный компромисс между сложностью, размером, коэффициентом усиления и управляемостью.

Ограничения – относительно узкая полоса пропускания (характерная для патч-антенн), умеренный коэффициент усиления по сравнению с решетками большего размера. Требует тщательного проектирования геометрии (расстояния между элементами) для минимизации взаимного влияния и подавления побочных лепестков.

2. Мемристивная линия задержки (МЛЗ):

Принцип работы – МЛЗ использует уникальное свойство мемристоров – их способность изменять свое сопротивление (R) под действием приложенного напряжения и «запоминать» последнее состояние даже после снятия напряжения. Изменяя состояние мемристора (High Resistance State - HRS / Low Resistance State - LRS), можно динамически управлять фазовой задержкой сигнала, проходящего через линию.

Реализация в ФАР – МЛЗ интегрируется в линию питания каждого излучающего элемента патч-антенны (или в схему корпоративного/пространственного питания). Прикладывая управляющие импульсы напряжения к мемристорам в линии, можно дискретно или аналогово (в зависимости от типа мемристора и управления) изменять фазовый сдвиг сигнала, подаваемого на каждый антенный элемент.

Ключевые особенности мемристоров для ФАР:

Энергонезависимость – состояние (сопротивление) сохраняется после снятия управляющего напряжения. Энергия тратится только на переключение состояния, а не на его поддержание. Это кардинальное отличие от PIN-диодов/FET, требующих постоянного тока смещения.

Простота управления – переключение требует коротких импульсов напряжения.

Потенциал высокой интеграции – мемристоры совместимы с КМОП-технологиями и могут быть изготовлены в наномасштабе.

Аналоговое поведение (у некоторых типов) – позволяет плавное изменение сопротивления и, следовательно, фазового сдвига.

ФАР с мемристорной линией задержки демонстрирует революционный потенциал в антенной технике, сочетая наносекундную динамику, сверхнизкое энергопотребление. Технология готова к внедрению в системы 5G+/6G, радары с электронным сканированием и компактные спутниковые терминалы.

Литература

1. Antenna Magus, Magus (Pty) Ltd, South Africa, URL: www.antennamagus.com. (дата обращения: 20.07.2025)
2. Memristors: Devices, Models and Applications / P. Mazumder [et al.] // Proc. IEEE. 2012. V. 100. № 6. pp. 1911-1916.
3. T. C. Cheston and J. Frank, “Phased array radar antennas.” Radar Handbook, 1990, Section 7-1. URL: <https://silo.tips/download/chapter-7-phased-array-radar-antennas-theodore-c-cheston-naval-research-laboratory> (дата обращения: 20.07.2025)
4. The Perfect Boundary Approximation Technique facing the big challenge of High Precision Field Computation / B. Krietenstein [et al.] // Proc. of the XIX International Linear Accelerator Conference (LINAC 98), Chicago, USA, 1998. pp. 860-862.
5. Chua L. Memristor—missing circuit element // IEEE Trans. Circuit Theory. 1971. V. 18. № 9. pp. 507-519.
6. The missing memristor found / D. Strukov [et al.] // Nature. 2008. V. 453. pp. 80-83.
7. Memristive Device Fundamentals and Modeling: Applications to Circuits and Systems Simulation / K. Eshraghian [et al.] // Proc. IEEE. 2012. V. 100. № 6. pp. 1991-2007.
8. Stutzman W.L., Thiele G.A. Antenna Theory and Design, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., 1998, pp. 125-135.

Поступила 23.06.2025; принята к публикации 25.08.2025

Информация об авторах

Шершов Даниил Александрович – студент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: shershovdaniil@yandex.ru

Сафонов Иван Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: saff@inbox.ru
Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, 29 б), e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>
Силонов Алексей Анатольевич – преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: silonovalexey@yandex.ru

LINEAR PHASED ANTENNA ARRAY WITH MEMRISTIVE DELAY LINE

D.A. Shershov¹, I.A. Safonov¹, S.M. Fedorov^{1,2}, A.A. Silonov¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: the purpose of this article is to analyze the possibility of integrating memristors into the structure of headlamps, assess their impact on antenna characteristics, and demonstrate their advantages over traditional approaches. The relevance of this work is due to the need to overcome the limitations of classic headlights. Existing phase control technologies often require complex power circuits, have inertia, and limited reliability, especially in extreme conditions. Memristor solutions, on the other hand, offer high performance, low power consumption, and the ability to save state when power is turned off. Despite the growing interest in memristors in microelectronics, their use in antenna arrays remains poorly understood, which determines the scientific novelty of the research. The article is structured as follows: the first section provides an overview of the principles of operation of headlamps and key properties of memristors; the second section proposes the concept of a phased array antenna and describes the methods of its modeling. The third section is devoted to the analysis of the results and comparison with traditional systems; in conclusion, the prospects for the introduction of technology and possible directions for further research are discussed. The conducted research contributes to the development of adaptive antenna systems that combine high performance with miniaturization and energy conservation, which is especially in demand in satellite communications, the Internet of Things (IoT), and fifth-generation (5G) and Beyond mobile networks

Key words: memristor, phased antenna array, antenna, antenna array, 2.4GHz, patch antenna, memristive delay line

Acknowledgments: this work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment «Youth Laboratory» (no. FZGM-2024-0003)

References

1. Antenna Magus, Magus (Pty) Ltd, South Africa, www.antennamagus.com. (date of access: 20.07.2025)
2. Mazumder P. et al. “Memristors: Devices”, *Models and Applications Proc. IEEE*, 2012, vol. 100, no. 6, pp. 1911-1916.
3. Cheston T.C., Frank J. “Phased array radar antennas”, Radar Handbook, 1990, section 7-1, available at: <https://siloh.tips/download/chapter-7-phased-array-radar-antennas-theodore-c-cheston-naval-research-laboratory> (date of access: 20.07.2025)
4. Krietenstein B., Schuhmann R., Thoma P., Weiland T. “The Perfect Boundary Approximation Technique facing the big challenge of High Precision Field Computation”, *Proc. of the XIX International Linear Accelerator Conference (LINAC 98)*, Chicago, USA, 1998, pp. 860-862.
5. Chua L. “Memristor—missing circuit element”, *IEEE Trans. Circuit Theory*, 1971, vol. 18, no. 9, pp. 507-519.
6. Strukov D. et al. “The missing memristor found”, *Nature*, 2008, vol. 453, pp. 80-83.
7. Eshraghian K. et al. “Memristive device fundamentals and modeling: applications to circuits and systems simulation”, *Proc. IEEE*, 2012, vol. 100, no. 6, pp. 1991-2007.
8. Stutzman W.L., Thiele G.A. “Antenna theory and design”, John Wiley & Sons Inc., 1998, pp. 125-135.

Submitted 23.06.2025; revised 25.08.2025

Information about the authors

Daniil A. Shershov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: shershovdaniil@yandex.ru
Ivan A. Safonov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: saff@inbox.ru
Sergey M. Fedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Associate Professor, International Institute of Computer Technologies (29b Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>
Aleksey A. Silonov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20th Anniversary of October str., Voronezh, 394006, Russia), e-mail: silonovalexey@yandex.ru