



eISSN 2311-2468  
Том 3, № 11. 2015  
Vol. 3, no. 11. 2015

электронное периодическое издание  
для студентов и аспирантов

# Огарёв-онлайн Ogarev-online

<https://journal.mrsu.ru>



**РЯЗАНОВА Е. А., ПИЩИН О. Н.**  
**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ СИСТЕМ**  
**ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ GSM И LTE**

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы оптимального использования радиочастотного ресурса операторов систем мобильной связи. Анализ проводится для диапазона выделенных частот системы GSM при подключении услуг передачи данных систем четвертого поколения (LTE).

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, концепция WAPECS, технологическая нейтральность, LTE, маска BEM.

**RYAZANOVA E. A., PISHCHIN O. N.**  
**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY**  
**OF GSM AND LTE MOBILE RADIO COMMUNICATION SYSTEMS**

**Abstract.** The issues of optimal use of a radio-frequency resource of mobile telecommunication system operators are considered. An analysis is carried out for the range of assigned frequencies of GSM system in case of connection of data transfer services of the fourth generation systems (LTE).

**Keywords:** electromagnetic compatibility, concept of WAPECS, technological neutrality, LTE, BEM mask.

В настоящее время конвергенция фиксированных и мобильных сетей связи создала ситуацию, когда несколько цифровых технологий стали являться конкурентами в области предоставления услуг на рынке подвижной радиосвязи. Несмотря на изменение политики регулирования использования радиочастотного ресурса и введение гибкого подхода к использованию радиочастотного спектра [1], вопросы качества предоставления услуг в области подвижной радиосвязи не получили облегчения ситуации из-за дефицита частот.

Политика беспроводного доступа для служб электронных коммуникаций (WAPECS – Wireless Access Platforms for Electronic Services) – это политика, которая представляет концепцию гибкого варианта регулирования радиочастотного спектра.

Концепция WAPECS предполагает, что услуги связи могут предоставляться с использованием принципов технологической и сервисной нейтральности на основе требований по избеганию взаимных помех.

По концепции WAPECS под сервисной нейтральностью понимается, то, что любая услуга службы подвижной радиосвязи может быть предоставлена в любом из выбранных из WAPECS-диапазонов частот посредством любого типа сети электросвязи и не должно быть

диапазонов частот, зарезервированных для какого-либо пользователя или использования отдельными службами радиосвязи». Однако, основным условием остается отсутствие помех другим радиослужбам, что относится к вопросам межсистемной электромагнитной совместимости [1].

Согласно принципу технологической нейтральности, частотный диапазон становится более не привязан к технологии, например, GSM. Этот же диапазон становится доступным и иным технологиям, таким как, например, LTE. Но реализация этого принципа может быть усложнена тем, что для соблюдения электромагнитной совместимости внутри самой системы и между различными системами выделены полосы частот для организации защитного интервала не столько между различными службами, сколько это необходимо технологиям для того, чтобы передача данных не создавала помех передаче голоса.

В целях соблюдения ЭМС основным методом реализации технологической нейтральности использования радиочастот является введение понятия «маски излучения передатчика» (BEM – Block Edge Mask) или «краевая маска блока», далее – «маска BEM». В соответствии с Рекомендацией ECC (11)06: «Измерения соответствия маске границы блока для базовых станций» [2] разработаны возможные способы выполнения требований ЭМС с помощью вышеуказанных масок путем использования оборудования с требуемыми спектральными характеристиками (а), либо с использованием защитной полосы частот (б) (см. рис. 1).

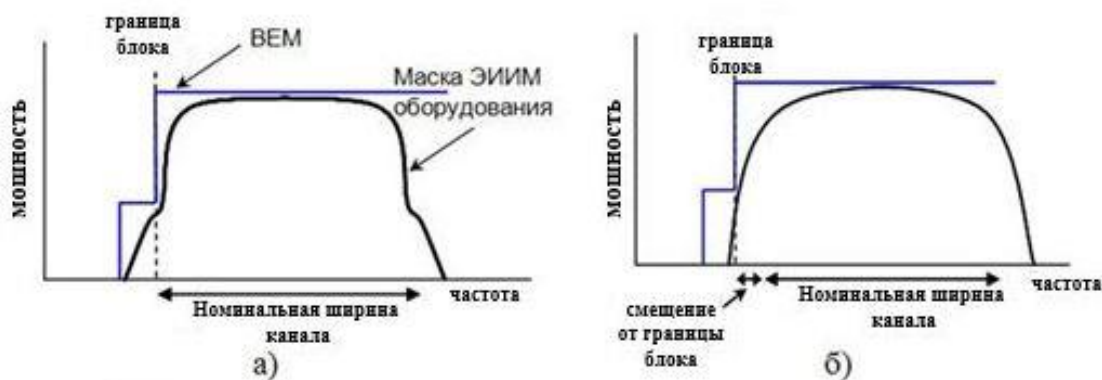


Рис. 1. Способы выполнения ЭМС с помощью маски BEM.

Соблюдение требуемых норм ЭМС возможно также с использованием дополнительных фильтров, т.е. посредством снижения мощности передатчика (рис. 2 в), а также с использованием возможности самостоятельно договориться о снижении требований маски BEM (см. рис. 2 г).

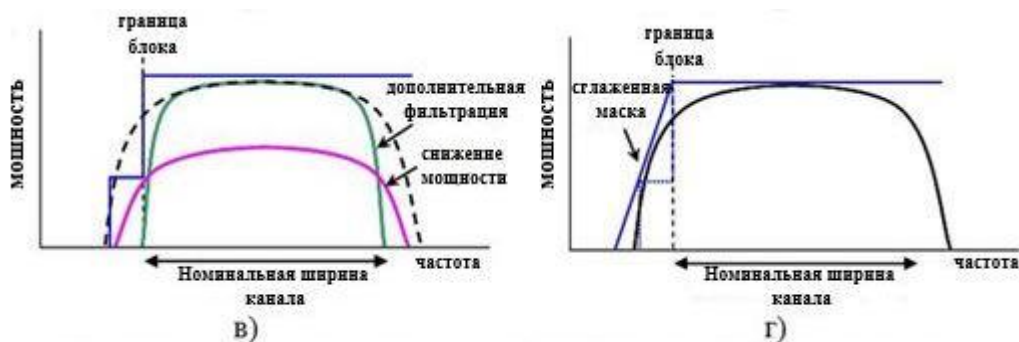


Рис. 2. Способы выполнения ЭМС с помощью маски ВЕМ.

Однако использование масок ВЕМ не гарантирует отсутствия помех на 100%, а только лишь обеспечивает их минимизацию до требуемого уровня и не всегда может решить проблемы с ЭМС.

В таких случаях в лицензии операторов включаются требования по исключению возможных помех приемникам в соседних полосах частот за счет самих же операторов, например, путем установки фильтров на приемники. При переходе к технологической нейтральности контролирующие органы надзора отслеживают только граничные условия (на границе лицензируемой территории) без осуществления детальной экспертизы ЭМС.

Таким образом, использование полос частот на основе маски ВЕМ целесообразно только в тех диапазонах, где отсутствуют РЭС других радиослужб или технологий, особенно там, где присутствуют РЭС военного назначения.

Однако существующий традиционный метод с указанием перечня технологий и условий для них хорошо согласуется с принципом разработки норм частотно-территориальных разнесов, уже использующийся на территории РФ. Это означает, что в РФ уже существуют примеры технологической нейтральности. Теперь практически рассмотрим возможности современных операторов сотовой связи по внедрению LTE с использованием собственных радиочастотных ресурсов.

Общий радиочастотный ресурс имеет следующие ограничения и содержит для GSM 124 несущие и 374 несущие для стандарта GSM-1800 (DCS1800). Этот запас частот, как правило, предназначен для всех конкурирующих операторов систем подвижной радиосвязи, функционирующих на одной и той же территории. Количество операторов, одновременно работающих на лицензионной территории, как правило, 4 (но не более 5). Исходя из уже известных правил ЭМС, утвержденных для системы GSM разнос между частотными каналами составляет 200 кГц. Таким образом, в среднем один оператор может иметь ширину полосы 4-5 МГц (от 20 до 25 частотных каналов) в диапазоне GSM900 и 16-17 МГц (80-85 частотных каналов) в диапазоне DCS-1800.

Условия же применения различных видов радиотехнологий в диапазоне 1800 МГц закреплялись решениями главного радиочастотного центра (или Главного комитета по радиочастотам ГКРЧ). Этими решениями ГКРЧ закрепил условия частотного разнеса между сетями различных технологий для операторов в соседних полосах частот. Выдержка данных условий из решений ГКРЧ №13-22-02 от 11 декабря 2013 г. (см. табл. 1).

Таблица 1

**Минимальный частотный разнос между номиналами частот сетей стандартов GSM и LTE для дуплекса FDD (метод радиодоступа SC-FDMA, OFDMA)**

№ п/п	Класс излучения LTE	Частотный разнос (МГц)
1	1M08 и 1M40	1
2	2M70 и 3M00	1,8
3	4M50 и 5M00	2,7
4	9M00 и 10M0	5,2
5	13M5 и 15M0	7,7
6	18M0 и 20M0	10,2

В соответствии с WAPECS использование диапазона LTE совместно с диапазоном передачи голосовых сообщений должно происходить при соблюдении требований ЭМС.

В настоящее время условия совместимости стандартов разработаны и приняты для GSM900 и UMTS. И в перспективе лишь планируется переход на LTE, но это потребует дополнительного решения Главного радиочастотного центра РФ. Более того, количество номиналов частот в диапазоне GSM900 невелико (см. рис. 3).

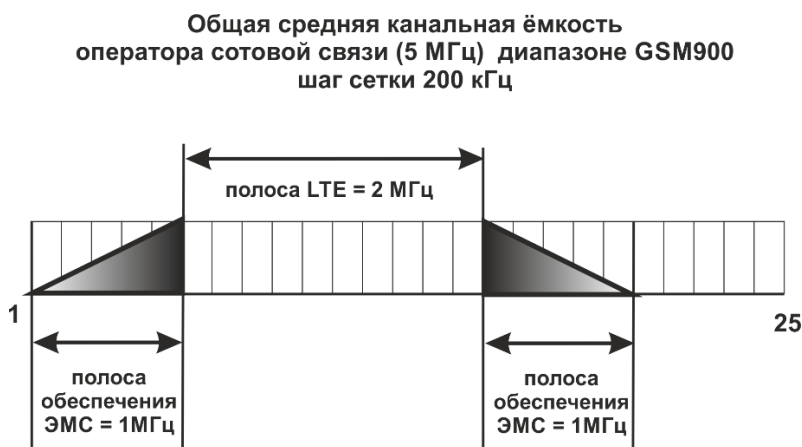


Рис. 3. Емкость полосы частот, занимаемой в GSM стандартом LTE в 2МГц.

И при наличии у оператора 20–25 номиналов частот для планирования сети, согласно табл. 1, используя минимальный разнос частот для класса излучения «1M08 и 1M40», минимум 10 номиналами радиочастот голосового трафика необходимо будет пожертвовать для защитной полосы LTE в целях соблюдения ЭМС. Это решение может стать критическим в плане значительного снижения количества голосовых каналов. Использование диапазона DCS-1800 (см. рис. 4) в качестве частичного использования для системы LTE является наиболее обоснованным.



Рис. 4. Емкость полосы частот, занимаемой в DCS стандартом LTE в 2 МГц.

Из рисунка 4 видно, что использование ресурса диапазона DCS в процентном отношении приносит меньше сложностей по сравнению с диапазоном GSM.

В целях сохранения имеющегося уровня качества в системах подвижной радиосвязи и не снижения одного из основных параметров качества сотовой сети связи – пропускной способности сети – наиболее целесообразным, безусловно, является использование диапазона DCS-1800. Особенно это рекомендация важна для тех операторов мобильной связи, которые не обладают лицензией на 3G технологию (технологию третьего поколения), так как на сегодняшний день только она способна предоставлять голосовые каналы вместо систем 2G диапазонов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пастух С. Ю. Общие сведения о технологической нейтральности использования радиочастот [Электронный ресурс] // НИИР. – Май 2014. – Режим доступа: <http://niir.ru/news/>.
2. ECC Recommendation (11) 06: Block Edge Mask Compliance Measurements for Base Stations. Approved October 2011. Approved Annex 3 – October 2013.

**НИКУЛИН А. В., НИКУЛИН В. В.**

**О ПРОЕКТИРОВАНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ  
«ОСНОВЫ СХЕМОТЕХНИКИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ»**

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы проектирования лабораторной работы «Генераторы гармонических колебаний» по курсу «Основы схемотехники телекоммуникационных устройств» с учетом возможностей лабораторных стендов и сравнения результатов натурного и модельного экспериментов.

**Ключевые слова:** стендовая лабораторная работа, виртуальная лабораторная работа, генератор гармонических колебаний, мост Вина, фазосдвигающая цепочка, фаза, частота.

**NIKULIN A. V., NIKULIN V. V.**

**ON DESIGNING OF LABORATORY WORKS FOR THE COURSE OF  
"FUNDAMENTALS OF CIRCUITRY OF TELECOMMUNICATION DEVICES"**

**Abstract.** The article deals with with the designing of a laboratory work "Generators of Harmonic Oscillations" for the course of "Fundamentals of Circuitry of Telecommunication Devices". The use of laboratory benches and comparison of the results of full-scale and model experiments are considered.

**Keywords:** bench laboratory work, virtual laboratory work, generator of harmonic oscillations, Wien bridge, phase-shifting chain, phase, frequency.

Неотъемлемой частью учебного процесса в вузе при изучении технических дисциплин является лабораторный практикум, задачей которого является формирование у студентов практических навыков работы с оборудованием, получения и обработки экспериментальных данных, умения планировать эксперимент, анализировать и сопоставлять полученные результаты с литературными данными. В настоящее время среди приоритетных задач высшего технического образования выделяются проектирование и использование современных инновационных образовательных технологий. Их актуальность заключается в том, что в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами нового поколения резко возрастает доля интерактивного представления материала с использованием компьютерных технологий [1].

Однако, как показывает практика, не происходит и резкого отказа от стендовых лабораторных работ (СЛР), которые наряду с недостатками имеют и существенные достоинства. К важным недостаткам СЛР можно отнести дороговизну каждого из стендов. Свой отпечаток накладывает тот факт, что электроника в последнее время развивается быстрыми темпами, в связи с чем не всегда удается обеспечивать студентов самым новым

оборудованием. К другим недостаткам можно отнести высокую вероятность поломки самого стенда из-за нарушения технологии проведения опыта.

С другой стороны, не теряют своей актуальности стенды, разработанные еще несколько лет назад с работами по таким базовым предметам как основы электротехники, теория электрических цепей. При работе на них студентам кроме сборки исследуемой схемы для проведения опытов требуется настроить и саму установку, что дает навыки практической работы с электронными приборами и более глубокое понимание принципов работы исследуемых объектов и устройств. К тому же большинство людей лучше усваивают материал, когда происходит осмысленное воспроизведение опыта с помощью реальных устройств, что является неоспоримым преимуществом СЛР.

К преимуществам же виртуального практикума можно отнести отсутствие возможности нанести физические повреждение стенду даже при исследовании аварийных и аномальных режимов работы схем, возможность выполнения заданий вне лабораторных кабинетов, возможность быстрого оформления результатов эксперимента, относительная дешевизна программного обеспечения. Наиболее оптимальным вариантом, с нашей точки зрения, является совмещение плюсов обоих видов лабораторных работ.

С учетом вышесказанного был разработан комплекс лабораторных работ по изучению низкочастотных генераторов гармонических колебаний по курсу «Основы схемотехники телекоммуникационных устройств» для направления подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Задания к этим работам включают в себя расчет, моделирование и анализ схем генераторов в программных пакетах схемных эмуляторов и последующую их экспериментальную проверку на лабораторном стенде. Для исследования были выбраны общеизвестные схемы на основе моста Вина и фазосдвигающей цепочки как с использованием операционного усилителя, так и транзисторный вариант. Эти схемы генераторов были выбраны не случайно: они имеют хорошую повторяемость, просты в реализации, поскольку содержат небольшое количество элементов, что позволяет обойтись имеющимся в комплекте лабораторного стенда набором элементов.

В рамках первого этапа исследования генератора студентам предлагается рассчитать параметры элементов этой схемы. Затем провести моделирование по методике, описанной в [2]. При этом параметры элементов выбраны так, чтобы они соответствовали имеющимся в комплекте стенда, подробно рассмотренного в [3]. Далее необходимо провести практические эксперименты. А на завершающем этапе сравнить результаты расчетов, моделирования, эксперимента и сделать соответствующие выводы.

Исходя из имеющихся в наборе резисторов, величина резистора  $R_1$  выбрана 10 кОм. Тогда в соответствии с тем, что для схемы с генератором с мотом Вина коэффициент



обратной связи  $R2/(R1+R2)$  должен быть примерно равен  $1/3$ , величина резистора  $R2$  равна 20 кОм. Остальные элементы  $R3$  и  $R4$  выбраны величиной 10 кОм, а  $C1$  и  $C2$  – 0,1 мкФ. Исходя из этих номиналов частота колебаний должна быть:

$$f = 1/(2\pi RC) = 1/(2\pi \cdot 10000 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}) = 159 \text{ Гц.}$$

Для виртуального моделирования применяется NI Multisim, но можно использовать и более ранние версии EWB. Модель генератора показана на рис.1.

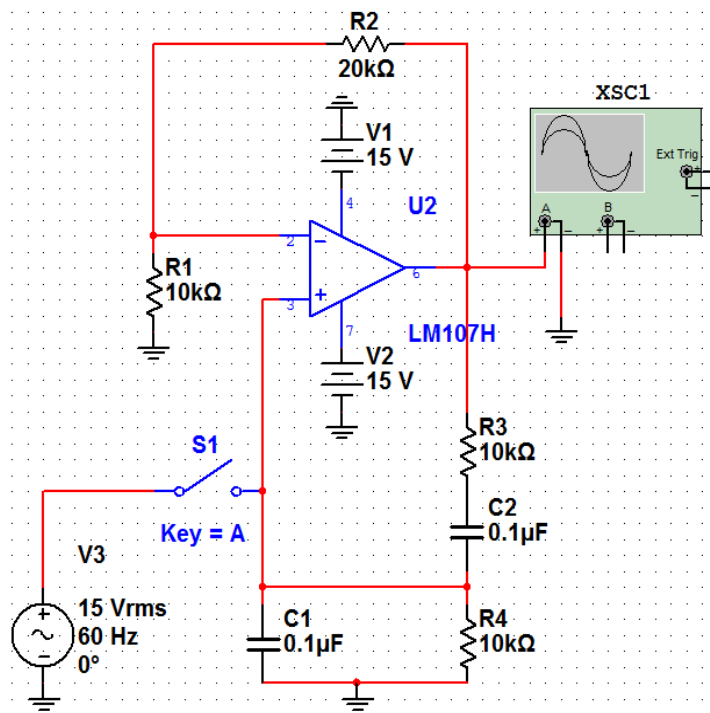


Рис.1. Модель генератора на основе моста Вина с ОУ в NI Multisim.

В отличие от реального генератора в модели отсутствуют помехи, которые приводят к его возбуждению, поэтому в схему добавлена запуская цепочка, состоящая из ключа и генератора синусоидального сигнала.

Сигнал на выходе модели генератора после его принудительного запуска имеет вид, показанный на рис. 2.

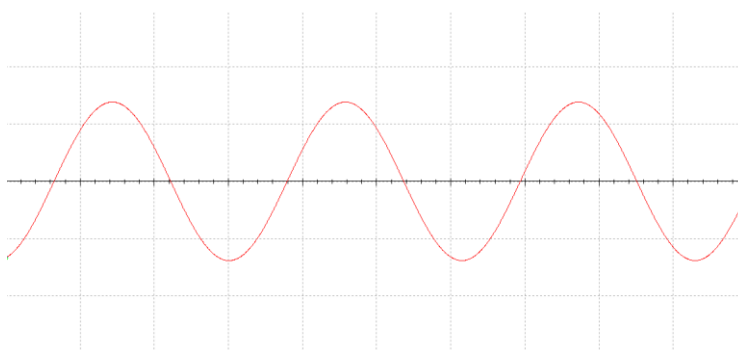


Рис. 2. Сигнал на выходе генератора.

Как видно из рисунка 2, частота колебаний в точности соответствует расчетному значению, а амплитуда составляет 13,8 В.

Исследуемая схема чувствительна к изменениям глубины обратной связи. Увеличение значения сопротивления  $R_2$  всего на 1% приводит к заметным искажениям сигнала на выходе (рис. 3).

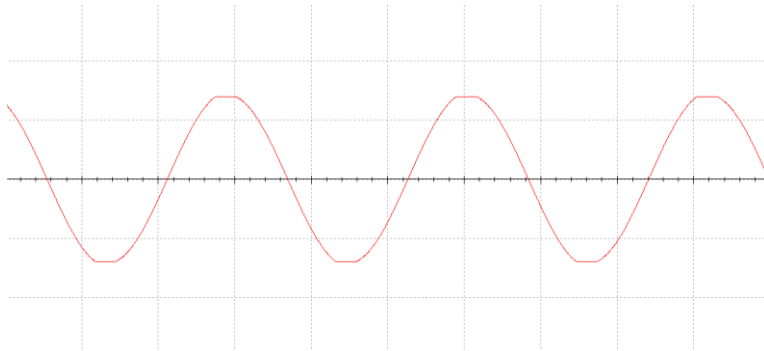


Рис. 3. Искажение выходного сигнала.

Уменьшение же сопротивления на 1% вызывает затухание колебаний (рис. 4).

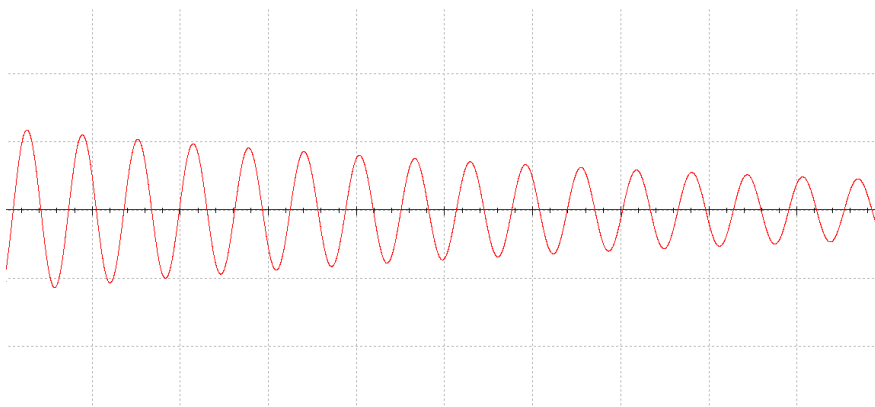


Рис. 4. Затухание колебаний при уменьшении  $R_2$ .

Собранная на лабораторном стенде схема показана на рис. 5.

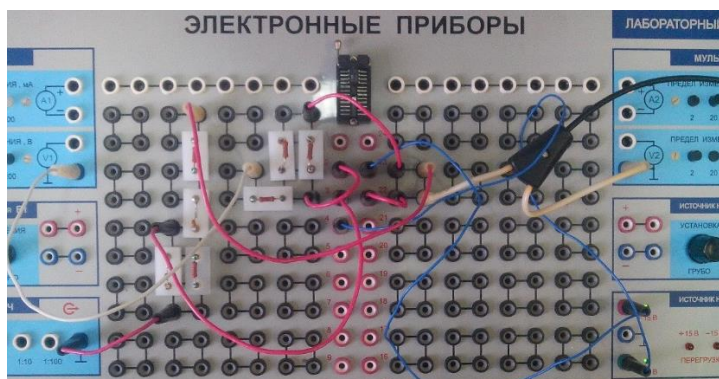


Рис. 5. Генератор с ОУ на основе моста Вина.

Полученная частота собранной на стенде схемы близка к расчетной и равна 140 Гц, амплитуда 0,2 В (рис. 6). На отклонение повлиял разброс параметров реальных элементов.

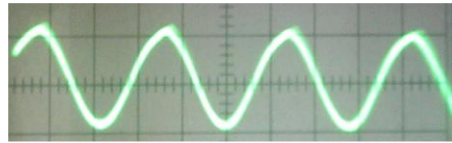


Рис. 6. Оциллограмма выходного сигнала генератора.

На следующем этапе собрали схему с ОУ на основе фазосдвигающей цепочки. Вычисления сильно упрощаются установкой всех резисторов (исключая резистор отрицательной обратной связи) и всех конденсаторов одинаковых величин. На схеме  $R_3=R_4=R_5=R$  и  $C_1=C_2=C_3=C$ , тогда:

$$f = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot 0.1 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{6}} = 650 \text{ Гц.}$$

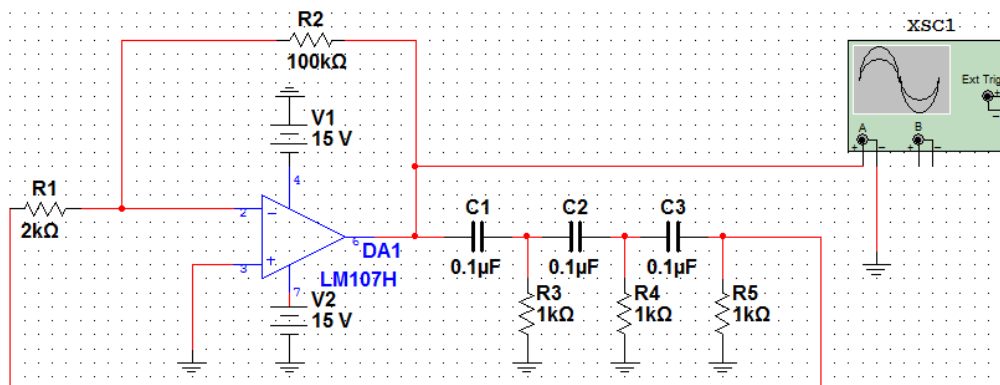


Рис. 7. Модель генератора на основе фазосдвигающей цепочки с ОУ.

Выходной сигнал имеет искажения (рис. 8).

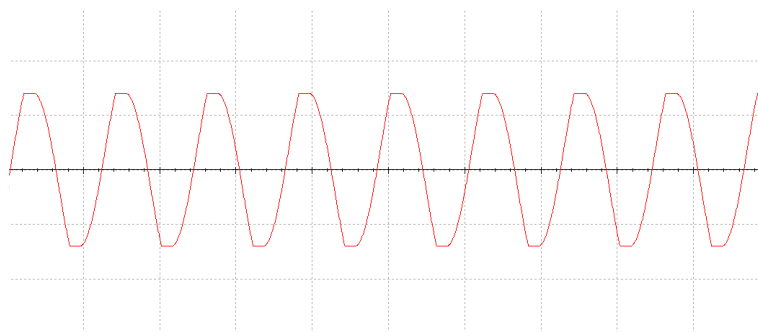


Рис. 8. Сигнал на выходе генератора

Получили схему генератора, работающего на частоте близкой к расчетной: период 1,534 мс, частота 652 Гц.

На рисунке 9 показана собранная на стенде схема генератора на основе фазосдвигающей цепочки с ОУ.

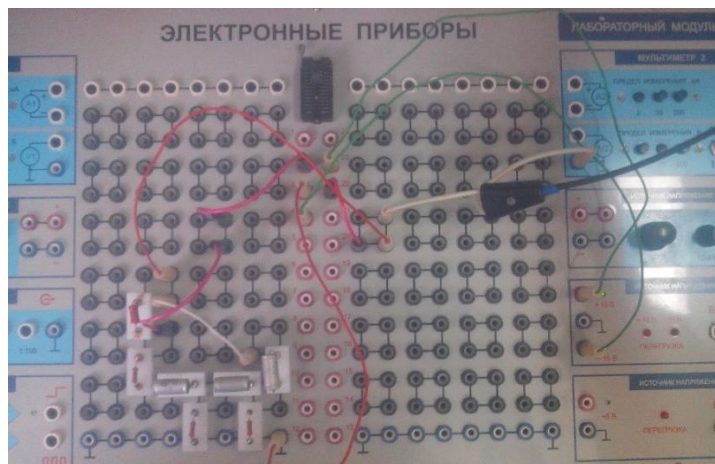


Рис. 9. Генератор с ОУ на основе фазосдвигающей цепочки.

На осциллограмме (рис. 10) видно, что сигнал имеет такие же искажения, как и на модели.

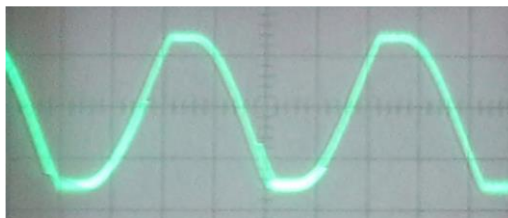


Рис. 10. Осциллограмма сигнала генератора на основе фазосдвигающей цепочки с ОУ

Схема по сравнению с предыдущей имеет большее количество элементов, что привело к большему отклонению частоты от расчетного значения, чем в схеме на основе моста Вина. Полученная частота реального моделирования равна 610 Гц, отклонение от расчетного значения составило 6%, что является вполне допустимым.

На последнем этапе лабораторной работы по аналогичной методике выполняется изучение этих же схем генераторов, но в качестве усилительного элемента используется транзистор. В качестве транзистора для сборки на стенде выбран КТ640, а для моделирования – аналог из библиотеки Multisim – 2N1711.

Отклонение частоты, полученной в эксперименте, на 7% от расчетного значения является допустимым.

Использование лабораторных стендов совместно с виртуальным моделированием повышает уровень качества подготовки студентов. Приобретенные навыки работы с реальными приборами и виртуальными моделями способствуют становлению профессионализма будущего специалиста.

Рассмотренные в работе схемы достаточно просты, позволяют обойтись небольшим количеством элементов. Номиналы элементов выбраны таким образом, чтобы обойтись комплектом, имеющимся в лабораторном стенде.

Схемы имеют хорошую повторяемость, и получаемые результаты мало зависят от расположения элементов при сборке на монтажном поле.

Отклонение результатов эксперимента и модели от расчетных не превышает 10%. На отклонение частоты в схеме, собранной на лабораторном стенде влияют характеристики и разброс параметров реальных элементов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровин В. С., Никулин В. В. Роль виртуальных лабораторных работ в повышении качества подготовки бакалавров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» // Интеграция образования. – 2014. – № 1 (74). – С. 109–115.
2. Никулин В. В., Шишов О. В. Моделирование и расчет типовых узлов аналоговой схемотехники: учебное пособие. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006. – 120 с.
3. Никулин В. В., Дубровин В. С. Применение операционных усилителей. Лабораторный практикум. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. 2010. – 48 с.

**ПАСЮК А. О., БЕРКО Г. А., ГАЛИЧ С. А., СЕМЕНОВ Е. С., ТЮХТЯЕВ Д. А.**

## **ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА PESQ**

### **ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ РЕЧИ ПО IP-СЕТЯМ**

**Аннотация.** Дается описание субъективных и объективных оценок качества речи. Приводятся результаты исследования качества речи для различных кодеков на основе алгоритма PESQ.

**Ключевые слова:** оценка качества, PESQ, IP-телефония.

**PASYUK A. O., BERKO G. A., GALICH S. A., SEMENOV E. S., TYUKHTYAEV D. A.**

## **APPLICATION OF THE PESQ ALGORITHM**

### **FOR SPEECH QUALITY ESTIMATION IN IP NETWORKS**

**Abstract.** The article considers the subjective and objective scores of the speech quality. The results of a study of the speech quality for different codecs based on the PESQ algorithm are presented.

**Keywords:** quality estimation, PESQ, VoIP.

Обеспечение качества обслуживания (QoS) в сетях передачи данных сегодня – одна из самых актуальных практических задач, особенно для приложений IP-телефонии, стремительно вытесняющих традиционную телефонию с рынка телекоммуникационных услуг. Параметрами, влияющими на качество передачи речи через IP-сети, являются задержка, тип кодека, потери пакетов, а также джиттер (вариации задержки пакетов). К параметрам, связанным с оконечным оборудованием, можно отнести тип кодека и задержку. Задержка в терминале обусловлена затратами времени на алгоритмическую обработку кодеком, аналого-цифровое преобразование, а также пакетизацию. К параметрам, которые связаны с сетью передачи данных, относятся потери пакетов, задержка и джиттер. В свою очередь, задержка при передаче по IP-сети складывается из задержки на распространение (которая зависит от расстояния между терминалами) и задержки, вызванной обработкой в очередях промежуточных устройств сети (коммутаторов и маршрутизаторов).

В настоящее время QoS не в состоянии решить некоторые из проблем при передаче речи по IP-сети, такие как задержка на распространение, задержка обработки кодеком, задержка на осуществление выборки и на преобразование в цифровую форму.

Голосовые приложения чувствительнее любых других к потерям пакетов и требуют тщательного планирования, чтобы гарантировать соответствие соглашению уровня

обслуживания (Service Level Agreement – SLA). Одним из элементов такого планирования является выявление «приемлемого» объема задержки. Некоторыми из составляющих задержки можно управлять и настраивать их, в то время как остальные обусловлены физическими явлениями. В таблице 1 показаны элементы, составляющие управляемую часть задержки [1, с. 181].

Таблица 1

**Составляющие задержки**

	Фиксированная задержка	Переменная задержка
Задержка кодека G.729	5 мс	
Задержка кодека G.729 (по 10 мс на кадр)	20 мс	
Задержка очереди в магистральной 64 кбит/с		6 мс
Задержка на сериализацию в магистральной 64 кбит/с	3 мс	
Задержка на распространение (закрытые линии)	32 мс	
Буфер компенсации джиттера		2-200 мс

Рекомендация G.114 сектора стандартизации ITU-T определяет качество голоса как «хорошее» при общей задержке не большей, чем 150 мс.

При разработке голосового приложения или терминала IP-телефонии необходимо учитывать все вышеперечисленные факторы, влияющие на качество речи. Соответственно, возникает актуальный вопрос – каким образом можно оценить влияние того или иного критического параметра IP-сети на качество речи при использовании конкретного приложения или устройства?

До недавнего времени в течение многих лет использовались т.н. субъективные оценки как единственный подход к оценке качества в телефонных сетях. Такой подход был предложен в рекомендациях МСЭ Р.800, в его основе лежали субъективные оценки качества речи (например, «отличное качество», «хорошее качество», «приемлемое качество» и т.д.). Наиболее широко используемая методика субъективной оценки качества описана в Рекомендации МСЭ Р.800 и известна как методика MOS. В соответствии с ней качество речи, получаемое при прохождении сигнала от говорящего (источник) через систему связи к слушающему (приемник), оценивается как арифметическое среднее от всех оценок, выставяемых экспертами после прослушивания тестируемого тракта передачи [2].

Но субъективные оценки было сложно точно соотнести с сетевыми характеристиками, которые используются при проектировании и эксплуатации сетей. Поэтому в 1998 г. МСЭ стандартизовал подход, основанный на объективных оценках

качества обслуживания, который позволяет описать показатели качества при передаче речи в пакетной форме (Рекомендация МСЭ G.107).

В основу объективного метода положена так называемая *E*-модель, которая, связана с измерением характеристик терминалов и сетей. После создания *E*-модели было проведено большое число испытаний, в которых менялся уровень воздействия искажающих сетевых факторов. Данные этих тестов были использованы в *E*-модели для вычисления объективных оценок. Результатом вычислений в соответствии с *E*-моделью является число, называемое *R*-фактором («коэффициентом рейтинга»).

*E*-модель является многокритериальной оценкой качества передаваемой речи в сетях IP и *R*-фактор определяется в соответствии с ней в диапазоне значений от 0 до 100, где 100 соответствует самому высокому уровню качества. Но теоретическое значение *R*-фактора уменьшается от 100 до 93,2, что соответствует оценке MOS, равной 4,4.

На практике величина *R*-фактора меняется от 0 до 93,2, что соответствует изменению оценок MOS от 1 до 4,4. Значение *R*-фактора определяется по следующей формуле:

$$R = Ro - Is - Id - Ie + A,$$

где:  $Ro = 93,2$  — исходное значение *R*-фактора;

$Is$  — искажения, вносимые кодеками и шумами в канале;

$Id$  — искажения за счет суммарной сквозной задержки («из конца в конец») в сети;

$Ie$  — искажения, вносимые оборудованием, включая и потери пакетов;

$A$  — так называемый фактор преимущества [4].

Большинство методов основано на сравнении оригинального (эталонного) и кодированного (искаженного) сигналов с помощью психоакустической модели. Оценивается степень заметности искажений в кодированном сигнале для человека. Психоакустическая модель — это модель, преобразующая звуковой сигнал в его внутреннее представление с точки зрения слухового аппарата человека, которое и сравнивается с внутренним представлением эталонного сигнала.

Наиболее распространенными является оценка PESQ, определенная в рекомендации МСЭ-T P.862. Она представляет собой объективный метод определения качества речевой связи в телефонных системах, который прогнозирует результаты субъективной оценки качества этого вида связи слушателями-экспертами. Для определения качества передачи речи в PESQ предусмотрено сравнение входного, или эталонного, сигнала с его искаженной версией на выходе системы связи [3].

Результатом сравнения входного и выходного сигналов является оценка качества связи, которая аналогична усредненной субъективной оценке MOS. Далее полученные



результаты оценки PESQ калибруются с использованием огромной базы данных оценок MOS.

Процесс определения качества передачи речи с алгоритмом PESQ схематично изображен на рисунке 1.

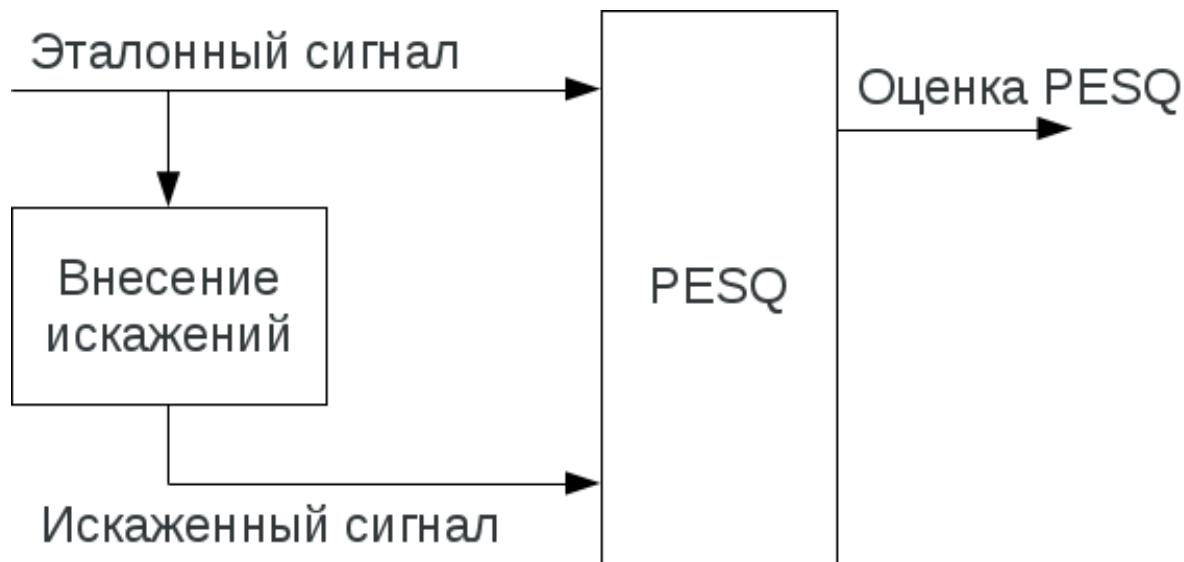


Рис. 1. Сравнение эталонного сигнала с его искаженной версией.

Результатом сравнения эталонного и искаженного сигналов является оценка качества связи, которая аналогична усредненной субъективной оценке MOS. Оценки PESQ калибруются с использованием базы данных оценок MOS. PESQ возможно использовать как для определения качества сквозной передачи речи, так и для оценки влияния на качество связи отдельных элементов сетевого оборудования, включая кодеки.

В статье описаны результаты эксперимента, в котором для оценки качества речи применялся алгоритм PESQ.

Для проведения эксперимента был собран тестовый стенд, состоящий из двух ПК, служащих оконечными терминалами, промежуточного сервера WanEM [5], являющегося эмулятором каналов глобальной сети и маршрутизатора (см. рис. 2). При совершении VoIP-звонка на обоих терминалах производилась одновременная запись голосовых сообщений (на ПК «звонящего» через микрофонный вход – запись эталонного сигнала, на ПК «принимающего звонок» с выхода звуковой платы – запись искаженного сигнала). Далее записанные файлы попарно обрабатывались алгоритмом PESQ. Обработка производилась на основе метода, предложенного в [6].

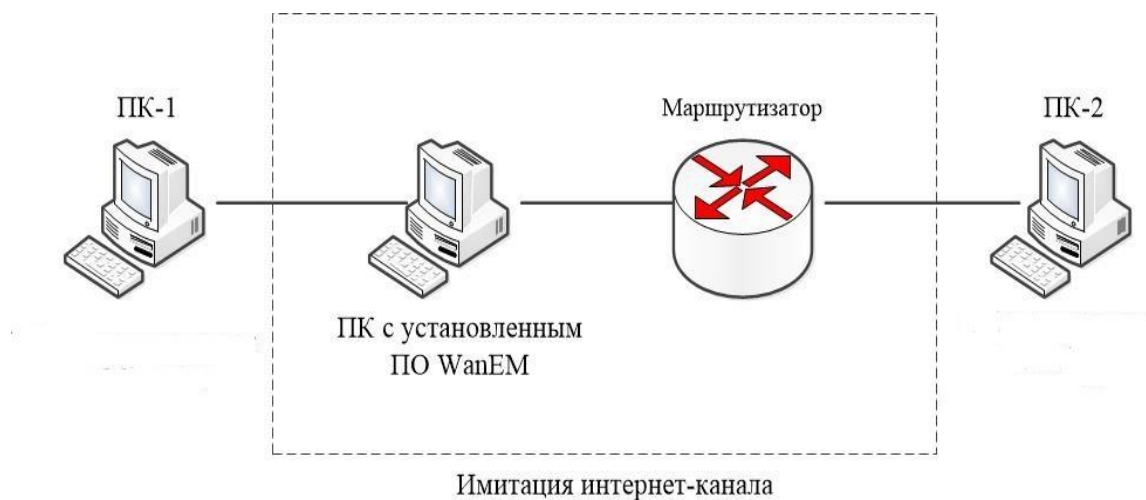


Рис. 2. Схема тестового стенда.

На выходе получается массив из двух элементов:

- 1) PESQMOS;
- 2) MOS-LQO.

MOS (Mean Opinion Score) – среднее значение оценок, т. е. значение на заранее определенной шкале, по которой субъекты оценивают качественные показатели работы телефонной системы передачи, используемой для разговора или для слушания речевого материала.

Кроме субъективного мнения, сокращение MOS также используется для оценок, которые исходят из объективных моделей или моделей планирования сети. Для разграничения области применения вместе с сокращением MOS рекомендуется использовать следующие обозначения: N – узкополосный, W – широкополосный, LQ – listening quality (качество при слушании), CQ – conversational quality (качество при разговоре), S – subjective (субъективный), O – objective (объективный), а E – estimated (плановый).

MOS-LQO – данная оценка вычисляется посредством объективной модели, целью которой является прогнозирование качества испытательной ситуации «только слушание». Результатами объективных испытаний, выполненных при помощи модели, являются показатели MOS-LQO. Процесс обработки сигналов при использовании алгоритма PESQ показан на рисунке 3.

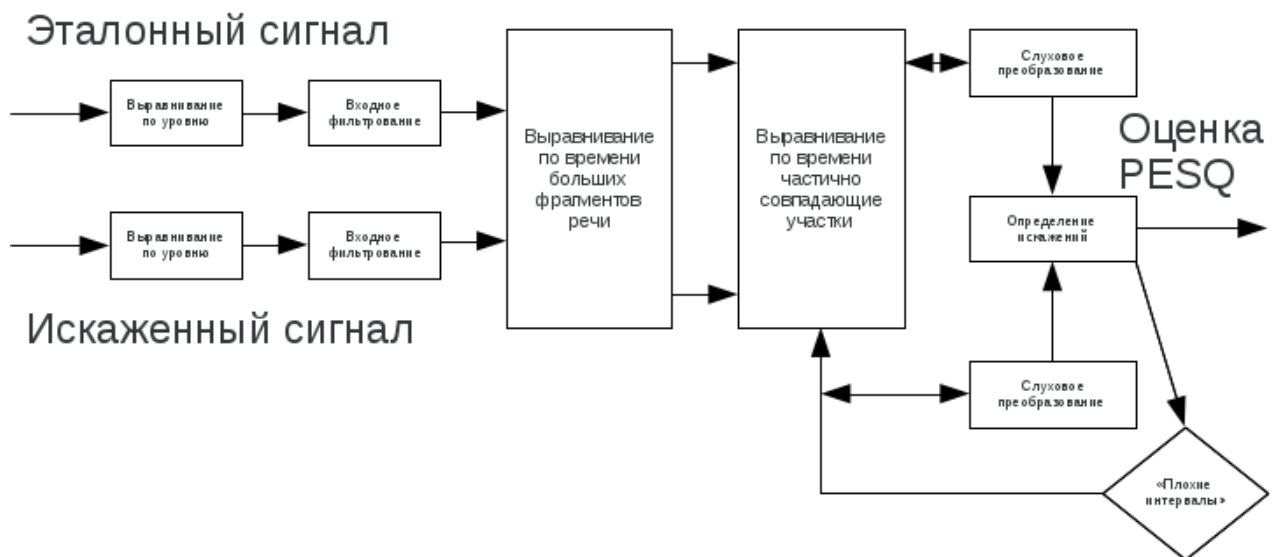


Рис. 3. Процесс обработки сигналов в PESQ.

В процессе эксперимента изменялись различные параметры канала передачи данных между двумя терминалами, а именно процент потери пакетов и джиттер. Исследование проводилось для трех типов кодеков: G.711, G.729, GSM. Результаты исследования представлены на рисунках 4–7.

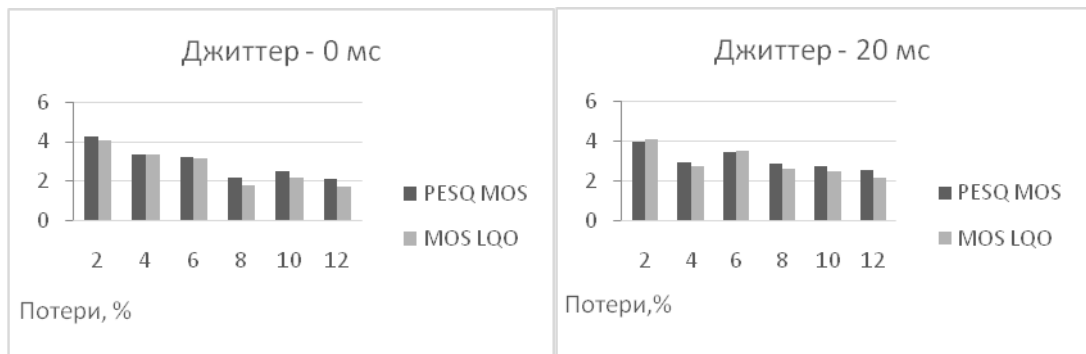


Рис. 4. Оценки для кодека G.711

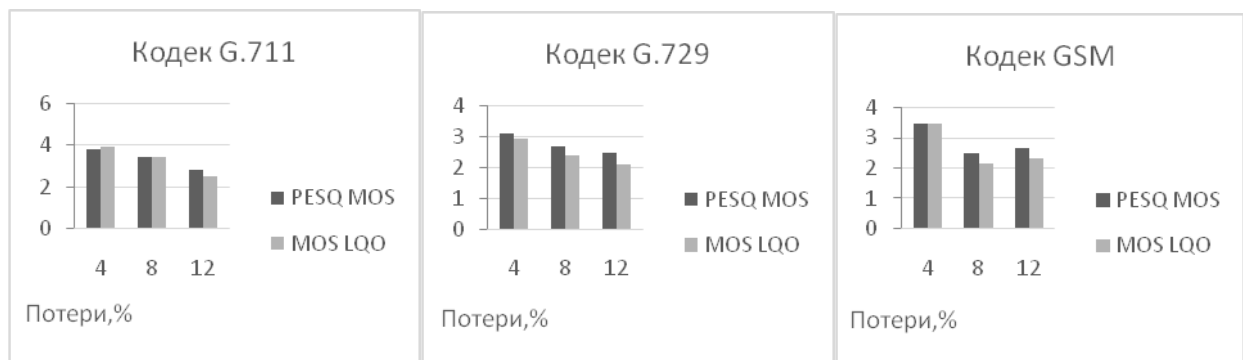


Рис. 5. Оценки для различных типов кодеков при джиттере 50 мс.

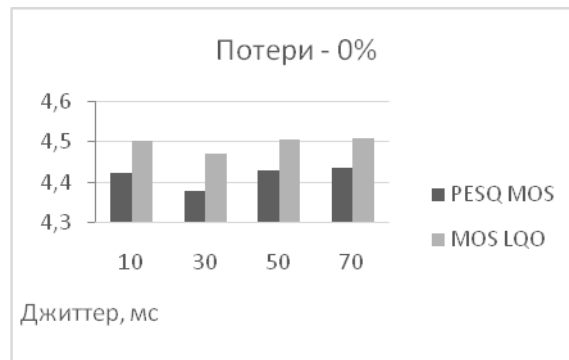


Рис. 6. Оценки для кодека G.711 при 0% потерь пакетов.

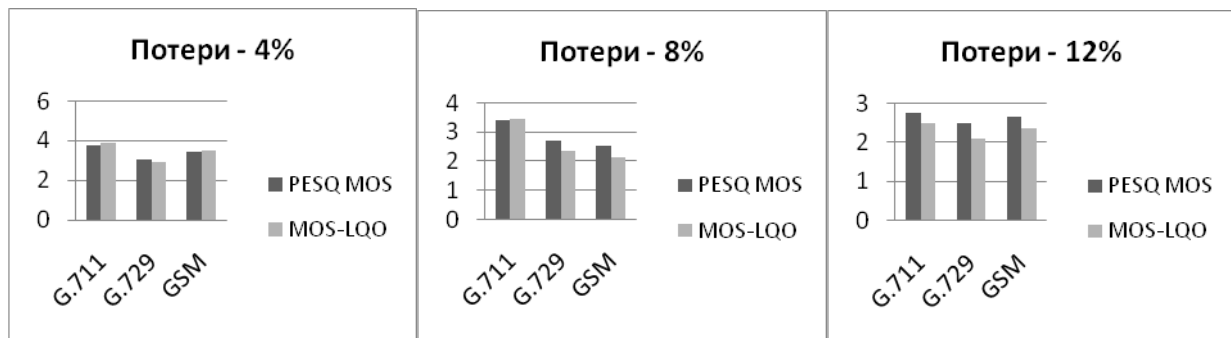


Рис. 7. Оценки для различных типов кодеков при значениях процента потерь пакетов – 4%, 8%, 12%.

На основании приведенных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Качество речи при использовании кодека G.711 существенно зависит от потери пакетов при передаче по IP-сети. Так, на графике рисунка 4 можно увидеть, что оценка PESQ меняется в зависимости от процента потерь пакетов от 4,256 до 2,062 при нулевом джиттере, а при внесении джиттера 20 мс замечается незначительное ухудшение оценки PESQ для кодека G.711.
2. При внесении джиттера 50 мс, на графике 5 для кодека G.711, можно увидеть, что при больших процентах потерь джиттер не оказывает значительного влияния на качество речи для кодека. Также можно сказать, что при одинаковых условиях сети качество речи для кодеков G.729 и GSM ухудшается по сравнению с кодом G.711 в среднем на 17 и 11% соответственно.
3. Анализируя график на рисунке 6, можно сделать окончательный вывод о том, что джиттер незначительно влияет на качество речи для кодека G.711.
4. Из графиков на рисунке 7 следует, что в условиях больших потерь пакетов в IP-сети наилучшее качество речи обеспечивают кодеки G.711 и GSM (по сравнению с G.729).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дэвидсон Д., Питерс Д., Бхатия М. и др. Основы передачи голосовых данных по сетям IP / пер. с англ. – 2-е изд. – М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2007. – 400 с.
2. МСЭ-Т Р.800. Методы для объективной и субъективной оценки качества // Сектор стандартизации электросвязи МСЭ. – 2006.
3. МСЭ-Т Р.862. Оценка восприятия качества речи (PESQ): Объективный метод для сквозной оценки качества речи узкополосных телефонных сетей и речевые кодеки. // Сектор стандартизации электросвязи МСЭ. – 2003.
4. Яновский Г. Г. Оценка качества передачи речи в сетях IP // Вестник связи. – 2008. – № 2. – С. 91–94.
5. WanEM. The Wide Area Network emulator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://wanem.sourceforge.net>.
6. Woichicki K. PESQ MATLAB Wrapper [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33820-pesq-matlab-wrapper>.

**ДЖАМАЛИДИНОВА М. Е., ПИЩИН О. Н.**  
**ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ**  
**СИСТЕМ ПОДВИЖНОЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ**

**Аннотация.** С целью идентификации неисправностей, возникающих на объектах систем подвижной сотовой связи, рассматривается модель экспертной системы с использованием правил нечеткой логики. Реализация модуля экспертной системы показывается на примере идентификации неисправности сопротивления изоляции кабеля сотовой связи. Использование аппарата нечеткой логики для создания базы знаний дает возможность формализовать процедуру оценки технического состояния на базе большого числа влияющих факторов и неточной информации и обоснованно принимать решения по идентификации неисправностей.

**Ключевые слова:** экспертная система, нечеткая логика, лингвистическая переменная, функция принадлежности, сопротивление изоляции кабеля, радиоэлектронные средства системы подвижной радиосвязи.

**DJAMALYDINOVA M. E., PISHCHIN O. N.**  
**IDENTIFYING OF MALFUNCTIONS IN MOBILE CELLULAR SYSTEMS**

**Abstract.** To identify malfunctions in mobile cellular systems, a model of expert system with fuzzy logic is considered. The authors demonstrate an implementation of the expert system module by identifying of insulation resistance malfunction of the cellular communication cable. The application of fuzzy logic for a knowledge base creation enables us to formalize the assessment of object technical condition and reasonably make decisions on malfunction identification.

**Keywords:** expert system, fuzzy logic, linguistic variable, membership function, cable insulation resistance, radioelectronic facilities of mobile radio communication system.

Отсутствие возможности получения максимально достоверной информации о реальной ситуации, сложившейся на объектах радиоэлектронных средств (РЭС) в системах подвижной сотовой связи снижает качество предоставления услуг сотовыми службами.

Для определения фактического состояния технической составляющей объекта связи целесообразно применение аппарата нечеткой логики, который может функционировать с реальной неопределенностью, а также позволяет формализовать оценку технического состояния объекта связи используя существующую информацию в базу знаний и механизмы выводы экспертной системы. Рассмотрим реализацию одного из модулей функциональной структуры интеллектуальной системы [1] для идентификации неисправностей, возникающих на объектах радиоэлектронных средств системы подвижной связи (РЭС СПС).

*Разработка модели идентификации неисправностей в СПС.* Модель идентификации неисправностей представляет собой экспертную систему на базе нечеткой логики, состоящую из набора продукционных правил, написанных на естественном языке с применением качественных понятий (см. рис.1).

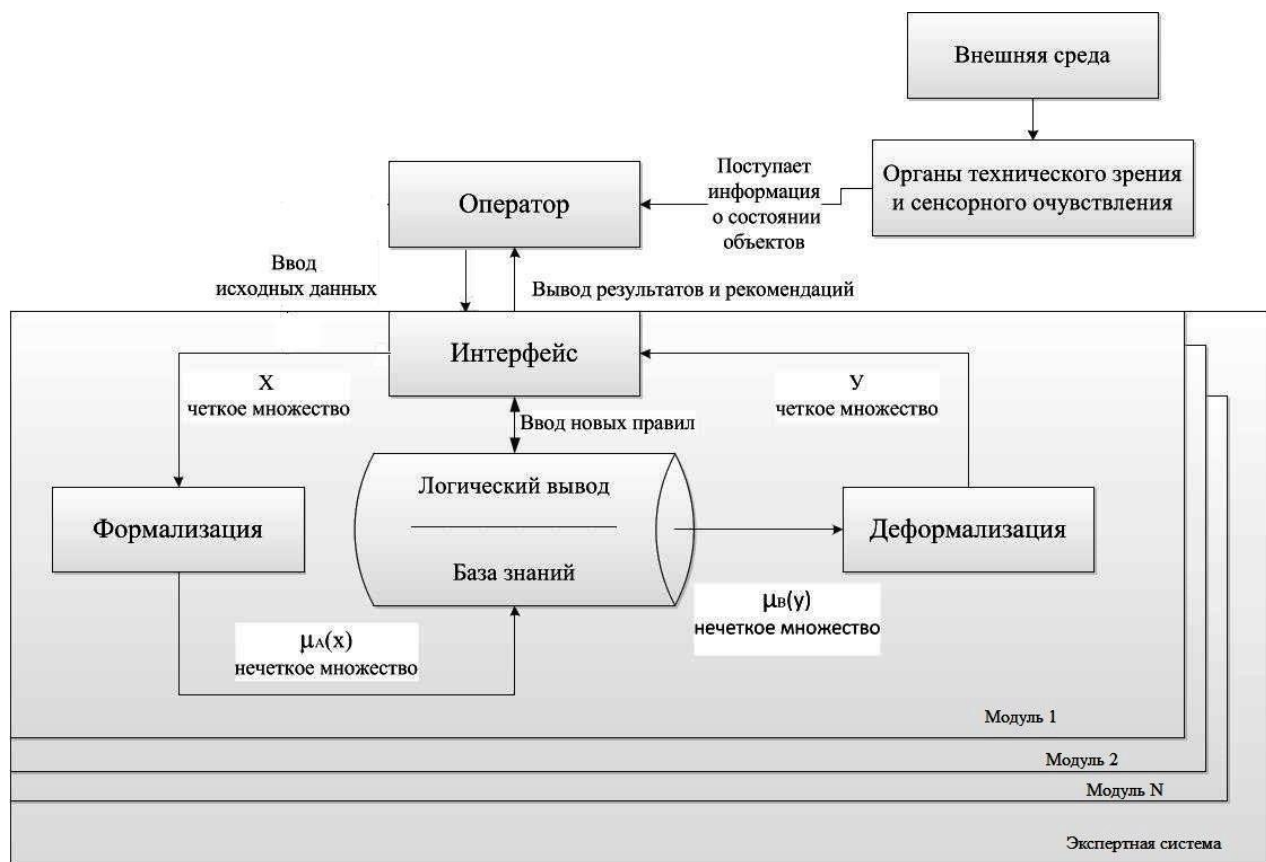


Рис. 1. Функциональная схема модели идентификации неисправностей на основе экспертной системы с нечеткой логикой.

На этапе формализации четкое (классическое) множество входных данных преобразовывается в нечеткое множество, которое определяется с помощью значений функции принадлежности. Цель данного этапа произвести соответствие между определенным численным значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего терма входной лингвистической переменной. Значения, полученные с блока органов технического зрения и сенсорного очувствления, являются входными данными. Эти данные оцениваются в соответствии с заданными в системе функциями принадлежности и четкое множество входных данных становится нечетким множеством, которое затем используется в качестве лингвистических переменных в базе знаний.

На этапе деформализации происходит обратное преобразование нечеткого множества в четкое множество. Вероятности каждой неисправности  $\{y_1, y_2, \dots, y_j\}$ , где  $j$  – число неисправностей (состояний) – являются значениями системы. Тогда,  $\tilde{s} = \{< \mu_s(y_i) / y_i >\}$ ,  $y_i \in Y$  – нечеткая ситуация, где  $\mu_s(y_i) = \{< \mu_{\mu_s(y_i)} >\}$  – функция принадлежности лингвистической переменной  $y_i$ , характеризующего ситуацию  $\tilde{s}$  [1; 2].

Комплекс системы сенсорных датчиков образуют территориально распределенную самоорганизующуюся систему сбора, обработки и отправки сведений на контроллер сенсорной сети. Основной областью применения будет контроль и постоянное отслеживание измеряемых параметров систем и объектов связи (уровня поля и другое) [3]. В качестве измеряемых параметров будем рассматривать устройства энергоснабжения (ЭС) и обеспечения уровня безопасности объекта (сопротивление изоляции).

Значение изоляции зависит от температуры и влажности воздуха. Нормой на кабель ТПП с оконечными устройствами принято считать для линий меньше 1 км сопротивление изоляции в 1000 МОм. При создании базы знаний ЭС были использованы диапазоны значений для характеристики сопротивления изоляции кабельной линии связи длиной до 1 км, соответственно для трех переменных – низкое, нормальное и высокое (см. табл. 1.).

Таблица 1

**Значения параметров в диапазоне характеристик сопротивления изоляции**

Наименование параметра	Обозначение	Значения параметров		
		Низкое	Нормальное	Высокое
Сопротивление изоляции первого плита, МОм	$R_{1 \text{ плита}}$	[800 - 980]	[980 -1200]	[1250 - 2000]
Сопротивление изоляции второго плита, МОм	$R_{2 \text{ плита}}$	[800 - 980]	[980 -1200]	[1250 - 2000]
Сопротивление изоляции жилы, МОм	$R_{\text{жк}}$	[7000 - 7900]	[8000 - 8300]	[8350 – 10000]
Сопротивление изоляции всей кабельной линии, МОм	$R_{\text{икл}}$	[800 - 980]	[980 -1200]	[1250 - 2000]
Температура воздуха, °С	T	[+10... + 17]	[+18... +22]	[+23... +30]

Значения вышеуказанных параметров для требуемого диапазона переменной рассчитаны исходя из возможных (разрешаемых) отклонений лингвистических параметров от некоторых средних значений в соответствии с правилами по технической эксплуатации. Из таблицы 1 следует, что для сопротивления изоляции (для первого плита) возможные значения составляют следующее нижеописанное множество:



$$R_{\text{Iлннта}} = (800, 900, 980, 1000, 200, 1500, 2000) \quad (1)$$

Любому из элементов множества функции имеется соответствующая, некоторая степень принадлежности: чем выше эта степень и, тем больше вероятность того, что значение параметра находится в требуемой норме. Функции принадлежности или информация для построения задаются специалистами по экспертизе на основе субъективных пониманий технических процедур и не носят случайного характера. Полученное нечёткое множество будет в следующем виде:

$$\tilde{A}_{R_{\text{Iлннта}}} = \left( \frac{0}{800}, \frac{0}{900}, \frac{0}{980}, \frac{1}{1000}, \frac{1}{1200}, \frac{0.5}{1500}, \frac{0}{2000} \right) \quad (2)$$

Так как множество параметра  $R_{\text{ИП}}$  является конечным и содержит 7 элементов, то нечеткое множество  $\tilde{A}$  записывается так:

$$\tilde{A}_{R_{\text{Iлннта}}} = \sum_{i=1}^7 \frac{\mu_A(R_{\text{Iлннта}q})}{R_{\text{Iлннта}q}}, \quad (3)$$

где  $\mu_A(R_{\text{Iлннта}q})$  – степень принадлежности элемента  $R_{\text{Iлннта}}$  нечеткому множеству  $\tilde{A}$ . Степень принадлежности – это число из диапазона [1].

Аналогично составляются остальные значения для нечеткого множества. С учетом других параметров, эту систему можно сопоставить с системой типа MISO (Multiple Input Single Output): так как имеется несколько входов и только один выход. В этом случае описываемая система зависит от всех значений параметров входа, и будет описываться правилами, в которых должны учитываются все параметры входа. Обобщённая запись полученной системы MISO выглядит так:

$$y = \tilde{A}_{R_{\text{ИП}}} \wedge \tilde{A}_{R_{\text{И2П}}} \wedge \tilde{A}_{R_{\text{ИК}}} \wedge \tilde{A}_{R_{\text{ИКЛ}}} \wedge \tilde{A}_T \quad (4)$$

Решение задачи с использованием правил нечеткой логики. Для идентификации неисправностей, связанных с сопротивлением изоляции кабеля и с функционированием элементов СПС, необходимо разработать диагностические таблицы параметров, влияющих на неисправность, а также алгоритмы, в соответствии с которыми, значения контролируемых параметров сопротивления изоляции сравниваются с их средними арифметическими значениями. Признак неисправности, связанной с сопротивлением изоляции, будет иметь место, если хотя бы одно отклонение параметра превышает установленные допустимые пределы. Идентификация неисправности производится по соответствующему набору признаков.

Разработанная модель экспертной системы на основе нечеткой логики и параметров сопротивления изоляции кабельной линии позволяет контролировать растущую вероятность неисправности при изменении входных параметров в режиме реального времени.

Преимущества использования нечеткой логики для создания модели идентификации неисправностей заключаются в возможности создания быстрого аналога экспертной системы с последующим усложнением функций. Метод нечетких множеств позволит включить в анализ качественные составляющие переменные, работать с нечеткими (неизвестными) входными данными и критериями относительно лингвистического понимания, а также нечеткие модели становятся более простыми для реализации по сравнению с классическими алгоритмами управления техническими системами и объектами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Джамалидинова М. Е., Пищин О. Н. Управление качеством в системах подвижной радиосвязи на основе искусственного интеллекта // Перспективы развития информационных технологий: сборник материалов XXII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск, 2014. – С. 14–15.
2. Мелихов А. Н., Бернштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
3. Пищин О. Н. Альтернативные сети сигнализации и контроля функциональности систем подвижной радиосвязи // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – Вып. 2. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2010. – С. 135–140.

**ЦЫГАНОВ Д. О., ФЕДОСЕЙКИН М. И., ДМИТРИЕВ В. Н., НИКУЛИН В. В.**  
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ**  
**С МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы построения универсального импульсного источника питания с микропроцессорным управлением, обладающего повышенной надежностью. В процессе проектирования решены задачи схемотехнического проектирования, а также создания управляющей программы для микроконтроллера. Итогом проделанной работы является создание полнофункционального прототипа.

**Ключевые слова:** импульсный источник питания, микропроцессорное управление, PIC, TL494, HD44780, надежность, управляющая программа, MPLAB, Assembler.

**TSYGANOV D. O., FEDOSEIKIN M. I., DMITRIEV V. N., NIKULIN V. V.**  
**DEVELOPING OF SWITCHING POWER SUPPLY WITH MCU**

**Abstract.** This article considers the development of a universal highly reliable switching power supply with microprocessor control unit. The authors solved the problem of circuit design and created a control program for microcontroller. As a result, a fully functional prototype has been developed.

**Keywords:** switching power supply, microprocessor control, PIC, TL494, HD44780, reliability, control program, MPLAB, Assembler.

Работа электронного оборудования невозможна без питания от каких-либо источников электрической энергии. Особенно важно наличие качественных источников в лабораторных условиях при проектировании и наладке электронных узлов и блоков. Источник питания должен быть удобным в эксплуатации, универсальным – то есть работать в разных режимах, отвечать требованиям надежности и не выходить из строя при различных аварийных режимах. Особенно это важно при наладке новых электронных устройств, когда велика вероятность появления труднопредсказуемых и случайных ошибок, а также не отлаженных в полной мере режимов работы. Кроме того, важно защитить сами исследуемые цепи от повреждений в случае аварии.

На современном этапе развития радиоэлектронной промышленности наибольшее распространение находят импульсные источники питания. Объясняется это их высоким КПД, малыми размерами благодаря появлению на рынке новых электронных компонентов, обладающих необходимыми для проектирования характеристиками. Спроектированный источник питания также по принципу действия является импульсным, с применением

широтно-импульсной модуляции в цепях стабилизации. Упрощенная структурная схема источника изображена на рис. 1 (не показаны цепи служебного питания).

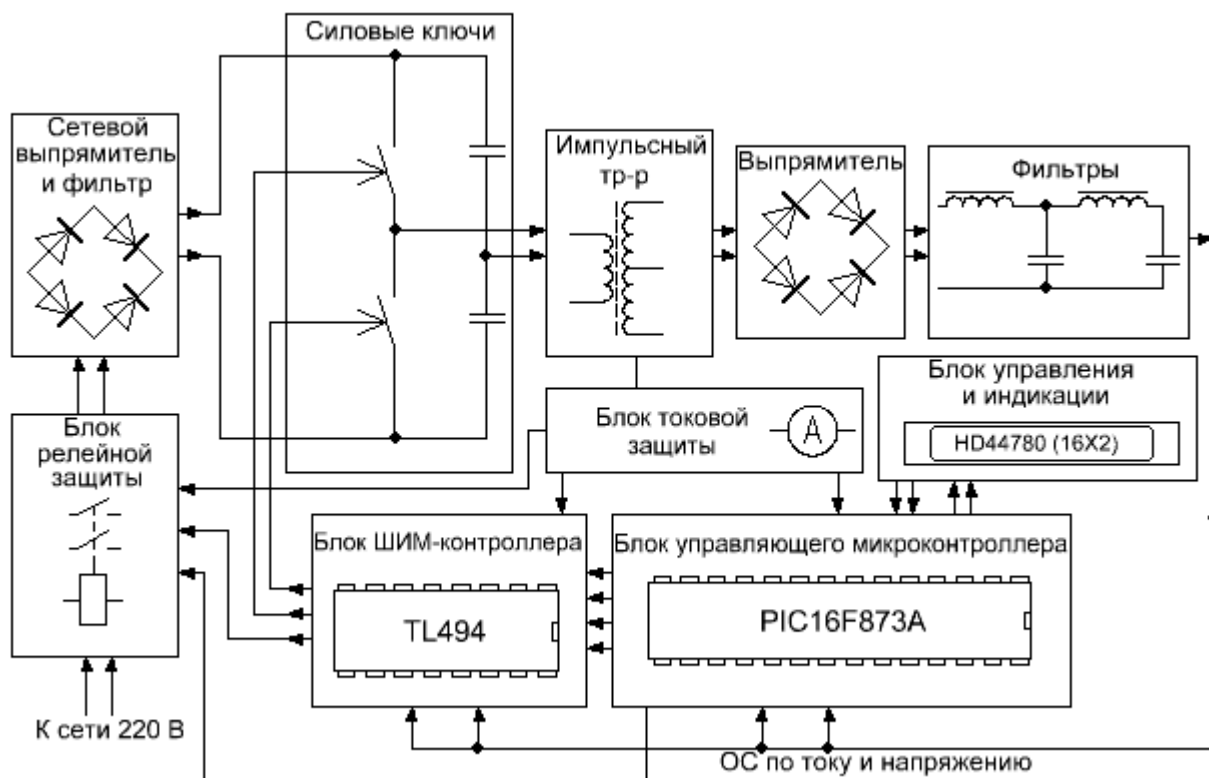


Рис. 1. Упрощенная структурная схема источника питания.

Силовой блок источника построен с использованием топологии типа «полумост», что является характерным решением для источников мощностью до нескольких сотен ватт [1].

Управление силовой частью производит широко известная микросхема ШИМ-контроллер TL494. В ее внутреннем составе имеются для этого все необходимые узлы и блоки. Открывание и закрывание силовых ключей выполнено через развязывающий трансформатор (на структурной схеме не показан). Решение является не новым: все чаще применяются бутстрепные методы с использованием готовых микросхем-драйверов, например, от International Rectifier [2]. Часто сама микросхема-драйвер является одновременно и контроллером всего силового блока.

К микросхеме TL494 с выхода источника питания подводятся сигналы для организации обратной связи и стабилизации тока и напряжения. Также данный ШИМ-контроллер организует защиту силового блока по так называемому «мертвому времени», организует принцип «мягкого запуска», совместно с блоком токовой защиты каждого полупериода в случае перегрузки отключает генерацию открывающих импульсов и останавливает блок.

Для управления источником питания в целом, измерения и отображения всех текущих режимов работы, взаимодействия с пользователем организовано микропроцессорное управление на микроконтроллере PIC16F873A. Данный микроконтроллер принадлежит к тому же семейству, что и примененный в [3], но отличается гораздо большим объемом памяти и наличием требуемых в данном проекте периферийных модулей, например, модулем 10-разрядного АЦП и ШИМ. Управляющая программа написана на языке Assembler в среде разработки MPLAB.

Известно, что контроллер TL494 имеет внешние входы для подключения обратных связей и опорных напряжений [4]. Идея микропроцессорного регулирования выходных параметров (напряжения и тока) заключается в том, чтобы изменять уровни опорного напряжения для каналов тока и напряжения, что в конечном итоге позволяет изменить значения тока и напряжения на выходе источника питания. Достичь этой цели позволил внутренний модуль ШИМ микроконтроллера PIC16F873A. Изменяя скважность импульсов, а затем, отфильтровав постоянную составляющую с помощью RC-цепочек, получим на выходе постоянное напряжение нужной величины, которое и используется в роли опорного для TL494. При этом достигается высокая степень линейности преобразования. Разумеется, применение стабилизированных источников питания для микроконтроллера является обязательным условием.

Индикация и настройка всех параметров и режимов производится с использованием ЖК-дисплея размерами 2 строки по 16 знаков синтезирующих знакомест. Управляющий контроллер дисплея – HD44780.

После включения источника к сети, появляется меню выбора режима работы – источник тока или источник напряжения, как показано на рис. 2.



Рис. 2. Меню выбора режима работы.

После выбора при помощи трех управляющих кнопок режима происходит так называемый «мягкий запуск», в течение которого силовые конденсаторы на выходе сетевого диодного моста заряжаются через резисторы для ограничения их зарядного тока, а на индикатор выводится соответствующее сообщение, как показано на рис. 3.

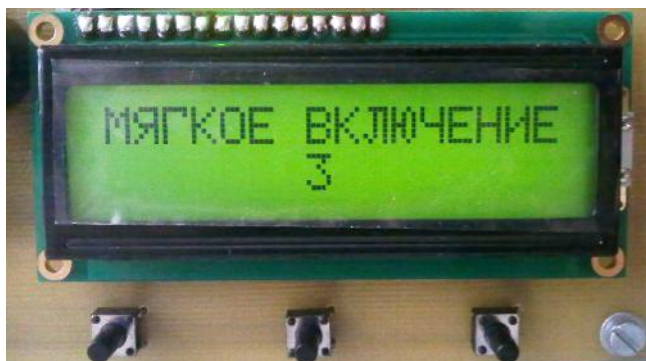


Рис. 3. «Мягкий запуск».

По окончании «мягкого запуска» источник питания запускает силовую часть и переходит в режим работы с отображением основных параметров (рис. 4).



Рис. 4. Рабочий режим.

В этом режиме в любой момент времени можно остановить силовую часть, а также настроить, в зависимости от выбранного режима (источник напряжения или тока), текущее и максимально допустимое значение тока и/или напряжения.

В случае аварийной ситуации срабатывает ограничение параметра, вызвавшего аварию (заранее установленное, например, максимальный ток), или на текущем периоде останавливается силовая часть с помощью транзисторного ключа, т. е. «быстрая» защита, а затем – «медленная» релейная ступень обесточивает источник питания.

Спроектированный источник питания обеспечивает на выходе напряжение от 0 до 18 В (с шагом перестройки порядка 0,2 В в режиме источника напряжения), ток от 0 до 6,5 А

(с шагом перестройки порядка 40 мА в режиме источника тока). Он обладает высокими характеристиками надежности, как по защите самого источника, так и подключаемой нагрузки. Гарантированно допускает работу от питающей сети с напряжением от 170 до 250 В. По сравнению с промышленными источниками, обладающими близкими характеристиками и функционалом, позволил получить экономическую выгоду за счет себестоимости, а также имеется возможность дальнейшего совершенствования функционала, например, за счет подключения управляющего устройства к персональному компьютеру или модему с целью получения дистанционно-программно-управляемого источника питания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.
2. International Rectifier [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.irf.ru/>.
3. Дубровин В. С., Никулин В. В., Цыганов Д. О. Автоматизированный детектор кода азбуки Морзе // XXXIX Огаревские чтения: Материалы научной конференции. Технические науки. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2011. В 3 ч. – Ч. 1. – С. 240–242.
4. Texas Instruments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ti.com/product/tl494?keyMatch=TL494&tisearch=Search-EN>.

**ЕВИШЕВ А. В., ИВЕНИН С. В.**

**ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН  
НА СКОРОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ**

**Аннотация.** Исследуется влияние качества обработки поверхности пластин 4H-SiC на скорость термического окисления карбида кремния в атмосфере сухого кислорода. Показано, что на поверхностях пластин с большей шероховатостью при прочих равных условиях образуется более толстая окисная пленка.

**Ключевые слова:** карбид кремния, механическая обработка, шероховатость, окисление, окисная пленка.

**EVISHEV A. V., IVENIN S. V.**

**THE INFLUENCE OF PLATE SURFACE PROCESSING  
ON THE SPEED OF SILICON CARBIDE THERMAL OXIDATION**

**Abstract.** The study focuses on the influence of the processing quality of 4H-SiC plate surfaces on the speed of thermal oxidation of silicon carbide in dry oxygen. The surfaces of plates with a bigger roughness demonstrate thicker oxide film under otherwise equal conditions.

**Keywords:** silicon carbide, machining, roughness, oxidation, oxide film.

Известно, что скорость термического окисления кремния и карбида кремния зависит от таких характеристик полупроводникового материала как уровень легирования, кристаллографической ориентации, качество подготовки поверхности [1].

В литературе имеется достаточно много сведений о влиянии уровня легирования и кристаллографической ориентации на скорость термического окисления кремния и карбида кремния. Однако исследований влияния качества обработки поверхности очень мало, а исследования по карбиду кремния совсем отсутствуют. В книге «Технология СБИС» под редакцией С. Зи приводятся некоторые сведения о влиянии повреждений поверхности кремния на скорость роста окисных пленок. Тем не менее, результаты исследований различных авторов противоречивы и неоднозначны. В основном повреждения поверхности создавались путем ионной бомбардировки различными ионами, и только бомбардировка поверхности кремния ионами аргона однозначно приводила к ускорению процесса окисления [1].

При изготовлении полупроводниковых приборов на основе любого материала обязательной операцией в технологическом маршруте является механическая обработка, которая включает резку, шлифовку и полировку полупроводниковых пластин. Операция резки не обеспечивает требуемой точности и качества поверхностей пластин. Полученные



пластины имеют различные погрешности формы (неплоскостность, непараллельность плоскостей, изгиб, шероховатость и др.), значительный нарушенный слой и довольно большие отклонения по толщине. Поэтому необходима дальнейшая обработка для улучшения точности и качества их поверхностей. Эту обработку подразделяют на шлифовку и полировку, которые осуществляются с использованием алмазных паст и мелкодисперсных абразивов с различной величиной зерна. И все же после всех операций механической обработки остается нарушенный слой, который существенным образом влияет как на дальнейшую технологическую обработку (эпитаксия, травление, окисление, фотолитография), так и на параметры полупроводникового прибора.

Карбид кремния обладает рядом особенностей, которые проявляются как в процессе механической обработки, так и в процессе термического окисления. Так, скорость термического окисления в SiC существенно меньше, чем в Si. Глубина нарушенного слоя не столь велика как в Si [2]. Поэтому исследование влияния результатов механической обработки на процесс термического окисления является актуальной задачей технологии изготовления приборов на основе карбида кремния.

В данной работе мы исследовали влияние шероховатости поверхности пластин 4H-SiC на скорость термического окисления в атмосфере сухого кислорода. Измерение шероховатости поверхности и толщины окисной пленки проводилось с помощью профилометра P-16+ KLA-Tencor. Для эксперимента были взяты две полированные половинки одной пластины SiC. На рисунке 1 (а, б) представлены фотографии пластин, выбранных для эксперимента.

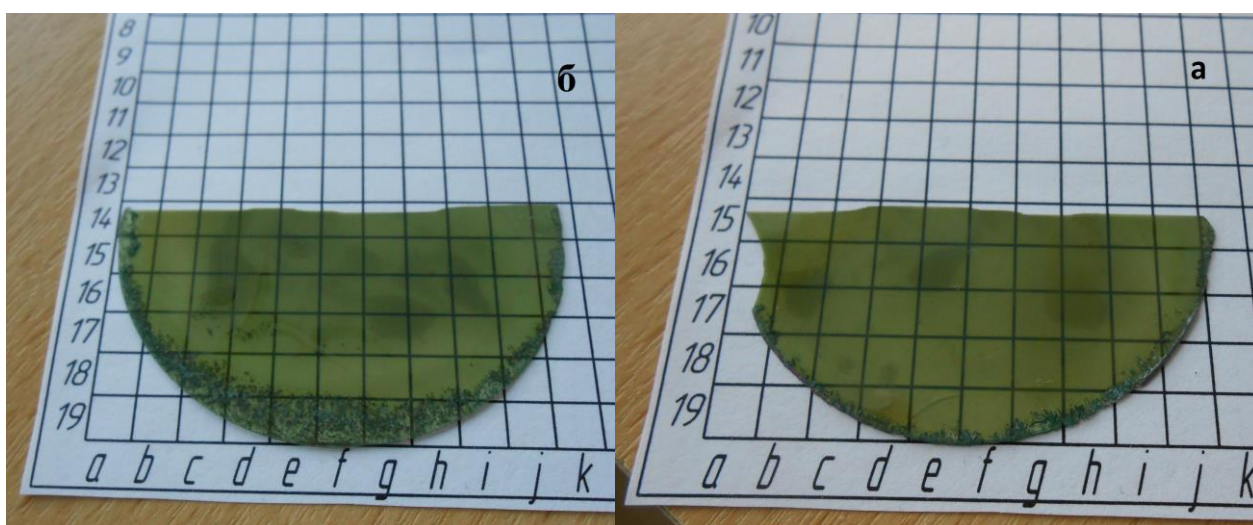


Рис. 1. Фотографии образцов 4H-SiC: (а) – образец; (б) – образец.

Обе половинки предварительно были исследованы на шероховатость. Параметры шероховатости можно увидеть на рисунке 2 [3].

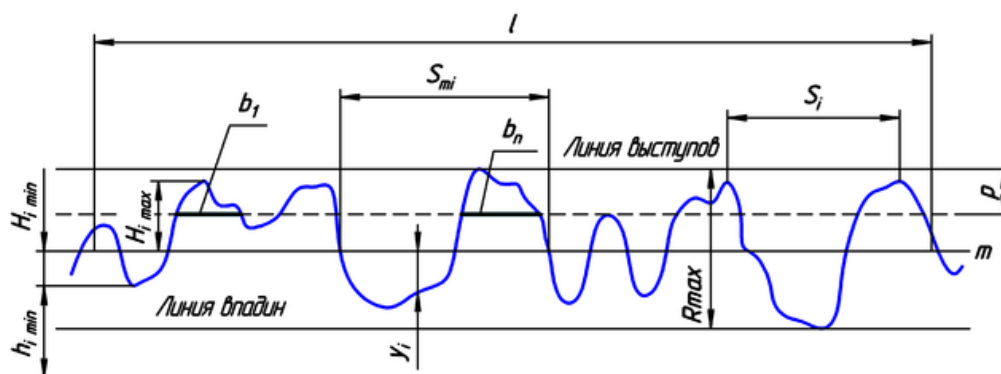


Рис. 2. Нормальный профиль и параметры шероховатости поверхности.

На рисунке схематично показаны параметры шероховатости:  $l$  – базовая длина (длина линии, используемой для выделения неровностей);  $m$  – средняя линия профиля;  $S_{mi}$  – средний шаг неровностей профиля;  $S_i$  – средний шаг местных выступов профиля;  $H_{i\ max}$  – отклонение пяти наибольших максимумов профиля;  $H_{i\ min}$  – отклонение пяти наибольших минимумов профиля;  $h_{i\ max}$  – расстояние от высших точек пяти наибольших максимумов до линии параллельной средней и не пересекающей профиль;  $h_{i\ min}$  – расстояние от низших точек пяти наибольших минимумов до линии параллельной средней и не пересекающей профиль;  $R_{max}$  – наибольшая высота профиля;  $y_i$  – отклонения профиля от линии  $m$ ;  $p$  – уровень сечения профиля;  $b_n$  – длина отрезков, отсекаемых на уровне  $p$ .

Для определения класса шероховатости поверхности чаще используют следующие параметры (которые определяются на базовой длине  $l$ ):

1.  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля;
2.  $R_z$  – высота неровностей профиля по десяти точкам.

Измерение шероховатости проводились на 4 участках каждого образца (рис. 3). Координаты каждого участка фиксировались.

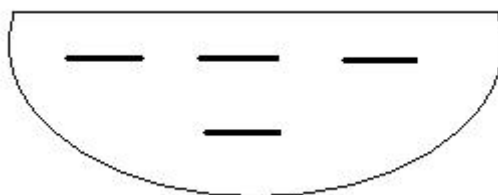


Рис. 3. Расположение базовых линий для измерения шероховатости на каждом образце.

Результаты измерений шероховатости для одного участка на каждом образце представлены на рисунках 4 и 5.

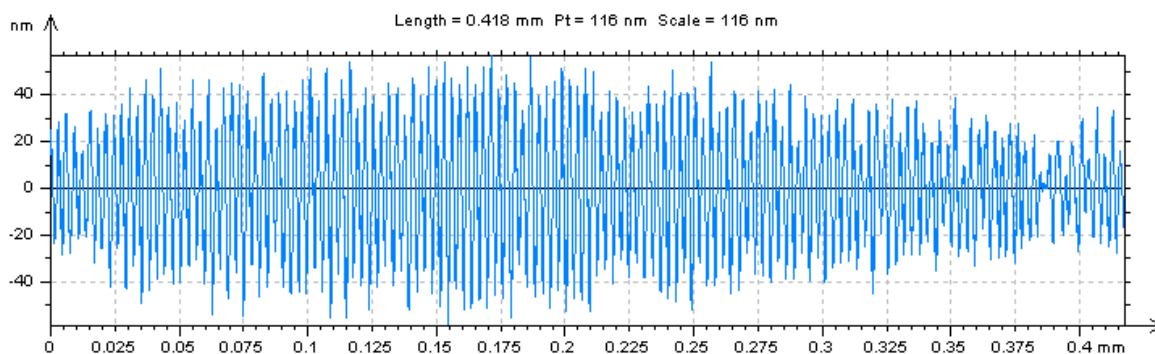


Рис. 4. Двумерный профиль пластинки (а).

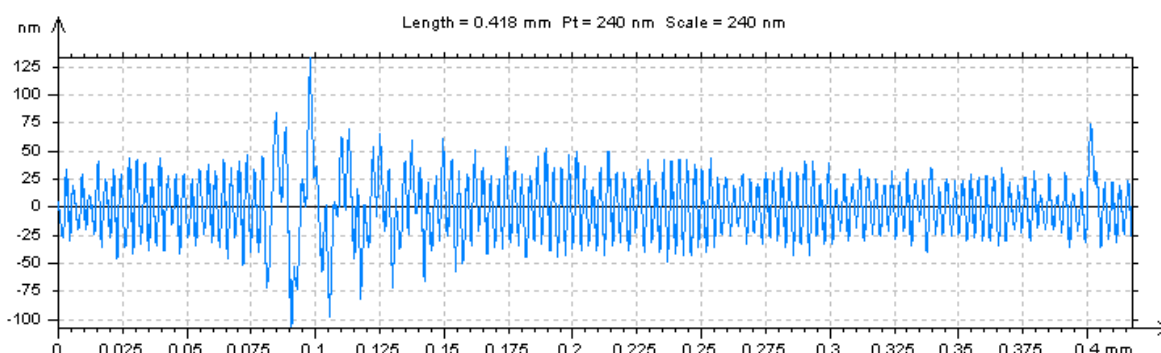


Рис. 5. Двумерный профиль пластинки (б).

Из анализа двумерных профилей следует, что на разных участках поверхности образца шероховатость меняется в достаточно широких пределах. Есть участки, где шероховатость находится в пределах 100–120 нм. Есть отдельные участки, где шероховатость достигает значения 145 и 240 нм. Из представленных двумерных профилей видно, что при одинаковой длине базовой линии 0,418 мм для образца (а)  $R_z = 114$  нм,  $R_a = 24,1$  нм,  $R_{\text{шпх}} = 116$  нм, а для образца (б) эти значения равны 235 нм, 25,3 нм и 240 нм, соответственно.

Процесс термического окисления проводился в диффузионной печи СДОМЗ-100 в сухом кислороде при 1150<sup>0</sup>С в течение 5 часов для обоих образцов одновременно. Полученный окисел локально стравливался, образовывалась ступенька окисел/стравленный участок. После чего снимался профиль данной ступеньки, ее высота принималась за толщину окисной пленки. Результаты измерений представлены на рисунках 6 и 7.

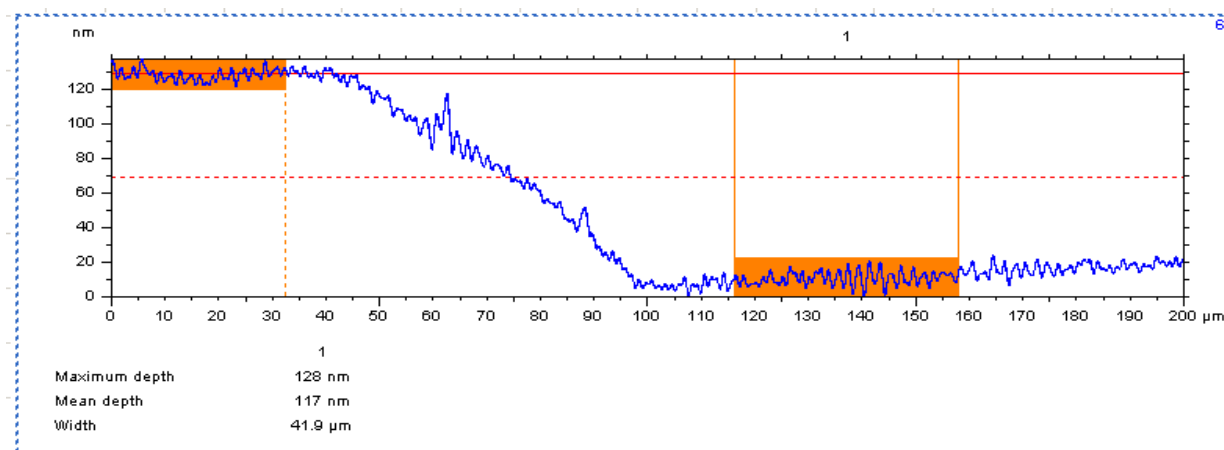


Рис. 6. Профиль ступеньки, снятый на образце (а) после окисления в сухом кислороде в течение 5 часов.

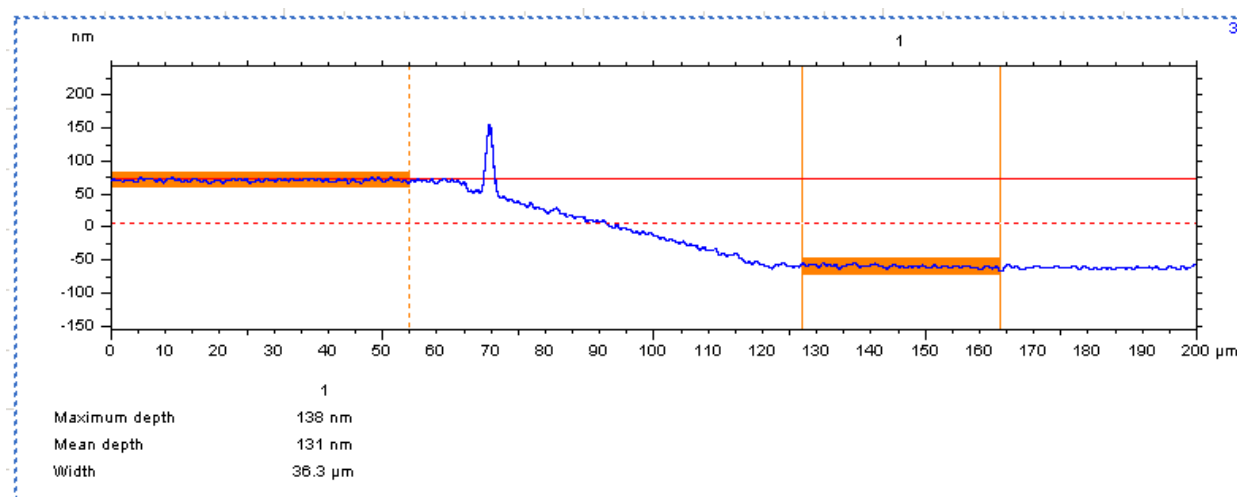


Рис. 7. Профиль ступеньки, снятый на образце (б) после окисления в сухом кислороде в течение 5 часов.

На рисунке 6 показан профиль ступеньки, снятый на образце (а), подвергнутом окислению в сухом кислороде в течение 5 часов. Значение толщины окисла равно 117 нм.

На рисунке 7 показан профиль ступеньки, снятый на образце (б), подвергнутом окислению в сухом кислороде в течение 5 часов. Значение толщины окисла равно 136 нм.

Аналогичные результаты получены и на остальных участках каждого образца. Большим значением параметров шероховатости  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_{max}$  соответствовало большее значение толщины окисной пленки полученной термическим окислением в атмосфере сухого кислорода.

Следует отметить, что взятые для исследования образцы 4H-SiC имеют низкий уровень качества обработки поверхности,  $R_a > 20$  нм, а в технологических процессах SiC

приборов часто требуется более высокий класс обработки поверхности, при котором влияние шероховатости на скорость термического окисления будет не столь заметно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология СБИС: в 2 кн. / под ред. С. Зи., пер. с англ. – кн. 1. – М: Мир, 1986. – 404 с.
2. Сысоев А. А. Процессы обработки затравок для выравнивания совершенных объемных монокристаллов полупроводникового карбида кремния методом ЛЭТИ: дисс. ...канд. тех. наук. – СПб, 2001. – 105 с.
3. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. ГОСТ 2789-73, издание официальное. – М.: Стандартиформ, 2006. – 15 с.

**ЮШКОВ И. С., ОБМАНКИН Н. Н., МАЛЫЙКИН А. В.**  
**ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЙ АГРЕГАТ ДЛЯ ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА**  
**НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема возникновения аварий из-за гололеда на воздушных линиях электропередач и методы борьбы с ней. В качестве одного из способов борьбы с данной проблемой выбран неуправляемый выпрямитель, предназначенный для плавки гололеда на линиях электропередач с постоянным током.

**Ключевые слова:** гололед, линия электропередач, неуправляемый выпрямитель, короткое замыкание, постоянный ток.

**YUSHKOV I. S., OBMANKIN N. N., MALYIKIN A. V.**  
**STRAIGHT RECTIFIER FOR ICE-MELTING OF TRANSMISSION LINES**

**Abstract.** The article considers the problem of damages done by glaze on overhead transmission lines and methods of clearing it. Particularly, the authors focus on the use of straight rectifier for direct current ice-melting of overhead transmission lines.

**Keywords:** glaze, transmission line, straight rectifier, short-circuit failure, direct current.

Возникшие в настоящее время рыночные отношения между производителями и потребителями электроэнергии требуют качественного и бесперебойного электроснабжения. К сожалению, электроэнергетическое оборудование, которое используется сегодня в России, в значительной степени физически и морально устарело. Высоковольтные линии электропередачи, охватывающие огромные территории, являются наименее надежными элементами современной энергосистемы.

Основная часть повреждений воздушных линий – это короткие замыкания и обрывы проводов из-за атмосферных воздействий. При этом определение места повреждения и восстановление поврежденных участков линий электропередачи являются сложными, длительными и дорогостоящими технологическими операциями.

В этой ситуации вопросы плавки гололеда становятся весьма актуальными. Под тяжестью гололедных масс могут произойти обрывы проводов и поломки опор линий электропередачи. Кроме того, при появлении гололедных отложений на проводах ухудшается высокочастотная связь по электролиниям, которая используется для передачи сигналов релейной защиты и противоаварийной автоматики, а также технологической информации.

Гололедные аварии на воздушных линиях являются одними из самых тяжелых и трудноустраняемых из-за зимнего бездорожья, мерзлого грунта и разбросанности по линии

одновременно пораженных участков. Гололедные аварии на высоковольтных линиях, как правило, имеют массовый характер и приносят большой экономический ущерб. Раннее обнаружение гололеда на проводах электролиний и своевременное его устранение путем плавки являются насущными задачами энергоснабжающих организаций.

Гололед, то есть плотная ледяная корка, образуется при намерзании переохлажденных капель дождя, мороси или тумана при температуре от 0 до  $-5^{\circ}\text{C}$  на поверхности земли и различных предметов, в том числе проводах высоковольтных линий электропередач. Толщина гололеда на них может достигать 60–70 мм, существенно утяжеляя провода. Например, провод марки АС-185/43 диаметром 19,6 мм километровой длины имеет массу 846 кг; при толщине гололеда 20 мм она увеличивается в 3,7 раза, при толщине 40 мм – в 9 раз, при толщине 60 мм – в 17 раз. При этом общая масса линии электропередачи из восьми проводов километровой длины возрастает соответственно до 25, 60 и 115 тонн, что приводит к обрыву проводов и поломке металлических опор. Гололед обуславливает дополнительные механические нагрузки на все элементы высоковольтной линии. При значительных гололедных отложениях возможны обрывы проводов, тросов, разрушения арматуры, изоляторов и даже опор высоковольтных линий.

Существует достаточно большое количество схем плавки гололеда, определяемых схемой электрической сети, нагрузкой потребителей, возможностью отключения линий и другими факторами. Основным методом борьбы с гололедом при эксплуатации протяженных ВЛ является его плавка за счет нагревания проводов протекающим по ним током.

Выбор метода и схемы плавки гололеда должен определяться режимом и условиями работы данной ВЛ (схемой сети, потребляемой мощностью электроустановками потребителей, зоной гололедообразования, возможностью отключения ВЛ и т. п.).

Плавка гололеда может производиться как с отключением ВЛ на время плавки, так и без отключения.

Плавка с отключением ВЛ производится:

- токами короткого замыкания, искусственно создаваемого в сети;
- встречным включением фаз трансформаторов;
- комбинированным использованием указанных выше способов;
- постоянным током от отдельного источника.

Плавка без отключения ВЛ производится:

- увеличением токов нагрузки ВЛ путем изменения схемы коммутации сети;
- пофазной плавкой при работе ВЛ по схеме «два провода – земля».

В качестве борьбы с проблемой гололеда был выбран неуправляемый выпрямитель, предназначенный для плавки льда на проводах и тросах воздушных линий электропередачи постоянным током. Входное напряжение неуправляемого выпрямителя – 10 кВ, выходное напряжение – 14 кВ, выходной ток – 1200 А, частота питающей сети – 50 Гц.

Выпрямитель состоит из силового блока, воздухопровода, подставки, электровентилятора, коллектора и шкафа управления.

Силовая часть выпрямителя представляет собой сборно-разборную конструкцию из трех шкафов ШД-1, ШД-2, ШД-3. В каждом шкафу размещены два диодных высоковольтных плеча одной фазы мостового выпрямителя. Шкафы диодные предназначены для размещения диодных блоков с охладителями, панелей с резисторами и конденсаторами, клеммного блока, указательных реле и силового монтажа. Конструктивно ШД выполнен в виде металлического шкафа с дверью. Двери шкафов имеют блокировки, исключающие случайное проникновение внутрь шкафа, находящегося под напряжением. Дверную блокировку обеспечивают путевые выключатели. Шкафы диодные снабжены также замками со специальными ключами. В нижней части шкафа справа расположен клеммный блок, над ним размещены блоки диодов с охладителями. Для подключения шкафов к питающей сети и к нагрузке на крыше шкафов имеются проходные изоляторы. Для безопасного обслуживания выпрямителя на нижней части шкафов предусмотрены болты заземления. Для транспортирования на крыше шкафов имеется 4 отверстия.

Диодные шкафы выполнены в брызгозащищенном исполнении для наружной установки. Коррозионная стойкость шкафов обеспечивается защитными лакокрасочными покрытиями. Шкаф управления предназначен для размещения релейных защит, пускорегулирующей аппаратуры, сигнализации, измерительных приборов и других элементов схемы управления. На двери шкафа управления размещены измерительные приборы, световая сигнализация, таблички, ключ управления масляным выключателем и другие элементы управления. Внутри шкафа расположена остальная часть элементов управления, защиты, сигнализации, а также клеммные блоки внешнего присоединения. В нижней части шкафа управления имеется болт заземления.

Воздухопровод и вентилятор с коллектором совместно с каналами охлаждения блоков диодов образуют разомкнутую систему охлаждения выпрямителя с подачей охлажденного воздуха снизу вверх. Воздухопровод представляет собой металлический короб, конструкция которого обеспечивает равномерное распределение потока воздуха по каналам охлаждения силового блока. Выпрямитель является статическим преобразователем трехфазного переменного тока частотой 50 Гц в постоянный и выполнен по трехфазной мостовой схеме выпрямления (см. рис. 1).



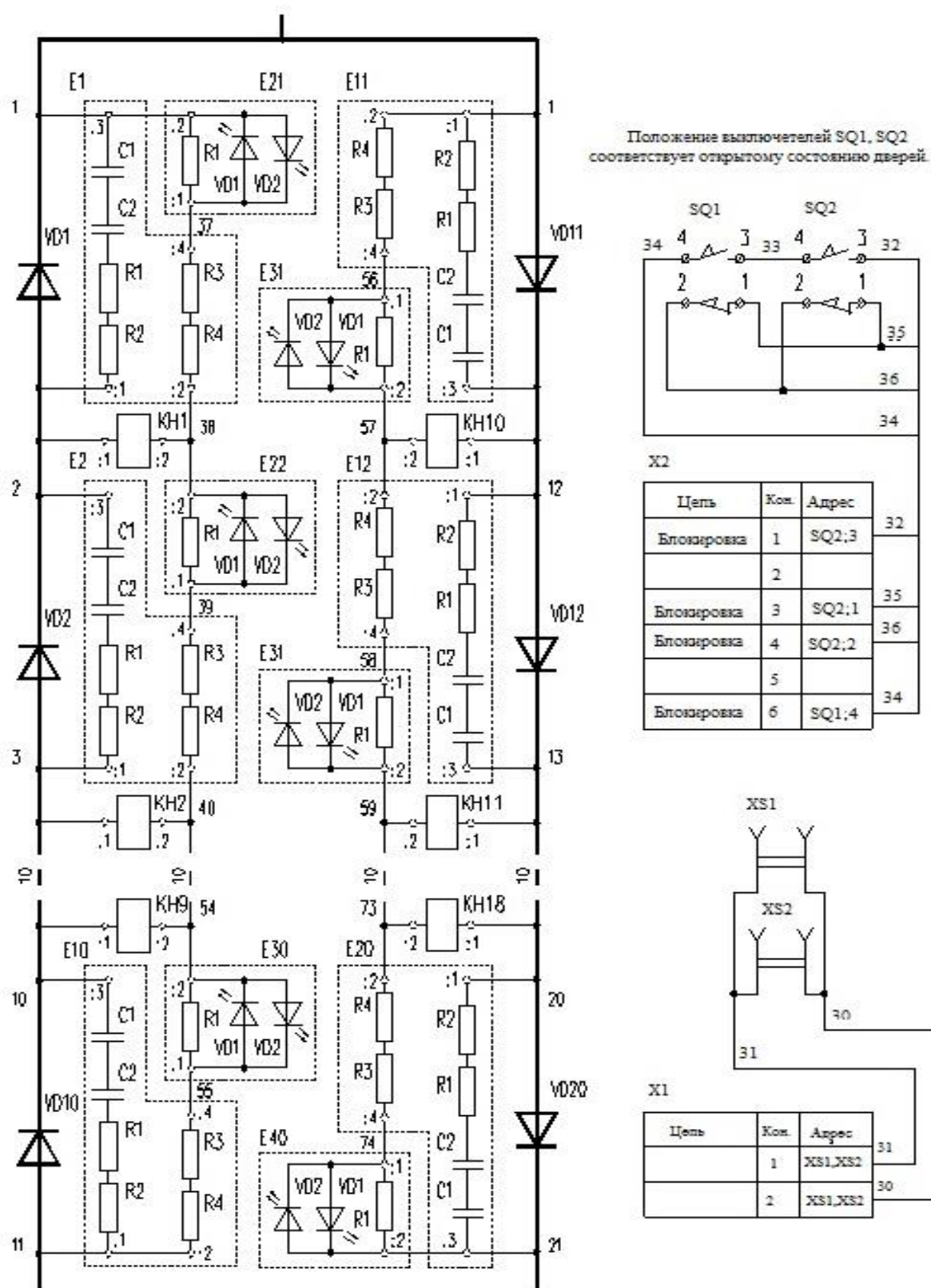


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная агрегата.

Каждая фаза схемы выпрямления состоит из двух плеч последовательно включенных диодов. Плечо фазы состоит из десяти диодов ДЛ153 30 класса, соединенных последовательно. Диоды плеча выбраны в зависимости от номинального выходного тока 1200, 1600 или 1800 А. Для равномерного распределения обратных напряжений параллельно диодам установлены RC- цепочки (конденсаторы C1, C2, резисторы R1...R4), а диоды каждого плеча подбираются по зарядам восстановления с разницей между наибольшим и наименьшим значениями не более 300 мкКл. Для защиты от кратковременных коммутационных и атмосферных перенапряжений на входе выпрямителя установлены нелинейные ограничители перенапряжения VD1...VD6. Контроль неисправного состояния диодов осуществляют указательные реле КН1...КН18. Указательные реле включены в диагональ моста, образованного диодом и шунтирующим резистором. Включение выпрямителя в работу, а также отключение производится переключателем S1, установленным на двери шкафа управления. Работа выпрямителя возможна только при закрытых дверях силового блока (дверная блокировка SQ1, SQ2 ) .

Питание силовой части выпрямителя осуществляется от трехфазной сети напряжением 10 кВ, 50 Гц через токоограничивающие реакторы и масляный выключатель, устанавливаемые потребителем. Сопротивление токоограничивающих реакторов должно быть не менее 0,5 Ом.

Были проведены испытания, которые показывают, что выпрямительный агрегат выполняет свои задачи. Возможности работы выпрямителей открывают широкие перспективы повышения автоматизации и эффективности производства, позволяют исключить человека из условий работы, вредных для его здоровья. Выпрямительный агрегат удовлетворяет требованиям, предъявленным к диодным выпрямителям, используемым для предотвращения образования гололеда на линиях электропередач.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяков А. Ф. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем. – Пятигорск: Изд-во РП Южэнерготехнадзор, 2000. – 284 с.
2. Чиженко И. М. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1974. – 274 с.
3. Чижаев И. А. Расчет и проектирование полупроводниковых выпрямителей: учеб. пособие по курсовому проектированию. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1979. – 132 с.

**БУХАРОВ А. А., ШЕСТЕРКИНА А. А., ФРОЛОВ К. А.**

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ  
ДВУКРАТНОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ ОДНОСЛОЙНОГО ФОТОРЕЗИСТА  
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЭТ И ФОТОШАБЛОНОВ**

**Аннотация.** Проводится анализ известных фотолитографических методов формирования на поверхности подложек рисунков малоразмерных элементов рельефа, получаемых с использованием двукратного экспонирования фоторезистивных слоев в виде наложения экспозиций фоторезиста и в виде наложения фоторезистивных масок. Отмечены недостатки, присущие указанным методам, а также приведена схема усовершенствованного процесса фотолитографии, позволяющая избежать отмеченных недостатков и получить элементы топологического рельефа с размерами менее 1 мкм.

**Ключевые слова:** фотолитография, однослойный фоторезист, последовательное двукратное экспонирование, малоразмерный элемент, схема фотолитографического процесса.

**BUKHAROV A. A., SHESTERKINA A. A., FROLOV K. A.**

**THE FEATURES OF MONOLAYER PHOTORESIST DOUBLE EXPOSURE  
FOR MANUFACTURING OF SEMICONDUCTOR DEVICES AND PHOTOMASKS**

**Abstract.** The article presents an analysis of popular photolithographic methods of the formation of small-size elements on the substrate surface by using of double photoresist exposure obtained by imposing of photoresist layers and masks. The shortcomings of the methods are pointed out. In this connection, an improved scheme of photolithography technological process is suggested. It allows avoiding the shortcomings and obtaining small-size elements of less than 1 mcm.

**Keywords:** photolithography, monolayer photoresist, serial double exposure, small-size element, photolithography process scheme.

Одним из методов формирования малоразмерных элементов топологии является технология фотолитографии, использующая принцип суперпозиции. При этом возможны два варианта реализации принципа суперпозиции в фотолитографии:

- 1) наложение экспозиций однослойного фоторезистивного покрытия;
- 2) наложение фоторезистивных масок.

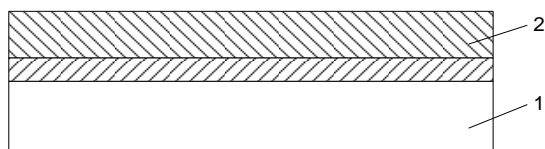
Сущность метода последовательного двукратного экспонирования однослойного резистивного покрытия для получения малоразмерных топологических элементов состоит в следующем [1].

При проведении экспонирования фоторезистивного слоя используется фотошаблон с размерами топологических элементов, превышающими требуемые размеры элементов топологии фоторезистивного рельефа, формируемого на подложке. При этом вначале проводится первое экспонирование фоторезистивного слоя с такой длительностью экспозиции, которая обеспечивает экспонирование фоторезиста в половине объема экспонируемого участка фоторезистивного слоя. Затем проводится второе экспонирование того же самого участка фоторезистивного слоя через тот же самый фотошаблон с той же самой длительностью экспозиции, что и при первом экспонировании, причем во время этого второго экспонирования фотошаблон должен быть смещен относительно того его положения, которое он занимал при первом экспонировании. В результате этого участок фоторезистивного слоя, подвергнутый экспозиции и на первом и на втором этапах экспонирования, получает суммарную длительность экспозиции, достаточную для экспонирования фоторезиста по всему объему экспонируемого участка, а на остальных, однократно экспонированных участках фоторезистивного слоя, длительность экспозиции обеспечивает экспонирование фоторезиста только на половину объема облучаемого участка этого фоторезистивного слоя (см. рис. 1).

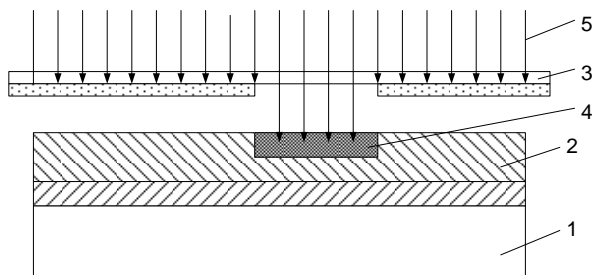
При проявлении такого однослойного фоторезистивного покрытия, подвергнутого подобному последовательному двукратному экспонированию, участок фоторезистивного слоя, экспонированный как на первом, так и на втором этапах, полностью освобождается от фоторезистивного материала, а остальные участки остаются покрытыми этим фоторезистивным материалом.

Сущность метода наложения фоторезистивных масок состоит в следующем [2, с. 1] (см. рис. 2 – 6).

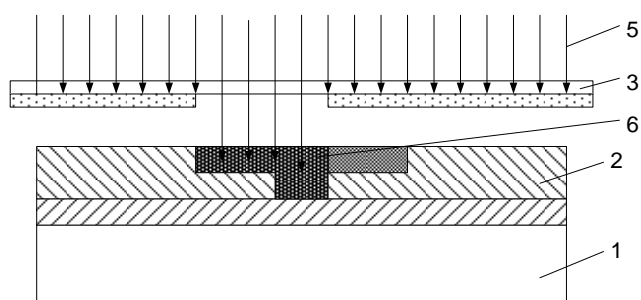
В начале на поверхности подложки создается первый фоторезистивный рельеф, содержащий топологические элементы большого размера. Затем поверх него создается второй фоторезистивный рельеф, который также имеет топологические элементы большого размера. Особенность здесь заключается в том, что топологический рисунок второго фоторезистивного рельефа выполняется смещенным относительно рисунка первого фоторезистивного рельефа. Поэтому образовавшаяся в результате наложения этих двух рельефов результирующая фоторезистивная маска имеет топологические элементы с меньшими размерами, по сравнению с топологическими элементами, как в первом, так и во втором фоторезистивных рельефах.



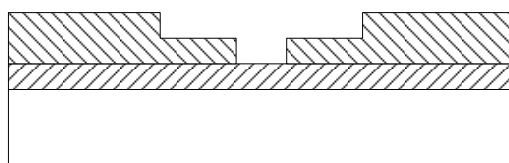
а) подложка со слоем фоторезиста на поверхности



б) первое экспонирование фоторезистивного слоя



в) второе экспонирование фоторезистивного слоя



г) проявление фоторезистивного рельефа и его задубливание

Рис. 1. Формирование фоторезистивного рельефа путем последовательного экспонирования однослойного покрытия из позитивного фоторезиста: 1 – подложка; 2 – позитивный фоторезист; 3 – фотошаблон; 4 – экспонированная область фоторезиста; 5 – актиничное излучение.

Из сравнения рассмотренных процессов можно отметить следующее.

Первый вариант, использующий наложение двух последовательных экспозиций однослойного фоторезистивного покрытия, имеет преимущества перед вторым вариантом, использующим наложение двух фоторезистивных масок в том, что характеризуется малыми материальными, трудовыми и временными затратами. В то же время первый процесс

проигрывает второму в том, что этот первый процесс требует применения специальных технологических режимов проведения операций экспонирования и проявления, предварительного расчета этих режимов и более строго их соблюдения, чем в случае проведения стандартного технологического процесса.

В то же время второй вариант с использованием наложения двух фоторезистивных масок хотя и характеризуется возможностью использования стандартных режимов выполнения операций фотолитографического процесса, а, следовательно, не требует проведения специальных расчетов этих режимов, связан с увеличением материальных, трудовых и временных затрат.

Представляет интерес разработка такого процесса фотолитографии, который имел бы все преимущества, свойственные обоим рассмотренным выше вариантам фотолитографического процесса, и не имел бы присущих этим вариантам недостатков. А именно он должен:

- быть пригодным для реализации при использовании как позитивного, так и негативного фоторезистивного материала;
- позволять использование стандартных режимов проведения всех технологических операций обычного фотолитографического процесса, в частности, операций экспонирования фоторезиста и проявления фоторезистивного рельефа;
- использовать один слой фоторезиста и характеризоваться минимальными затратами материалов, труда и времени.

Схема возможного варианта фотолитографического процесса, способного удовлетворить трем указанным выше требованиям, приведена на рисунках 2–7.

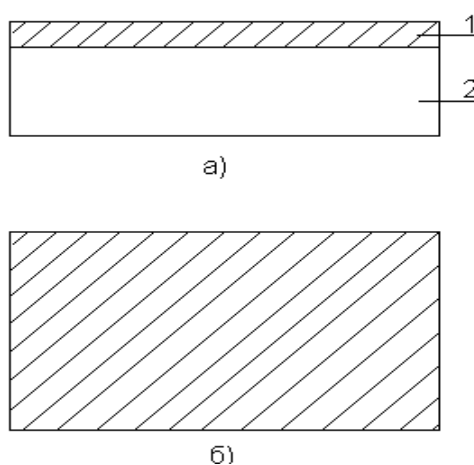
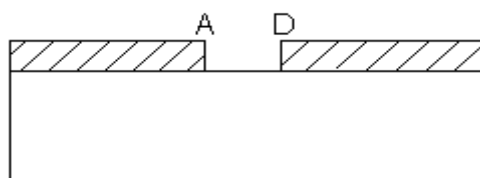
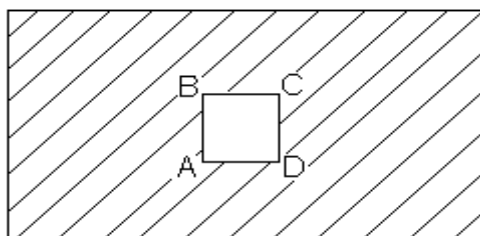


Рис. 2. Исходная подложка: а) поперечное сечение; б) вид сверху; 1 – слой диэлектрика-окисла кремния; 2 – пластина кремния.

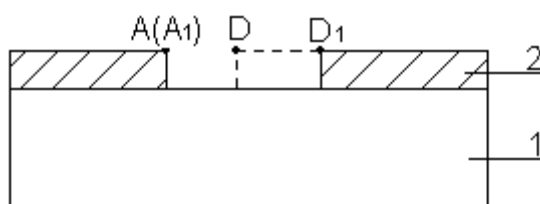


а)

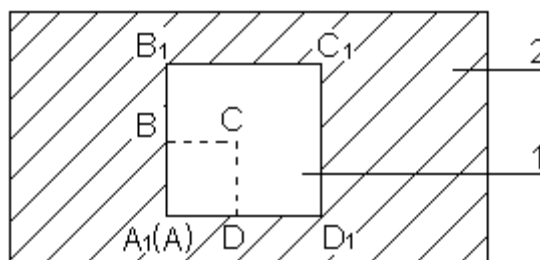


б)

Рис. 3. Окно в слое диэлектрика, подлежащее формированию в процессе фотолитографии: а) поперечное сечение; б) вид сверху.



а)



б)

Рис. 4. Маска на поверхности подложки после первого фотолитографического процесса по окислу кремния: а) поперечное сечение; б) вид сверху; 1 – пластина кремния; 2 – слой диэлектрика-окисла кремния;  $A_1B_1C_1D_1$  – фактическое окно в слое окисла после первого фотолитографического процесса; ABCD – окно, которое должно быть получено.

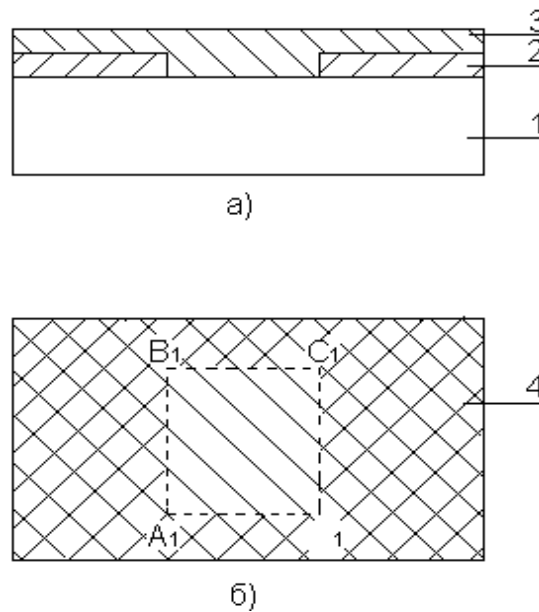


Рис. 5. Подложка после нанесения дополнительного слоя диэлектрика  $\text{Si}_3\text{N}_4$ : а) поперечное сечение; б) вид сверху; 1 – пластина кремния; 2 – слой диэлектрика-оксида кремния; 3 – слой нитрида кремния; 4 – комбинированный слой диэлектрика, состоящий из слоя диоксида кремния и нитрида кремния. Штриховыми линиями показаны границы окна  $A_1B_1C_1D_1$ , созданного на предыдущем этапе в слое оксида кремния и покрытого слоем  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

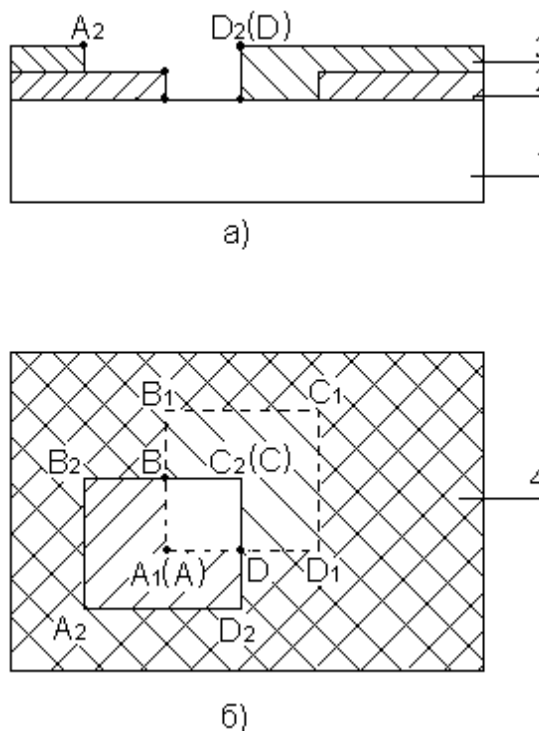
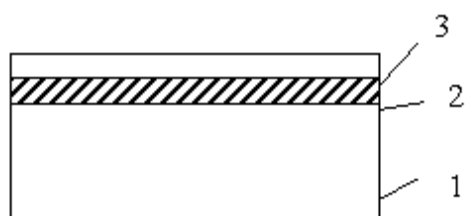
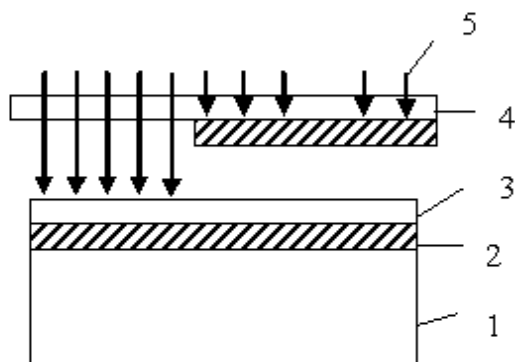


Рис. 6. Подложка после проведения второго фотолитографического процесса в слое  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – окно в форме квадрата  $A_2B_2C_2D_2$ : а) поперечное сечение; б) вид сверху; 1 – пластина кремния; 2 – слой диэлектрика-оксида кремния; 3 – слой нитрида кремния; 4 – комбинированный слой диэлектрика, состоящий из слоя диоксида кремния и нитрида кремния. Результирующее окно в диэлектрической маске – квадрат ABCD.

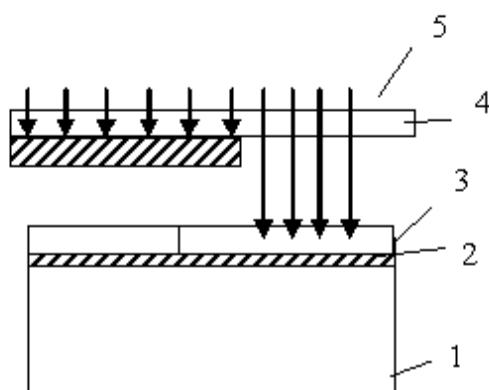




а) подложка с фоторезистивным слоем



б) первое экспонирование



в) второе экспонирование

Рис. 7. Начальный этап схемы экспериментального фотолитографического процесса:

1 – подложка; 2 – технологический слой; 3 – слой фоторезиста; 4 – фотошаблон;

5 – актиничное излучение.

На завершающем этапе экспериментального процесса выполняются стандартные операции фотолитографии – проявление и задубливание фоторезистивного рельефа, травление подложки через фоторезистивную маску и удаление фоторезистивной маски с поверхности подложки.

Рассмотренная схема процесса характеризуется простотой реализации, так как все операции в ней выполняются по стандартным технологическим режимам, а также малыми

материальными и трудовыми затратами, так как в ней используется однослойное фоторезистивное покрытие. Она позволяет изготовить образцы подложек, содержащие на поверхности рельефные рисунки из окисла кремния, металлического хрома и других материалов с минимальными размерами элементов, меньшими 1 микрометра.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Способ фотолитографии: патент 2 399 116 С1 Российская Федерация: МПК7 Н01 L 21/ 308 / Бухаров А. А., Начкин В. В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Морд. государственный университет им. Н. П. Огарева». – № 2 009 126 338/28, заявл. 08.07.2009; опубл. 10.09.2010.
2. Способ фотолитографии: патент 2 325 000 С1 Российская Федерация: МПК7 Н01 L 21/ 308 / Бухаров А. А., Шарамазанова М. М.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Морд. государственный университет им. Н. П. Огарева». – № 2 006 141 106/28, заявл. 20.11.2006, опубл. 20.05.2008.

**ЦЫГАНОВ Д. О., КОСЫРЕВ В. В., ФЕДОСЕЙКИН М. И.,**

**ДМИТРИЕВ В. Н., НИКУЛИН В. В.**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ТЕРМИНАЛА  
ДЛЯ ПОСТА ГАЦ РЖД**

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы разработки аппаратно-программного комплекса, позволяющего в автоматическом режиме осуществлять контроль параметров наработки блоков СГ-76У на механизированной горке. Внедрение комплекса способствует повышению эффективности использования рабочего времени обслуживающего персонала поста горочной автоматической централизации крупного железнодорожного узла – станции Рузаевка (Республика Мордовия).

**Ключевые слова:** сортировочная горка, PIC, повышение эффективности, программно-аппаратный комплекс, Visual C++, .NET Framework, MPLAB, Assembler.

**TSYGANOV D. O., KOSYREV V. V., FEDOSEIKIN M. I.,**

**DMITRIEV V. N., NIKULIN V. V.**

**MICROPROCESSOR TERMINAL FOR HUMP YARD OF RUSSIAN RAILWAYS**

**Abstract.** This article considers the issues of the development of a hardware and software system to automate the performance monitoring of SG-76U blocks at hump yard. The system introduction enhances time efficiency of the staff operating the hump yard post in a large railway junction – Ruzaevka Station (Republic of Mordovia).

**Keywords:** hump yard, PIC, efficiency enhancement, software and hardware system, Visual C++, .NET Framework, MPLAB, Assembler.

Системы автоматического регулирования и управления являются неотъемлемой и очень важной частью системы регулирования движения поездов. Они обеспечивают эффективное управление, при этом поддерживая высокий уровень безопасности и надежности железнодорожного транспорта. В стратегической программе развития ОАО «РЖД» отмечается важность дальнейшего развития, модернизации и внедрения систем автоматизации [1].

В настоящее время на железнодорожных станциях, в частности, на станции Рузаевка (Республика Мордовия), применяются так называемые сортировочные горки, включающие в себя системы горочной автоматической централизации (ГАЦ). В процессе эксплуатации этих систем в обязательном порядке производится учет числа срабатываний стрелочно-пусковых блоков СГ-76У, которые, согласно приложению № 3 к инструкции ЦШ-762-10, имеют фиксированное время наработки, после чего требуется обязательная замена стрелочно-

пускового блока СГ-76У. Ресурс блока СГ-76У – 1 млн. срабатываний. Из-за отсутствия технических средств, подсчет количества срабатываний блоков осуществляется ручным способом, на основании данных сортировочных листов для роспуска составов. Это приводит к неэффективному использованию рабочего времени обслуживающего персонала поста ГАЦ.

Целью описанного проектирования является создание программно-аппаратного комплекса, позволяющего автоматизировать процесс учета числа срабатываний блоков СГ-76У с сохранением всех полученных данных в компьютере. Это позволяет в конечном итоге повысить эффективность использования рабочего времени персонала и освободить его от однообразной работы.

Структурная схема аппаратной части спроектированного комплекса показана на рисунке 1.

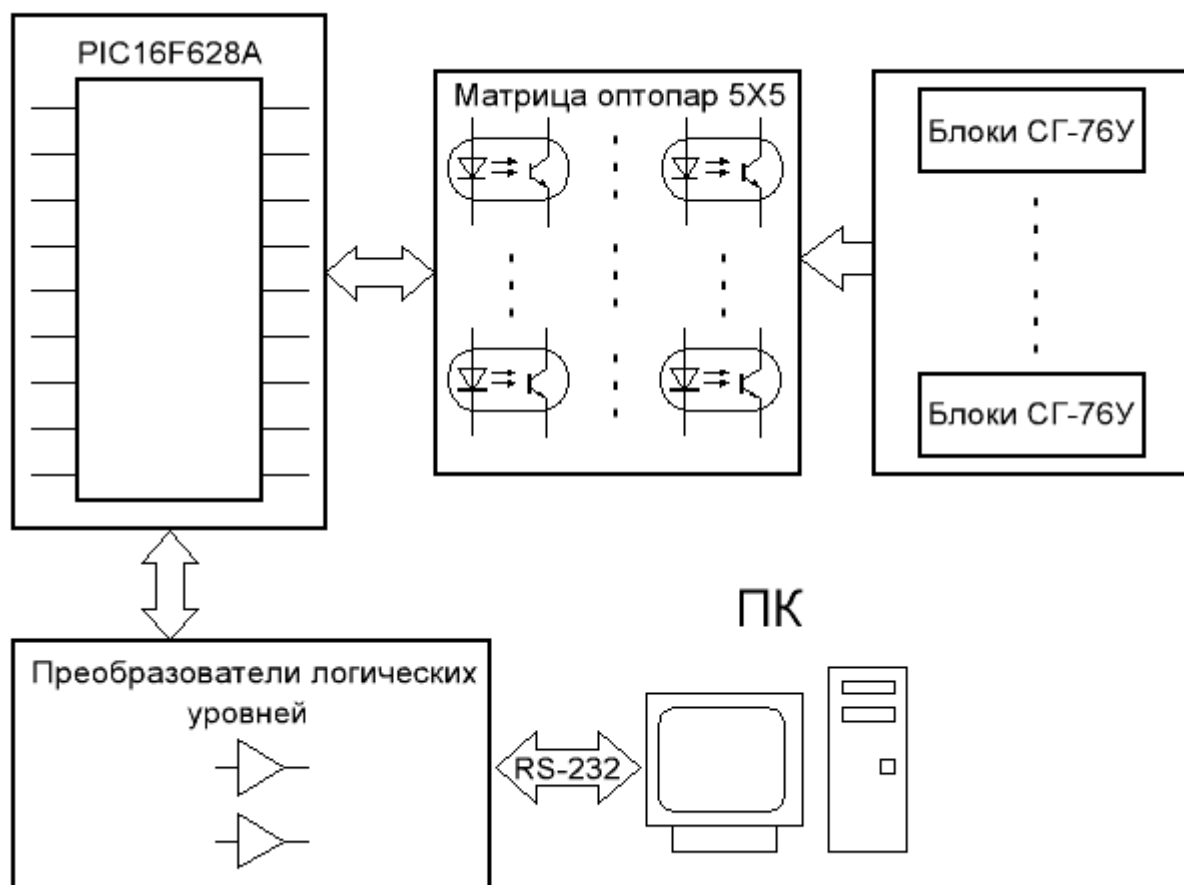


Рис. 1. Структурная схема аппаратной части микропроцессорного комплекса.

Блоки СГ-76У имеют в своем составе сухие контакты, изменяющие свое состояние при срабатывании блоков. Это позволяет получать информацию о состоянии блоков в электрической форме, подключив к ним аппаратную приставку на основе микроконтроллера PIC16F628A. Выбор данного микроконтроллера объясняется тем, что он отличается от

описанного в [2] большим размером памяти и наличием необходимого в данном проекте периферийного модуля USART. В то же время он является более новым и совершенным, что позволило быстро и без каких-либо трудностей перейти к его применению. Подробная техническая информация о данном микроконтроллере приведена в [3].

Согласно техническому заданию, требовалось подключить к аппаратной приставке 23 блока СГ-76У. Для этого было принято решение организовать из оптических пар матрицу размерностью 5x5, что позволяет отслеживать состояние 25-ти блоков. Опрос матрицы производится микроконтроллером динамическим методом, что позволяет существенно сократить число затрачиваемых для этого выводов портов микроконтроллера, соблюдая при этом требуемый временной режим. Данные о состоянии блоков обрабатываются микроконтроллером, кодируются и далее, через преобразователь логических уровней и интерфейс связи RS-232, поступают в персональный компьютер. На персональный компьютер под управлением операционной системы Microsoft Windows XP/Vista/7 с установленным программным пакетом .NET Framework версии не ниже 3.5 установлено специально спроектированное программное обеспечение, которое принимает переданные аппаратной приставкой данные, декодирует их, отображает информацию обо всех произошедших событиях и производит сохранение данных.

Программное обеспечение для микроконтроллера создано в среде Microchip MPLAB на низкоуровневом языке Assembler. Программное обеспечение для персонального компьютера – в среде Microsoft Visual Studio 2010 на языке Visual C++. Логика работы программ такова, что изначально аппаратная приставка ожидает от программы на персональном компьютере запроса данных. После получения такого запроса, микроконтроллер производит считывание состояния каждой из 25-ти оптических пар, после чего обрабатывает данные, кодирует их в вид, удобный для передачи, и передает. В свою очередь, ПО на компьютере, после отправки запроса данных в аппаратную приставку, начинает отсчет некоторого количества времени, в течение которого должен прийти ответ. В случае, если ответ не приходит, предпринимается еще 4 попытки получить данные. Если и в этом случае ответ не получен, в журнал заносится событие с указанием того, что приставка не отвечает. Попытки получить данные продолжают. Внешний вид пользовательского интерфейса программного обеспечения показан на рисунке 2.

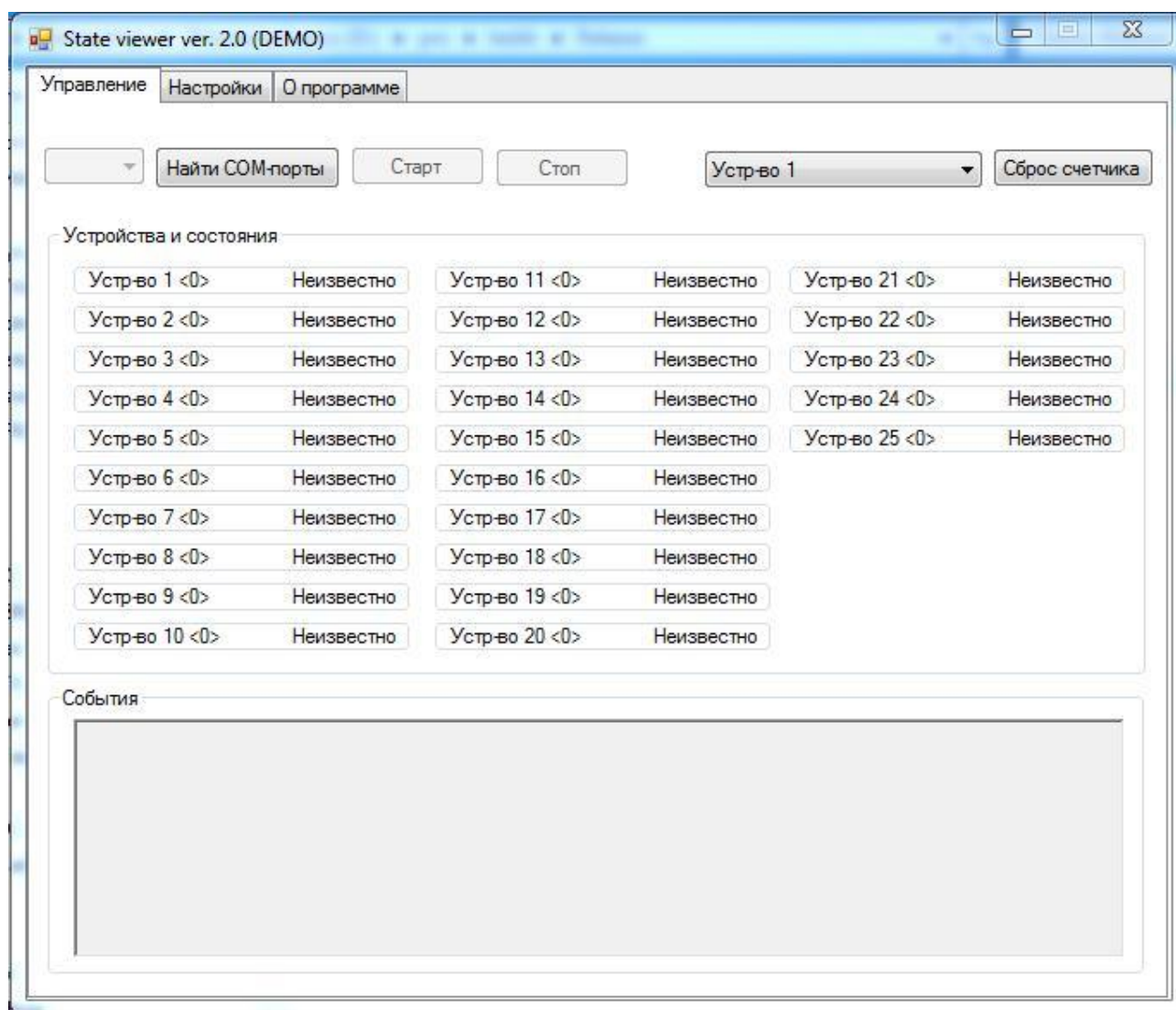


Рис. 2. Внешний вид пользовательского интерфейса программного обеспечения.

В меню настроек программного обеспечения можно изменять названия всех контролируемых устройств, а также названия их состояний. Это позволяет указать в программе внутренние служебные названия каждого из блоков СГ-76У и их состояния.

Сотрудниками ОАО «РЖД» станции Рузаевка (Республика Мордовия) был произведен анализ и сравнение времени, затрачиваемого на выполнение работ по отслеживанию времени наработки блоков СГ-76У вручную и с помощью предложенного спроектированного комплекса. Результаты представлены на рисунках ниже (см. рис. 3-4):

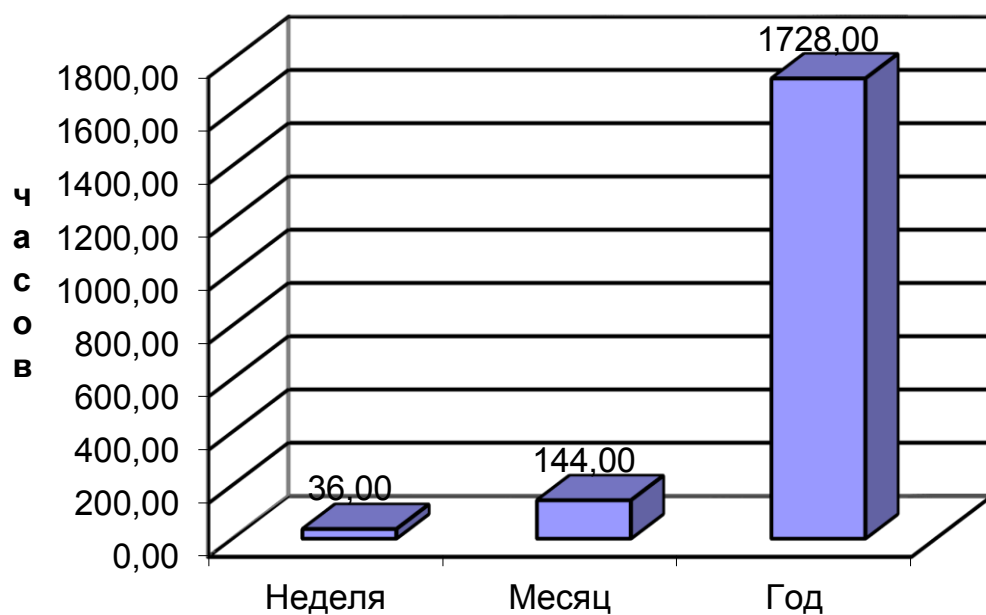


Рис. 3. Затраты рабочего времени без использования программно-аппаратного комплекса.

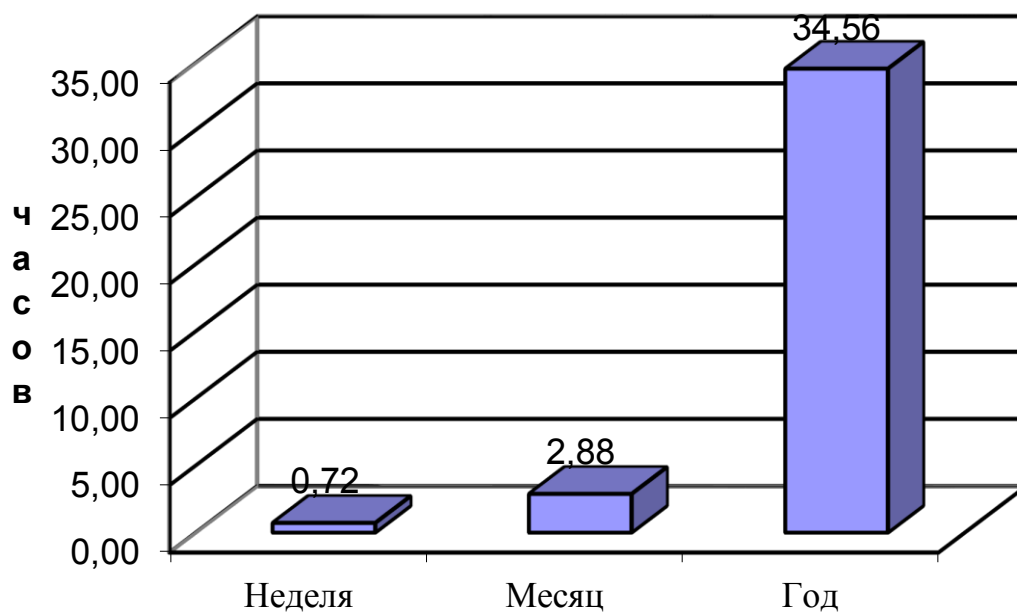


Рис. 4. Затраты рабочего времени с использованием программно-аппаратного комплекса.

Также сотрудниками ОАО «РЖД» станции Рузаевка (Республика Мордовия) произведен подсчет годовых затрат денежных средств (см. рис. 5):

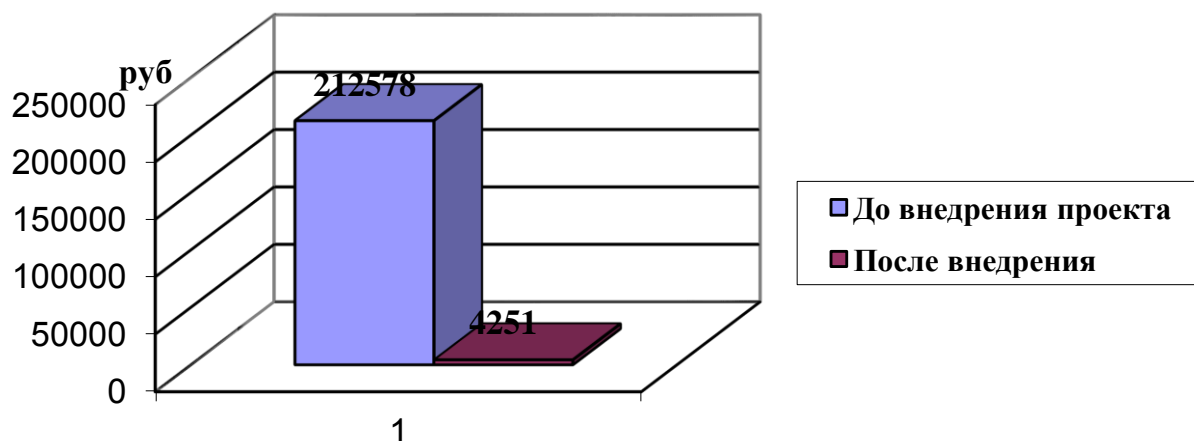


Рис. 5. Сравнение затрат денежных средств.

Очевидно, что применение разработанного программно-аппаратного комплекса дает большой положительный экономический эффект, поэтому в настоящий момент происходит внедрение и испытание программно-аппаратного комплекса на железнодорожном узле станции Рузаевка (Республика Мордовия).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Официальный сайт ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rzd.ru/>.
2. Дубровин В. С., Никулин В. В., Цыганов Д. О. Автоматизированный детектор кода азбуки Морзе // XXXIX Огаревские чтения: материалы научной конференции. Технические науки. В 3 ч. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2011. – Ч. 1. – С. 240–242.
3. Microchip Technology Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.microchip.com/>.



**БЕСПАЛОВ Н. Н., ИЛЬИН М. В., КАПИТОНОВ С. С., ЕВИШЕВ А. В.**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЦЕПЯХ С**  
**ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ГРУППОВЫМ СОЕДИНЕНИЕМ СИЛОВЫХ**  
**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ПРИ ИХ ВЫКЛЮЧЕНИИ**

**Аннотация.** Проведено моделирование последовательного группового соединения силовых полупроводниковых приборов при различных значениях параметров снабберных цепей. Сделаны выводы о возможностях оптимизации значений параметров снабберных цепей.

**Ключевые слова:** силовой полупроводниковый прибор, последовательное групповое соединение, переходный процесс, коммутационное перенапряжение, снабберная цепь.

**BESPALOV N. N., ILYIN M. V., KAPITONOV S. S., EVISHEV A. V.**  
**A STUDY OF THE PROCESSES IN CIRCUITS WITH SERIAL GROUP CONNECTION**  
**OF POWER SEMICONDUCTOR DEVICES WHEN SWITCHING OFF**

**Abstract.** A simulation of serial group connection of power semiconductor devices at various values of the parameters of snubber circuits is carried out. Conclusions are made about the possibilities of optimizing of the parameters of snubber circuits.

**Keywords:** power semiconductor device, serial group connection, transient process, switching overvoltage, snubber circuit.

Нестабильность технологического процесса обуславливает появление разброса значений электрических и тепловых параметров силовых полупроводниковых приборов (СПП) [1; 2]. Это приводит к тому, что при групповом последовательном соединении СПП в одном вентильном плече могут оказаться приборы с различными значениями параметров. Это связано также с отсутствием информации о значениях параметров каждого отдельно взятого прибора [3; 4].

Вариация электрических и тепловых параметров СПП последовательной цепи обуславливает возникновение разброса значений температуры их полупроводниковых структур (ПС)  $T_j$ , что вызывает возникновение в вентильном плече режимов работы неблагоприятных для отдельных приборов. Поэтому исследование процессов в СПП при их групповом последовательном включении является актуальной задачей силовой электроники, решение которой позволит повысить надежность как отдельных приборов, входящих в состав устройства силовой электроники (УСЭ), так и самого УСЭ.

На основе разработанной в среде Multisim модели СПП [5; 6], создана модель, позволяющая исследовать процессы, протекающие в цепях с последовательным групповым соединением приборов.

Для объективного понимания электрических процессов в СПП при их групповом последовательном включении рассмотрено распределение напряжения на вентильном плече, состоящем из трех силовых диодов. Выбор данного количества СПП объясняется тем, что такое соединение приборов в вентильном плече широко используется в УСЭ с фазовым регулированием мощности в нагрузке [7; 8].

Обобщенная схема расчета процессов в СПП при их групповом последовательном включении представлена на рисунке 1.

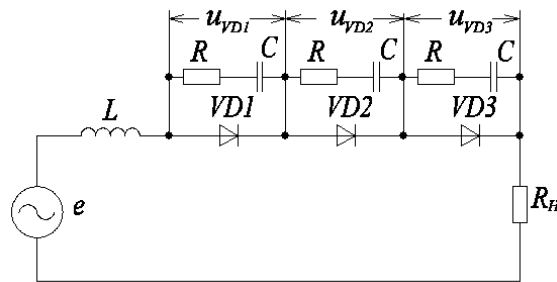


Рис. 1. Последовательное соединение диодов вентильного плеча.

На рисунке 1 введены следующие обозначения:  $e$  – источник питающего напряжения;  $R_H$  – сопротивление нагрузки;  $VD\ 1, 2, 3$  – исследуемые диоды;  $L$  – сумма индуктивностей контура;  $R$  – резистор защитной снабберной цепи;  $C$  – конденсатор защитной снабберной цепи.

Для исследования выбрана модель диода Д161-200 со значением  $I_{FAV_m} = 200$  А. Проведено моделирование схемы последовательного соединения СПП без защитных снабберных  $RC$ -цепей. Амплитудное значение напряжения источника питающего напряжения  $e$  составляет 4,5 кВ, частотой 50 Гц. Значение максимально допустимой температуры ПС диодов Д161-200 равно  $T_{jm} = 190$  °С, однако в реальности тепловой режим приборов рассчитывается исходя из условия, чтобы величина  $T_j$  находилась в пределах 70–90 °С. При этом величина индуктивности выбрана из соображений увеличения длительности тока в пределах от 10 мс до 12 мс и составила  $L = 10$  мГн.

В силовой электронике наиболее распространенным способом борьбы с неравномерным распределением напряжения по приборам вентильного плеча и коммутационными перенапряжениями, возникающими в УСЭ, является использование защитных снабберных  $RC$ -цепей (рис. 1).

Проведено исследование работы УСЭ (рис. 1), работающего на активно-индуктивную нагрузку, при разбросе значений температуры ПС СПП в пределах технологического разброса (рис. 2). Величины параметров снабберных цепей составляют  $R = 20$  Ом,  $C = 1$  мкФ, значение суммарной индуктивности контура коммутации  $L = 10$  мГн.

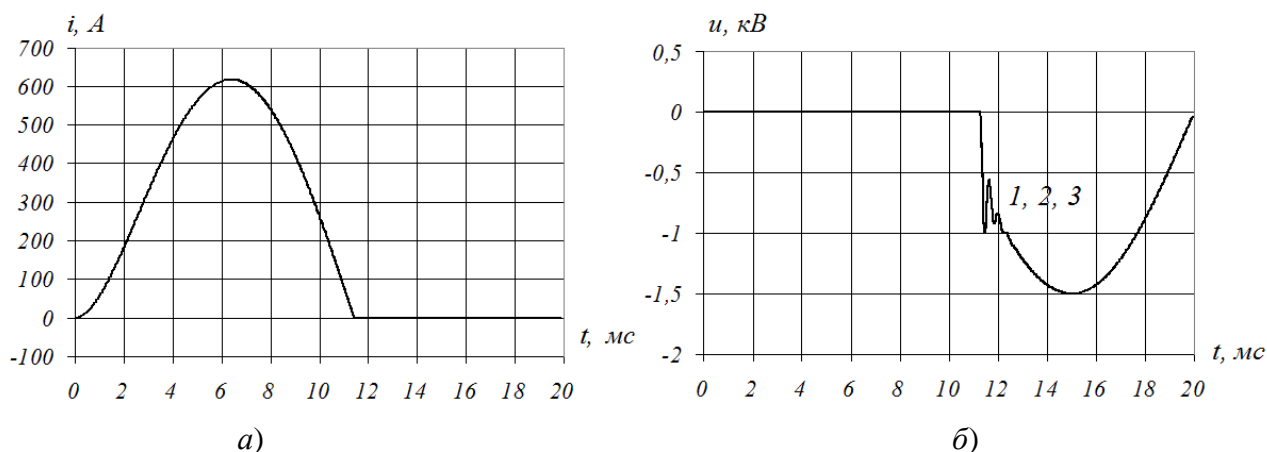


Рис. 2. Ток, протекающий через приборы вентильного плеча (а) и распределение напряжения по СПП при  $T_{j1} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б кривая 1),  $T_{j2} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б кривая 2),  $T_{j3} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б кривая 3) и величинах параметров снабберных цепей  $R = 20\text{ }\Omega$  и  $C = 1\text{ }\mu\text{F}$ .

Из рисунка 2 видно, что снабберные цепи обеспечивают равномерное распределение напряжения по приборам вентильного плеча. Амплитуда напряжения на каждом из приборов не превышает значения класса, равного 1,5 кВ. Однако значения емкости снабберного конденсатора  $C = 1\text{ }\mu\text{F}$  недостаточно, чтобы ограничить скорость нарастания напряжения в момент выключения приборов. При значении  $C = 1\text{ }\mu\text{F}$  характер изменения напряжения на СПП последовательной группы является колебательным, что противоречит требованиям к напряжению на приборах при их выключении, описанным ранее.

Зависимости напряжения на приборах вентильного плеча при переходном процессе их выключения представлены на рисунке 3.

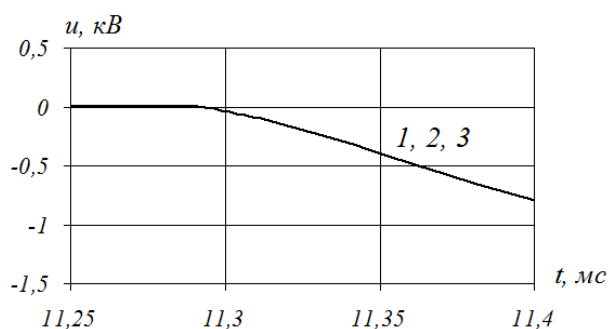


Рис. 3. Напряжения на приборах вентильного плеча при их выключении при  $T_{j1} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$  (кривая 1),  $T_{j2} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (кривая 2),  $T_{j3} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  (кривая 3) и величинах параметров снабберных цепей  $R = 20\text{ }\Omega$  и  $C = 1\text{ }\mu\text{F}$ .

Рисунок 3 показывает, что при использовании защитных снабберных цепей СПП последовательной группы выключаются одновременно, но для ограничения коммутационных перенапряжений нужно увеличить значение емкости снабберного конденсатора, что приведет к увеличению мощности снабберного резистора.

На практике в УСЭ часто применяется схема встречного включения последовательных тиристорных цепей (рис. 4).

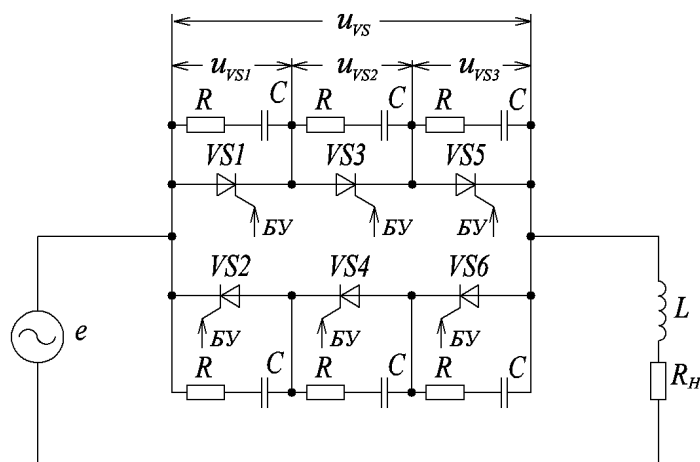


Рис. 4. Встречное включение последовательных тиристорных цепей.

На рисунке 4 введены следующие обозначения: VS 1–6 – исследуемые тиристоры; БУ – блок управления.

Режим работы СПП в схеме, представленной на рисунке 4, усугубляется тем, что при работе вентильного плеча параллельно с ним включена цепь, состоящая из защитных снабберных цепей встречно включенной последовательной цепи. В результате происходит перераспределение токов, протекающих в данной цепи, что отрицательно сказывается на работе УСЭ.

На рисунке 5 представлены напряжения на приборах вентильного плеча и на всем плече при работе схем последовательного включения СПП (рисунок 1) и встречного включения последовательных цепей приборов (рисунок 4).

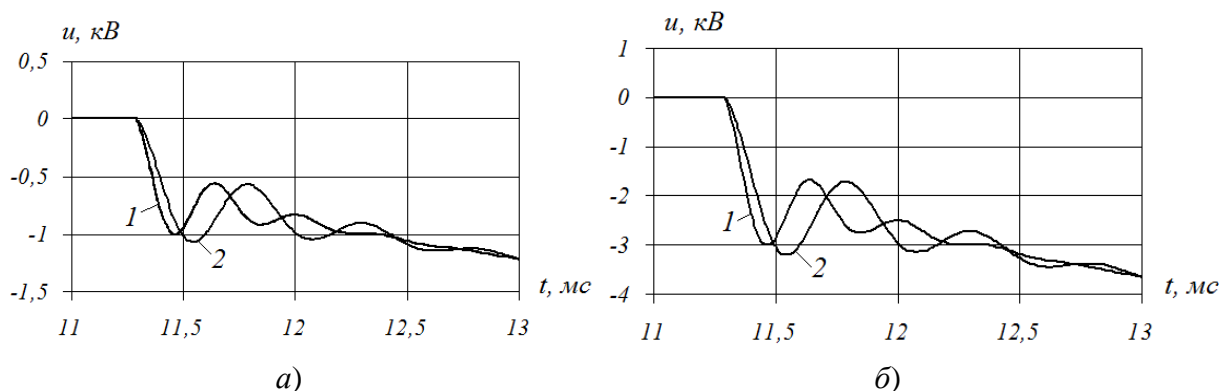


Рис. 5. Напряжения на приборах вентильного плеча (а) и вентильном плече (б) при работе схем последовательного включения СПП (кривая 1) и встречного включения последовательных цепей приборов (кривая 2).

Из рисунка 5 видно, что в схеме последовательного соединения приборов (рис. 1) значение скорости нарастания напряжения как на отдельных приборах, так и на вс ем

вентильном плече, превышает скорость нарастания напряжения в схеме встречного включения последовательных цепей приборов (рисунок 4). Однако значение амплитуды напряжения на СПП при исследовании схемы, представленной на рисунке 4, превышает значение амплитуды напряжения на приборах в схеме последовательного соединения при одинаковых режимах их работы. Таким образом, для обеспечения защиты приборов вентильного плеча от различного рода перенапряжений нужно подбирать значения параметров защитных снабберных цепей отдельно для каждой схемы.

Исследован режим работы схем последовательного группового соединения СПП и встречного включения последовательных цепей приборов при значении емкости снабберного конденсатора  $C = 10$  мкФ. На рисунке 6 представлены результаты исследования.

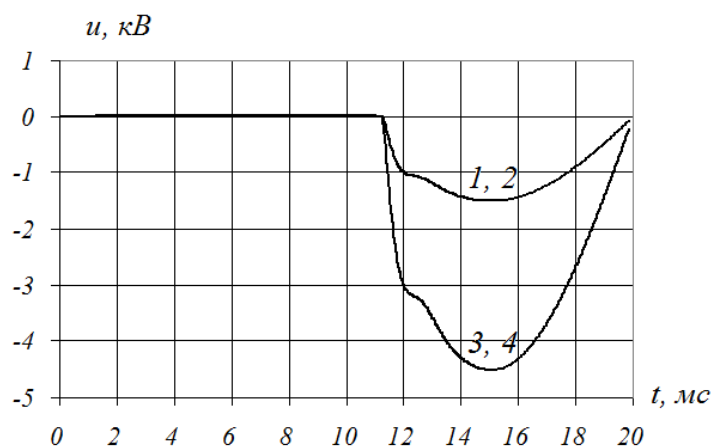


Рис. 6. Напряжения на приборах вентильного плеча (кривые 1, 2) и вентильном плече (кривые 3, 4) при работе схем последовательного включения СПП (кривые 1, 3) и встречного включения последовательных цепей приборов (кривые 2, 4).

Из рисунка 6 заметно, что напряжения как на отдельных приборах, так и на вентильном плече, исследуемых схем совпадают, вследствие использования снабберного конденсатора с большим значением емкости. Емкости снабберного конденсатора  $C = 10$  мкФ достаточно, чтобы обеспечить равномерное распределение по приборам вентильного плеча в состоянии низкой проводимости и ограничить коммутационные перенапряжения на них при выключении.

Для схемы встречного включения тиристоров (рис. 4) требуется ограничить скорость нарастания напряжения на приборах, поскольку ко встречно включенным приборам оно прикладывается в прямом направлении и способно перевести их в состояние высокой проводимости. Для тиристоров, рассчитанных на значения предельного тока  $I_{TAVm} = 200$  А, значение критической скорости нарастания напряжения  $(du_D/dt)_{crit}$  в закрытом состоянии в соответствии с [2] равно 20–1000 В/мкс, в то время, как в исследуемой схеме  $du_D/dt = 300$  В/мкс, поэтому емкости  $C = 10$  мкФ для данной схемы может не хватить для

того, чтобы ограничить скорость нарастания напряжения на приборах. Столь большое значение емкости снабберного конденсатора обусловлено тем, что для исследования выбрана завышенная величина индуктивности контура коммутации  $L = 10$  мГн, которая очень редко встречается на практике. Кроме того, через ПС СПП протекает ток величиной, равной предельному среднему току, при котором в реальных условиях приборы также эксплуатируются в крайних случаях.

Для минимизации значений параметров защитных снабберных цепей нужно осуществлять подбор СПП для группового последовательного соединения по значениям их параметров, таким образом, чтобы обеспечить одинаковые тепловые режимы приборов в установившемся режиме [9; 10]. При отсутствии разброса значений температуры ПС  $T_j$  приборов вентильного плеча напряжение в СНП распределяется по приборам последовательной группы равномерно [11; 12], однако, в момент выключения приборов на них образуется коммутационное перенапряжение, возникающее вследствие наличия индуктивности в контуре коммутации, которое в любом случае следует ограничивать с помощью снабберных цепей.

Для обеспечения защиты от перенапряжений СПП при их последовательном групповом соединении значения параметров снабберных  $RC$ -цепей следует рассчитывать для конкретной схемы УСЭ и определенного режима его работы. Для ограничения различного рода перенапряжения значения емкости снабберного конденсатора может увеличиться до десятков мкФ в предельных режимах работы УСЭ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С. Исследование температурной зависимости тока обратного восстановления силовых полупроводниковых приборов // XL Огаревские чтения: материалы научной конференции: в 3 ч. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. – Ч. 3. – С. 234–238.
2. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С. Исследование вариации величины заряда обратного восстановления силовых полупроводниковых приборов [Электронный ресурс] // Электроника и информационные технологии. – 2011. – Вып. 2 (11). – Режим доступа: [http://fetmag.mrsu.ru/2011-2/pdf/reverse\\_recovery\\_charge.pdf](http://fetmag.mrsu.ru/2011-2/pdf/reverse_recovery_charge.pdf) –0421100067/0026.
3. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С. Испытательная аппаратура для определения электрических и тепловых параметров и характеристик силовых полупроводниковых приборов [Электронный ресурс] // Электроника и информационные технологии. – 2012. – Вып. 1 (12). – Режим доступа: <http://fetmag.mrsu.ru/2012-1/pdf/Bespalov%20Ilin%20Kapitonov.pdf> – 04201200067/0004.
4. Bepalov N. N., Ilyin M. V., Kapitonov S. S. Current generator for testing power

semiconductor devices in high conduction state // 11th International conference on actual problems of electronic instrument engineering, APEIE 2012. – Novosibirsk: IEEE, 2012. – № 1. – P. 143–147.

5. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Лебедев С. В. Разработка и исследование электротепловых моделей силовых полупроводниковых приборов основных типовых конструкций // Естественные и технические науки. – 2011. – № 6. – С. 405–412.

6. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Лебедев С. В. Моделирование процессов в силовых полупроводниковых приборах при их групповом последовательном включении в среде Multisim // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 4. – С. 30–35.

7. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С. Выравнивание напряжений на последовательно распределенных силовых полупроводниковых приборах в состоянии низкой проводимости // Нелинейный мир. – 2011. – № 8. – С. 500–506.

8. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Капитонова А. В. Методика подбора силовых полупроводниковых приборов для групповых последовательных цепей устройств силовой электроники // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 1. – С. 65–68.

9. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Лебедев С. В. Определение минимальных величин емкостей снабберных цепей для ограничения коммутационных перенапряжений на силовых полупроводниковых приборах при их выключении // Естественные и технические науки. – 2011. – № 6. – С. 396–404.

10. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С. Моделирование распределения напряжения по силовым полупроводниковым приборам в состоянии низкой проводимости при их последовательном групповом соединении // Техническая электродинамика. – Тем. вып. – 2011. – С. 270–275.

11. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С. Аппаратно-программный комплекс для испытания и диагностики силовых полупроводниковых приборов // Труды VIII междунар. (XIX всеросс.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: 2 т. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 362–364.

12. Беспалов Н. Н., Капитонов С. С., Пьянзин И. И. Моделирование характеристик силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости // Электроника и информационные технологии [Электронный ресурс]. – 2010. – Вып. 2 (9). – Режим доступа: <http://fetmag.mrsu.ru/2010-2/pdf/LowConductivity.pdf> – 04201000067/0036.