

**Коков Заур Анатольевич** – Институт физики и математики; e-mail: zak@kbsu.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: +79034959004; кафедра теоретической и экспериментальной физики; к.ф.-м.н.; доцент.

**Leonova Antonina Valerievna** – Southern Federal University; e-mail: leonova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043467991; the department of embedded and radio receiving systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Shpakovskaya Oksana Yuryevna** – e-mail: oshpakovskaya@sfedu.ru; phone: +79612928515; the department of automatic control systems; graduate student.

**Sinyutin Sergey Alekseevich** – e-mail: sasinyutin@sfedu.ru; phone: +79281579965; the department of embedded and radio receiving systems; head of department; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Коков Заур Анатол'евич** – Institute of Physics and Mathematics; e-mail: zak@kbsu.ru; Nalchik, Russia; phone: +79034959004; the department of theoretical and experimental physics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

УДК 621.382.32:621.314

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-220-229

**А.С. Синюкин, Б.Г. Коноплев, А.В. Ковалев****ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ-УМНОЖИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ  
ДЛЯ ПИТАНИЯ МАЛОМОЩНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ПАССИВНЫХ  
МИКРОУСТРОЙСТВ**

*В связи с активным развитием технологий автоматизации и их широким внедрением в логистику, торговлю, промышленность, строительство и другие отрасли экономики все большее распространение за счет своего удобства и доступности получают беспроводные системы. Чаще всего в них используются миниатюрные устройства, способные выполнять операции по идентификации, измерению параметров внешней среды, приему и передаче сигналов. В свою очередь, существует ряд областей, в которых использование батарейных микроустройств ограничено, поскольку замена разрядившейся батареи не всегда осуществима и целесообразна, к тому же стоимость активных устройств относительно высока. В таких приложениях могут применяться пассивные устройства, получающие энергию для работы посредством принимаемого антенной радиочастотного излучения из окружающего пространства. Для массового производства подобных недорогих устройств требуется интегральное исполнение микросхемы, ключевым модулем источника питания которой является выпрямитель напряжения с функцией умножения. В работе представлены результаты разработки интегральных выпрямителей-умножителей напряжения по типовым КМОП-технологиям SM018G 180 нм и HCMOS8D 180 нм в САПР Cadence IC. Рассмотрена степень влияния порогового напряжения и числа каскадов на выходные характеристики умножителей. Показано, что в восьмикаскадном умножителе, построенном по технологии HCMOS8D, уровень выходного напряжения 2 В, необходимый для питания микросхемы беспроводного устройства, достигается при амплитуде входного напряжения 375 мВ, а в умножителе на шестнадцать каскадов - при амплитуде 300 мВ. Предлагаемые выпрямители-умножители могут быть использованы при построении источников питания беспроводных пассивных устройств.*

*Интегральная микросхема; КМОП; мониторинг состояния конструкций; выпрямитель напряжения; каскадирование; подпороговый режим работы.*

A.S. Sinyukin, B.G. Konoplev, A.V. Kovalev

### INTEGRATED VOLTAGE RECTIFIER-MULTIPLIER FOR SUPPLYING LOW-POWER WIRELESS PASSIVE MICRODEVICES

*Concerning automation technologies development and their deployment to logistics, commerce, industry, constructional engineering and other economy sectors, wireless systems get more widespread due to their convenience and availability. Most of the time miniature devices able to perform operations of identification, ambient parameters measure, receive and transmit of signals are used in such systems. In return, there are number of areas, in which battery devices using is limited since a change of a low battery is not always feasible and viable. The passive devices gathering energy for operation through radiofrequency radiation receiving by antenna from the environment could be utilized in such applications. The integrated implementation of microcircuit is required for mass production of suchlike inexpensive devices. The voltage rectifier with multiplication function is the key module of these microcircuits supply unit. Results of the voltage rectifiers-multipliers design using typical CMOS processes CM018G 180 nm and HCMOS8D 180 nm and Cadence IC CAD are presented in the work. Degree of threshold voltage and number of stages influence on the multipliers output characteristics is considered. It is shown, that in eight-stages multiplier constructed with HCMOS8D process, output voltage needed for supply of wireless device microcircuit is reached at input voltage amplitude of 375 mV, and in sixteen-stages multiplier - at 300 mV amplitude. The proposed rectifier-multipliers could be used at power supplies design of the wireless passive devices.*

*Integrated circuit; CMOS; structural health monitoring; voltage rectifier; cascading; subthreshold operation mode.*

**Введение.** Преимуществами интегральных схем, производимых по типовым технологическим процессам, по сравнению с устройствами, изготавливаемыми на основе дискретных компонентов, являются повышенное быстродействие, значительно сниженные массогабаритные характеристики, возможность крупносерийного производства, воспроизводимость, надежность. Стоимость единичной микросхемы также в большинстве случаев оказывается существенно ниже стоимости функционально аналогичного устройства с дискретными компонентами, что достигается за счет автоматизированного или полуавтоматизированного изготовления больших партий микрочипов одной номенклатуры. Именно массовое производство позволяет окупить высокую стоимость разработки интегральной микросхемы и изготовления фотолитографических шаблонов. Актуальным примером современных микросхем, производимых по типовым технологиям КМОП, могут служить компактные приемопередающие радиоустройства, используемые для сбора, хранения, обработки и передачи данных в системах интернета вещей [1], радиочастотной идентификации [2], мониторинга состояния технических сооружений и в сетях беспроводных датчиков [3].

Одним из ключевых классифицирующих признаков для беспроводных миниатюрных радиоустройств, применяемых в промышленности, строительстве, логистике, торговле, выступает тип питания. Активные устройства питаются от встроенной батареи, благодаря чему не зависят от внешних источников энергии, а пассивные посредством приемной антенны собирают энергию радиочастотного излучения из окружающего пространства. Поэтому активные устройства обычно используются в тех приложениях, в которых важна надежность и полная автономность в течение относительно короткого периода, а пассивные, напротив, могут применяться в областях, нуждающихся в компактных, легких и сравнительно недорогих устройствах с длительным сроком службы (медицинские импланты [4], сенсоры, встраиваемые в мосты, здания [5], транспортные средства [6]). Эти качества пассивных беспроводных устройств обеспечивает отсутствие внутреннего источника постоянного питания и крупносерийное производство по типовым КМОП-технологиям.

В качестве аналога батареи в пассивных устройствах можно рассматривать комплекс модулей, в совокупности образующих источник питания. Такой источник позволяет формировать стабильное напряжение питания нужной величины из энергии электромагнитных волн, направляемых от специализированной станции и принимаемых антенной пассивного устройства или собираемых антенной непосредственно из окружающей среды (energy harvesting [2, 3]). Одним из незаменимых модулей источника питания является выпрямитель напряжения, преобразующий переменное напряжение внешнего сигнала в постоянное напряжение интегральной схемы. Поскольку при беспроводной передаче амплитуда входного сигнала во многих случаях может быть невелика, чаще всего выпрямитель расширяется несколькими каскадами, в результате чего напряжение на его выходе достигает более высокого значения, кратного числу каскадов и соответствующего напряжению питания микросхемы. Поэтому такие устройства называют выпрямителями-умножителями напряжения или просто умножителями.

В статье выполнено сравнение нескольких умножителей напряжения, реализованных по различным технологиям, рассмотрены особенности топологического проектирования интегральных умножителей и проведен анализ влияния числа каскадов и параметров МОП-транзисторов на выходные характеристики умножителей.

**Имплементация умножителей напряжения.** Существует несколько схем умножителей напряжения, применяемых в источниках питания пассивных устройств, одной из самых распространенных среди которых в силу своей простоты и возможности каскадирования является умножитель с накачкой заряда [7]. Если такая схема состоит из одного каскада, включающего два выпрямляющих компонента (диода или транзистора в диодном включении) и два конденсатора, то без учета потерь на компонентах умножитель производит умножение входного напряжения в два раза. При увеличении числа каскадов выходное напряжение соизмерно возрастает:

$$V_{out,ideal} = 2 \cdot N \cdot V_a, \quad (1)$$

где  $V_{out,ideal}$  – значение выходного напряжения без учета потерь;  $N$  – число каскадов;  $V_a$  – амплитуда входного напряжения.

В том случае, когда потери на компонентах принимаются во внимание, приближенное выражение для выходного напряжения записывается как

$$V_{out} = 2 \cdot N \cdot (V_a - V_d), \quad (2)$$

где  $V_{out}$  – уровень выходного напряжения,  $V_d$  – падение напряжения на диоде (транзисторе в диодном включении). В случае относительно высоких значений входного напряжения падение напряжения на МОП-транзисторе в диодном включении приблизительно равно его пороговому напряжению  $V_d \approx V_{th}$ .

Выпрямитель-умножитель напряжения для беспроводных пассивных устройств может быть реализован различными способами – на дискретных компонентах, в виде интегральной микросхемы по типовым или более совершенным КМОП-технологиям, и в табл. 1 представлены параметры нескольких реализованных маломощных умножителей, в основу которых положена схема накачки заряда.

Приведенный показатель качества умножения напряжения определялся из отношения уровня достигаемого выходного напряжения к произведению амплитуды входного напряжения на число умножающих каскадов. Из табл. 1 видно, что более совершенные и сложные технологии, такие как «кремний на изоляторе» [8] или КМОП-технологии, в которых реализуются транзисторы с нулевым пороговым напряжением [11, 12], позволяют получать более высокие значения показателя качества. Однако такие технологии менее доступны, и стоимость производства пассивных микроустройств по ним оказывается выше, чем при использовании типовых технологий КМОП [9, 10, 13, 17].

Таблица 1

## Параметры умножителей напряжения различного исполнения

Источник	Реализация	Занимаемая площадь, мм <sup>2</sup>	Показатель качества умножения
[8]	0,5 мкм КНС КМОП	0,043	4,07
[9]	0,13 мкм КМОП	0,720	1,00
[10]	0,18 мкм КМОП	0,060	1,39
[11]	0,35 мкм КМОП, транзисторы с нулевым $V_{th}$	0,096	4,68
[12]	0,18 мкм КМОП, транзисторы с нулевым $V_{th}$	Нет данных	3,69
[13]	0,18 мкм КМОП	0,774	1,71
[14]	Дискретные компоненты	500,0	5,04
[15]	Дискретные компоненты	1440	6,20
[16]	Дискретные компоненты	5400	4,72
[17]*	0,18 мкм КМОП	0,029	2,22

\* – предлагаемый умножитель

В умножителях часто применяются диоды с барьером Шоттки [9, 12], которые отличаются высокой скоростью переключения и малыми падениями напряжения, благодаря чему могут превосходить МОП-транзисторы по выходным характеристикам, однако диоды Шоттки в общем случае несовместимы с обычными КМОП-технологиями и требуют изготовления дополнительных фотошаблонов, что также приводит к увеличению конечной стоимости продукта. В некоторых случаях построение выпрямителей-умножителей на базе дискретных компонентов дает возможность [14-16] достигать более высоких показателей по сравнению с типовыми интегральными устройствами, однако такая имплементация значительно сужает область применения пассивных устройств ввиду достаточно громоздких размеров и практической неосуществимости крупносерийного производства.

При массовом производстве микросхем для беспроводных пассивных устройств, с одной стороны, необходимы возможности, предоставляемые интегральными технологиями, а с другой – требуется рынок сбыта, который обеспечивается благодаря расширению области применения и росту значимости безбатарейных приложений в современных автоматизированных системах. Важно заметить, что параметры и характеристики, ожидаемые от беспроводных микроустройств, достижимы при разработке и изготовлении таких устройств по типовым КМОП-технологиям с проектными нормами порядка 65-180 нм [18], и в то же время использование типовых технологий, доступных и отработанных на российских предприятиях, позволяет значительно снизить стоимость производства.

**Топологическое проектирование умножителей напряжения.** На рис. 1,а показана схема умножителя напряжения, проектирование которого осуществлялось по технологиям SM018G 180 нм [19] (У1) (разработка представлена ранее в [17]) и HCMOS8D 180 нм [18] (У2) в САПР Cadence IC (Virtuoso). В обоих случаях реализовывались восьмикаскадные умножители, конструктивно подобные друг другу: по периметру размещены конденсаторы типа «металл-изолятор-металл», в центре расположены диодно-включенные  $p$ -канальные МОП-транзисторы. Из-за конструктивной и технологической схожести умножителей площади, занимаемые ими на кристалле, оказались сопоставимы: 0,0286 мм<sup>2</sup> (У1) и 0,0225 мм<sup>2</sup> (У2). Од-

нако топология умножителя У2 (рис. 1,б) подверглась некоторым изменениям, в частности были модифицированы геометрическая конфигурация транзисторов, подключение трассировочных шин и переходы между нижними обкладками конденсаторов и контактами транзисторов.

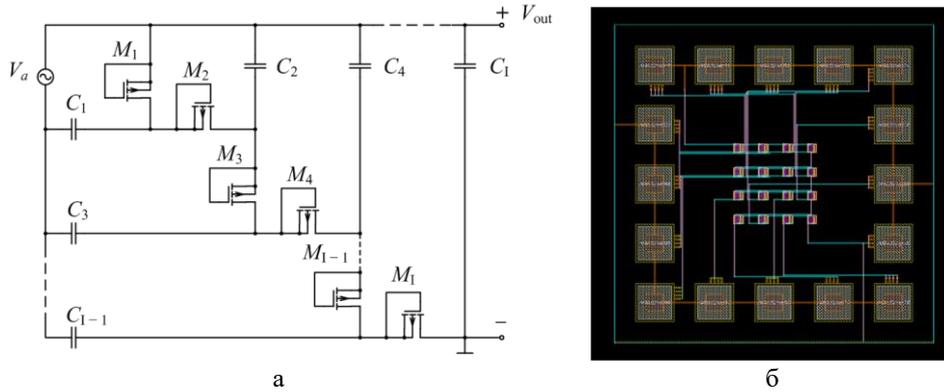


Рис. 1. Схема (а) [17] и топология многокаскадного выпрямителя-умножителя напряжения, реализованная по технологии HCMOS8D 180 нм (У2)

Выбор параметров МОП-транзисторов, которые в представленной схеме находятся в диодном включении, определяет эффективность работы всего устройства, и одним из важнейших параметров является их размер или отношение ширины канала транзистора к его длине  $W/L$ . Поскольку минимальная длина транзистора определяется технологией и для обоих рассматриваемых случаев (У1, У2) составляет 180 нм, важно корректно выбрать значение ширины канала, чтобы соблюсти баланс между его влиянием на величину прямого тока, способствующего процессу зарядки конденсаторов в цепи умножителя, и на величину тока утечки и паразитных емкостей, высокие значения которых приводят к снижению эффективности работы устройства. Согласно результатам предыдущих исследований [20], значение  $W/L$ , близкое к оптимальному, составляет 50, исходя из чего значение ширины канала транзистора в случае У2 было выбрано равным 9 мкм (для У1  $W/L = 35$ ). Использование многопальцевой структуры затвора МОП-транзистора (в У2 у каждого транзистора реализовано три «пальца», в У1 - по одному) позволило добиться большей компактности структуры транзистора и снизить прямое сопротивление за счет увеличения эффективной ширины затвора и более равномерного распределения тока.

На рис. 2 представлено сравнение уровня выходного напряжения (рис. 2,а) и эффективности умножения (рис. 2,б) умножителей У1 и У2 в зависимости от амплитуды входного напряжения, которая рассчитывалась следующим образом [20]:

$$\eta = \frac{V_{out,sim}}{V_{out,ideal}} = \frac{V_{out,sim}}{2 \cdot N \cdot V_a} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $V_{out,sim}$  – значение выходного напряжения, получаемое в результате моделирования.

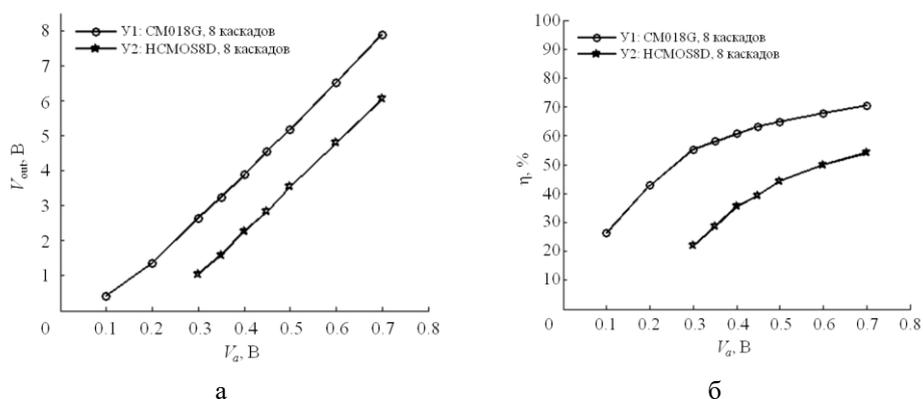


Рис. 2. Зависимость выходного напряжения (а) и эффективности умножения (б) от амплитуды входного напряжения для умножителей, построенных по технологиям SM018G и HCMOS8D при  $N = 8$

Моделирование выполнялось в Cadence Virtuoso ADE, с учетом влияния паразитных составляющих, экстрагированных из топологии. Во всех случаях нагрузочное сопротивление умножителя устанавливалось равным 100 МОм. Из рис. 2 видно, что и по уровню выходного напряжения, и по эффективности умножения умножитель U1 превосходит U2, что можно объяснить меньшим пороговым напряжением МОП-транзисторов в технологии SM018G (0,262 В по сравнению с 0,470 В в HCMOS8D). Процесс выпрямления напряжения начинается в обоих случаях в подпороговой области работы транзисторов, но чувствительность U1 (примерно 100 мВ) оказывается выше чувствительности U2 (порядка 300 мВ). Минимальное значение амплитуды входного напряжения, требуемое для достижения уровня напряжения питания (2 В с учетом возможных потерь при стабилизации), также в случае умножителя U1 ниже – 250 мВ, в то время как для U2 необходимо значение амплитуды 375 мВ. Как видно из рис. 2,б, для обоих умножителей наименьшее значение эффективности умножения составляет 20-25%, тогда как в области относительно высоких значений входного напряжения эффективность U1 достигает более 70%, а эффективность U2 – только 54%.

Более высокие значения выходного напряжения можно получить, увеличив число каскадов. Для этого, а также для снижения минимального значения амплитуды, необходимого для достижения нужного выходного уровня, по технологии HCMOS8D 180 нм построена топология шестнадцатикаскадного умножителя (U3). Благодаря возможности каскадирования схемы накачки заряда, на основе которой происходила разработка конструкции, топология шестнадцатикаскадного устройства была получена посредством объединения двух восьмикаскадных блоков (рис. 3).

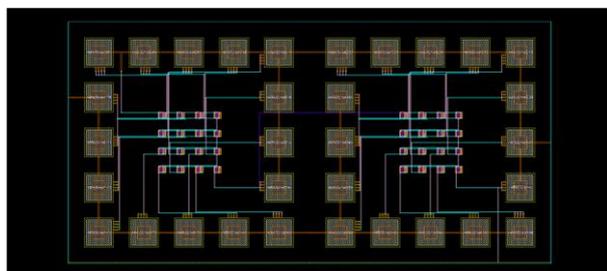


Рис. 3. Топология шестнадцатикаскадного выпрямителя-умножителя (U3)

На рис. 4 представлены результаты моделирования переходных процессов в умножителях на восьми и на шестнадцать каскадах при амплитуде входного напряжения 0,3 В. Как видно из рисунка, умножитель У2 выходит на рабочий режим приблизительно за 200 мкс, тогда как умножителю У3 требуется для этого более 400 мкс.

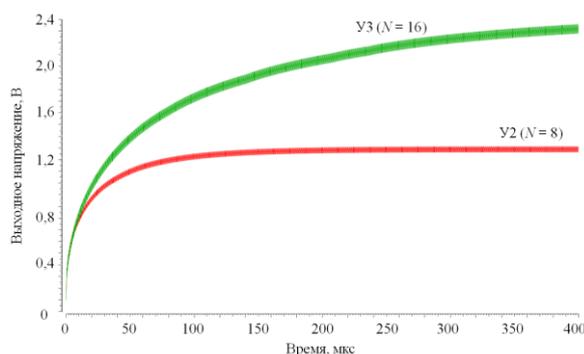


Рис. 4. Повышение уровня выходного напряжения в умножителях У2 и У3, построенных по технологии HCMOS8D 180 нм

Влияние величины амплитуды входного напряжения на уровень выходного напряжения и эффективность умножения выпрямителей-умножителей (У2 и У3), реализованных по технологии HCMOS8D, представлены на рис. 5,а,б. Из рис. 5,а следует, что в случае умножителя У3 ( $N = 16$ ) минимальное значение входной амплитуды, необходимое для работы микросхемы (порядка 2 В) составляет 300 мВ, и поскольку эта величина приблизительно соответствует чувствительности умножителей, реализуемых по технологии HCMOS8D, то в дальнейшем увеличении числа каскадов нет практической необходимости (при условии сохранения требований по выходному напряжению).

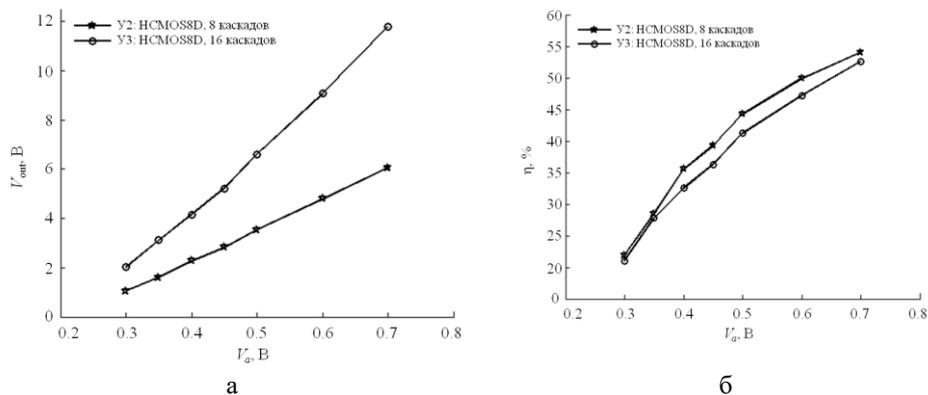


Рис. 5. Зависимости выходного напряжения (а) и эффективности умножения (б) от входной амплитуды для умножителей, построенных по технологии HCMOS8D, при  $N = 8$  и  $N = 16$

Разница между эффективностью умножения напряжения для восьмикаскадного (У2) и шестнадцатикаскадного (У3) умножителей (рис. 5,б) составляет не более 1-3% во всем диапазоне входных напряжений, причем для большего числа каскадов ( $N = 16$ ) эффективность оказывается немного ниже. Сохранение значения

эффективности умножения в широких пределах входной амплитуды независимо от числа каскадов достигается благодаря особому соединению выводов МОП-транзисторов в диодном включении (рис. 1,а) [20], за счет чего существенно снижается негативное влияние эффекта подложки, приводящего к увеличению падений напряжения на выпрямляющих компонентах, снижению прямых токов и росту порогового напряжения.

**Заключение.** В статье представлены результаты разработки и исследования интегральных выпрямителей-умножителей напряжения, предназначенных для использования в беспроводных пассивных микроустройствах в качестве компонента источника питания. Выполнено аналитическое сравнение умножителей различной формы реализации и показано, что интегральное исполнение по типовым технологиям позволяет достигать высоких значений показателя качества при относительно небольших затратах (в условиях крупносерийного производства).

Рассмотрены особенности проектирования умножителей в САПР Cadence, на примере трех построенных умножителей проанализировано влияние, оказываемое величиной входного сигнала, пороговым напряжением МОП-транзисторов, числом каскадов на уровень получаемого выходного напряжения и эффективность умножения напряжения. Показано, что при реализации умножителей по технологии HCMOS8D 180 нм необходимый для работы уровень напряжения 2 В достигается в случае восьмикаскадного умножителя при 375 мВ, а в случае шестнадцатикаскадного - при 300 мВ.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка и исследование методов и средств мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния инженерных объектов на основе искусственного интеллекта» (задание № FENW-2020-0022).

Производство интегральной микросхемы было выполнено за счет средств Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по гос. заданию на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW (FSMR-2023-0008).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Guler U., Jia Y., Ghovanloo M.* A Reconfigurable Passive Voltage Multiplier for Wireless Mobile IoT Applications // IEEE Transactions on Circuits and Systems – II: Express Briefs. – 2020. – Vol. 67, No. 4. – P. 615-619.
2. *Chun A.C.C., Ramiah H., Mekhilef S.* Wide Power Dynamic Range CMOS RF-DC Rectifier for RF Energy Harvesting System: A Review // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 23948-23963.
3. *Li P. et al.* RF Energy Harvesting for Batteryless and Maintenance-Free Condition Monitoring of Railway Tracks // IEEE Internet of Things Journal. – 2021. – Vol. 8, No. 5. – P. 3512-3523.
4. *Le E.K.F.* A Voltage Doubling Passive Rectifier/Regulator Circuit for Biomedical Implants // 2015 IEEE Custom Integrated Circuits Conference. – IEEE, 2015. – P. 1-4.
5. *Tang K. et al.* A Highly Integrated Passive Wireless Sensing System With Synchronized Data Streaming of Multiple Tags // IEEE Internet of Things Journal. – 2022. – Vol. 9, No. 17. – P. 15525-15537.
6. *Malik H, Alzarrad A., Shakshuki E.* Payload Assisted Unmanned Aerial Vehicle Structural Health Monitoring (UAVSHM) for Active Damage Detection // Procedia Computer Science. – 2022. – Vol. 210. – P. 78-85.
7. *Dickson J.F.* On-Chip High-Voltage Generation in MNOS Integrated Circuits Using an Improved Multiplier Technique // IEEE Journal of Solid-state Circuits. – 1976. – Vol. SC-11, No. 3. – P. 374-378.
8. *Curty J.-P. et al.* Remotely Powered Addressable UHF RFID Integrated System // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2005. – Vol. 40, No. 11. – P. 2193-2202.

9. Hong Y. et al. Design of Passive UHF RFID Tag in 130nm CMOS Technology // 2008 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. – IEEE, 2008. – P. 1371-1374.
10. Teh Y.-K. et al. Design and Analysis of UHF Micropower CMOS DTMOST Rectifiers // IEEE Transactions on Circuits and Systems - II: Express Briefs. – 2009. – Vol. 56, No. 2. – P. 122-126.
11. Yao Y. et al. A Fully Integrated 900-MHz Passive RFID Transponder Front End With Novel Zero-Threshold RF-DC Rectifier // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2009. – Vol. 56, № 7. – P.2317-2325.
12. Fahsyar P.N.A., Soin N. A Proposed Low Power Voltage Multiplier for Passive UHF RFID Transponder // 2010 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics. – IEEE, 2010. – P. 334-337.
13. Yao W. et al. Design of a passive UHF RFID tag for the ISO18000-6C protocol // Journal of Semiconductors. – 2011. – Vol. 32, No. 5. – Article 055009. – P. 1-6.
14. Mabrouki A., Latrach M., Lorrain V. High Efficiency Low Power Rectifier Design using Zero Bias Schottky Diodes // 2014 IEEE Faible Tension Faible Consommation. – IEEE, 2014. – P. 1-4.
15. Nicot J., Taris T. Remote RF Powering of Ambient Sensors // 2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. – IEEE, 2016. – P. 760-763.
16. Wang X., Abdelatty O., Mortazawi A. Design of a Wide Dynamic Range Rectifier Array with an Adaptive Power Distribution Technique // 2016 46th European Microwave Conference. – IEEE, 2016. – P. 922-925.
17. Sinyukin A.S., Kovalev A.V. Method for the Iterative Refinement of Parameter Values in Analytical Models of Microelectronic Devices Based on Integrated MOS Transistors // Russian Microelectronics. – 2022. – Vol. 51, No. 6. – P. 398-403.
18. Технологии – Сайт группы компаний «Микрон». – <https://www.mikron.ru/capabilities/technology>.
19. 0.18-micron Technology – TSMC Official Website. – [https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/logic/l\\_018micron](https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/logic/l_018micron).
20. Sinyukin A.S., Konoplev B.G. Integrated CMOS Microwave Power Converter for Passive Wireless Devices // Russian Microelectronics. – 2021. – Vol. 50, No. 3. – P. 219-227.

## REFERENCES

1. Guler U., Jia Y., Ghovanloo M. A Reconfigurable Passive Voltage Multiplier for Wireless Mobile IoT Applications, *IEEE Transactions on Circuits and Systems - II: Express Briefs*, 2020, Vol. 67, No. 4, pp. 615-619.
2. Chun A.C.C., Ramiah H., Mekhilef S. Wide Power Dynamic Range CMOS RF-DC Rectifier for RF Energy Harvesting System: A Review, *IEEE Access*, 2022, Vol. 10, pp. 23948-23963.
3. Li P. et al. RF Energy Harvesting for Batteryless and Maintenance-Free Condition Monitoring of Railway Tracks, *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, Vol. 8, No. 5, pp. 3512-3523.
4. Le E.K.F. A Voltage Doubling Passive Rectifier/Regulator Circuit for Biomedical Implants, *2015 IEEE Custom Integrated Circuits Conference*. IEEE, 2015, pp. 1-4.
5. Tang K. et al. A Highly Integrated Passive Wireless Sensing System With Synchronized Data Streaming of Multiple Tags, *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, Vol. 9, No. 17, pp. 15525-15537.
6. Malik H, Alzarrad A., Shakshuki E. Payload Assisted Unmanned Aerial Vehicle Structural Health Monitoring (UAVSHM) for Active Damage Detection, *Procedia Computer Science*, 2022, Vol. 210, pp. 78-85.
7. Dickson J.F. On-Chip High-Voltage Generation in MNOS Integrated Circuits Using an Improved Multiplier Technique, *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, 1976, Vol. SC-11, No. 3, pp. 374-378.
8. Curty J.-P. et al. Remotely Powered Addressable UHF RFID Integrated System, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2005, Vol. 40, No. 11, pp. 2193-2202.
9. Hong Y. et al. Design of Passive UHF RFID Tag in 130nm CMOS Technology, *2008 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*. IEEE, 2008, pp. 1371-1374.
10. Teh Y.-K. et al. Design and Analysis of UHF Micropower CMOS DTMOST Rectifiers, *IEEE Transactions on Circuits and Systems - II: Express Briefs*, 2009, Vol. 56, No. 2, pp. 122-126.

11. Yao Y. et al. A Fully Integrated 900-MHz Passive RFID Transponder Front End With Novel Zero-Threshold RF-DC Rectifier, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, Vol. 56, No. 7, pp.2317-2325.
12. Fahsyar P.N.A., Soim N. A Proposed Low Power Voltage Multiplier for Passive UHF RFID Transponder, *2010 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics*. IEEE, 2010, pp. 334-337.
13. Yao W. et al. Design of a passive UHF RFID tag for the ISO18000-6C protocol, *Journal of Semiconductors*, 2011, Vol. 32, No. 5, Article 055009, pp. 1-6.
14. Mabrouki A., Latrach M., Lorrain V. High Efficiency Low Power Rectifier Design using Zero Bias Schottky Diodes, *2014 IEEE Faible Tension Faible Consommation*. IEEE, 2014, pp. 1-4.
15. Nicot J., Taris T. Remote RF Powering of Ambient Sensors, *2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*. IEEE, 2016, pp. 760-763.
16. Wang X., Abdelatty O., Mortazawi A. Design of a Wide Dynamic Range Rectifier Array with an Adaptive Power Distribution Technique, *2016 46th European Microwave Conference*. IEEE, 2016, pp. 922-925.
17. Sinyukin A.S., Kovalev A.V. Method for the Iterative Refinement of Parameter Values in Analytical Models of Microelectronic Devices Based on Integrated MOS Transistors, *Russian Microelectronics*, 2022, Vol. 51, No. 6, pp. 398-403.
18. Tekhnologii – Sayt gruppy kompaniy «Mikron» [Technologies – Website of the Micron group of companies]. Available at: <https://www.mikron.ru/capabilities/technology>.
19. 0.18-micron Technology – TSMC Official Website. Available at: [https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/logic/1\\_018micron](https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/logic/1_018micron).
20. Sinyukin A.S., Konoplev B.G. Integrated CMOS Microwave Power Converter for Passive Wireless Devices, *Russian Microelectronics*, 2021, Vol. 50, No. 3, pp. 219-227.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.В. Лосев.

**Синюкин Александр Сергеевич** – Южный федеральный университет, e-mail: [sinyukin@sfedu.ru](mailto:sinyukin@sfedu.ru); г. Таганрог, Россия; к.т.н.; старший научный сотрудник Дизайн-центра микроэлектронной компонентной базы для систем искусственного интеллекта.

**Коноплев Борис Георгиевич** – e-mail: [kgb@sfedu.ru](mailto:kgb@sfedu.ru); д.т.н.; профессор; научный руководитель Института нанотехнологий, электроники и приборостроения.

**Ковалев Андрей Владимирович** – e-mail: [avkovalev@sfedu.ru](mailto:avkovalev@sfedu.ru); д.т.н.; доцент; руководитель Дизайн-центра микроэлектронной компонентной базы для систем искусственного интеллекта.

**Sinyukin Alexander Sergeevich** – Southern Federal University; e-mail: [sinyukin@sfedu.ru](mailto:sinyukin@sfedu.ru); Taganrog, Russia; cand. eng. sc.; senior scientific researcher, Design Center of Microelectronic Component Base for Artificial Intelligence Systems.

**Konoplev Boris Georgievich** – e-mail: [kgb@sfedu.ru](mailto:kgb@sfedu.ru); dr. eng. sc.; professor; scientific advisor, Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering.

**Kovalev Andrey Vladimirovich** – e-mail: [avkovalev@sfedu.ru](mailto:avkovalev@sfedu.ru); dr. eng. sci., associate professor; director, Design Center of Microelectronic Component Base for Artificial Intelligence Systems.