

УДК 621.382.3:621.314

ББК 32.853.1

С38

*Печатается по решению экспертной группы комитета  
по инженерному направлению науки и образования при ученом совете  
Южного федерального университета  
(протокол № 7 от 17 апреля 2019 г.)*

**Рецензенты:**

доктор технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного  
электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

*Е. А. Рындин*

доктор технических наук, доцент Южного федерального университета

*И. Е. Лысенко*

**Синюкин, А. С.**

С38 Интегральные модули питания для беспроводных пассивных мик-  
роустройств : монография / А. С. Синюкин, Б. Г. Коноплев ; Южный  
федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издатель-  
ство Южного федерального университета, 2023. – 163 с.

ISBN 978-5-9275-4450-9

DOI: 10.18522/801314081

В монографии исследуются особенности проектирования интегральных компонентов для модулей питания беспроводных пассивных микроустройств, которые могут применяться в интернете вещей, сетях беспроводных датчиков, системах мониторинга состояния, приложениях радиочастотной идентификации и в других областях. Цель издания планируемой монографии заключается в предоставлении возможности ознакомления широкой аудитории с результатами научных исследований, в частности в рассмотрении оригинальных схем, конструкций, моделей, методик и рекомендаций по проектированию, которые могут найти применение на практике.

Монография может быть полезной для научно-технических работников, инженеров и учащихся, занимающихся разработкой модулей питания на основе интегральной микроэлектроники.

УДК 621.382.3:621.314

ББК 32.853.1

ISBN 978-5-9275-4450-9

© Южный федеральный университет, 2023

© Синюкин А. С., Коноплев Б. Г., 2023

© Оформление. Макет. Издательство

Южного федерального университета, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	7
ВВЕДЕНИЕ .....	9
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ МОДУЛЕЙ ПИТАНИЯ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ ПАССИВНЫХ УСТРОЙСТВ .....	12
1.1. Беспроводная передача и сбор энергии радиочастотного из- лучения .....	12
1.2. Ключевые технологии, основанные на беспроводной пере- даче и сборе энергии радиочастотного излучения .....	15
1.2.1. Беспроводные сенсорные сети .....	15
1.2.2. Интернет вещей .....	16
1.2.3. Технология радиочастотной идентификации .....	17
1.2.4. Основные области применения устройств, основанных на беспроводной передаче и сборе радиочастотной энергии .....	18
1.3. Классификация беспроводных микроустройств .....	20
1.3.1. Классификация беспроводных микроустройств по типу питания .....	20
1.3.2. Классификация беспроводных микроустройств по ча- стоте входного сигнала .....	23
1.3.3. Классификация беспроводных микроустройств по типу реализации .....	25
1.3.4. Классификация беспроводных микроустройств по классу и поколению .....	26
1.4. Структура типового пассивного беспроводного устройства ...	27
1.5. Согласование мощностей и импедансов .....	28
1.6. Выпрямители напряжения в пассивных беспроводных мик- роустройствах .....	30
1.6.1. Компоненты преобразования переменного тока в посто- янный ток в составе выпрямителей напряжения .....	30
1.6.2. Способы снижения порогового напряжения МОП-тран- зисторов .....	31

1.6.3. Особенности использования МОП-транзисторов в качестве выпрямляющих компонентов .....	32
1.6.4. Альтернативные подходы при выборе конструкции и технологии изготовления транзисторов .....	33
1.6.5. Применение конденсаторов в выпрямителях напряжения .....	34
1.6.6. Особенности использования ректенн в составе пассивных беспроводных устройств .....	35
1.7. Конфигурации выпрямителей и умножителей напряжения, применяемые в пассивных беспроводных микроустройствах .....	36
1.7.1. Удвоитель напряжения .....	37
1.7.2. Умножитель напряжения на основе схемы накачки заряда Диксона .....	38
1.7.3. Умножитель напряжения на основе схемы Кокрофта–Уолтона .....	40
1.7.4. Преобразователь напряжения постоянного тока с повышением напряжения .....	41
1.7.5. Выпрямители напряжения с дифференциальным управлением .....	42
1.8. Стабилизаторы напряжения в пассивных беспроводных микроустройствах .....	44
1.8.1. Стабилизаторы с малым падением напряжения .....	45
1.8.2. Стабилизаторы напряжения на основе цифровых компонентов .....	47
Краткие выводы .....	48

РАЗДЕЛ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ С ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ УМНОЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ .....	51
2.1. Исследование однополупериодного выпрямителя напряжения ..	51
2.2. Исследование различных конфигураций выпрямителей напряжения .....	54
2.3. Исследование влияния параметров компонентов умножителей на выходное напряжение типового умножителя на основе схемы Диксона .....	56

2.4. Предлагаемая модификация умножителя напряжения на основе схемы накачки заряда Диксона .....	66
2.5. Результаты моделирования предлагаемого умножителя и сравнение их с результатами моделирования типового умножителя .....	69
2.6. Методика моделирования многокаскадных КМОП-выпрямителей-умножителей в Spice-совместимых программных средах разработки и моделирования электрических схем .....	79
Краткие выводы .....	91

### РАЗДЕЛ 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

#### ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

С ПОВЫШЕНИЕМ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ .....	94
3.1. Анализ существующих моделей выпрямителей и умножителей напряжения .....	94
3.2. Модель умножителя напряжения с типовым соединением выводов МОП-транзисторов в диодном включении .....	96
3.3. Модель предлагаемого умножителя напряжения на основе МОП-транзисторов в диодном включении .....	99
3.4. Сравнение результатов расчетов по полученным моделям умножителей с результатами моделирования в САПР Tanner EDA .....	101
3.5. Протокол и модель накопления и расходования энергии выпрямителем-умножителем напряжения .....	105
3.6. Рекомендации по проектированию многокаскадных КМОП-выпрямителей-умножителей напряжения .....	111
Краткие выводы .....	115

### РАЗДЕЛ 4. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА

#### ЦИФРОВЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

С ФАЗОЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ .....	118
4.1. Анализ стабилизаторов напряжения с малым падением напряжения, применяемых в беспроводных маломощных устройствах .....	118
4.2. Особенности построения цифрового стабилизатора напряжения с фазочастотным управлением .....	120
4.3. Анализ и моделирование предлагаемого цифрового стабилизатора напряжения с фазочастотным управлением .....	128

*Оглавление*

---

4.4. Преимущества предлагаемого цифрового стабилизатора напряжения .....	138
Краткие выводы .....	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	141
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	143