



eISSN 2311-2468
Том 7, № 11. 2019
Vol. 7, no. 11. 2019

электронное периодическое издание
для студентов и аспирантов

Огарёв-онлайн Ogarev-online

<https://journal.mrsu.ru>



ШИШОВ О. В., ЗАВОДУНОВ А. О., КРАСУЛИН И. М.
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
НАСОСНОЙ СТАНЦИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННЫХ
МЕТОДОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЕЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Аннотация. Рассматривается разработка системы управления насосной станцией с использованием комбинированных методов регулирования производительности. Система управления разрабатывалась на базе аппаратных средств и программного обеспечения компаний Schneider Electric и Weintek.

Ключевые слова: насосная станция, промышленная автоматизация, программируемые логические контроллеры, частотное регулирование.

SHISHOV O. V., ZAVODUNOV A. O., KRASULIN I. M.
DEVELOPMENT OF PUMPING STATION CONTROL SYSTEM
WITH COMBINED METHODS OF PERFORMANCE CONTROL

Abstract. The development of the pumping station control system with the use of combined methods of performance control is considered. The control system was developed on the basis of hardware and software by Schneider Electric and Weintek.

Keywords: pumping station, industrial automation, programmable logic controllers, frequency control.

Ведущее место в отраслях сельского хозяйства и животноводства сегодня занимают интегрированные объединения компаний, обеспечивающее полный цикл производства, переработки и реализации продукции по принципу «от поля до прилавка». Входящие в такие объединения крупные животноводческие и перерабатывающие предприятия остро нуждаются в надежном обеспечении ресурсами, в том числе водой.

К подобным объединениям относится группа компаний «Талина», которая выступила заказчиком проекта по созданию насосной станции подачи воды на свинофермы. Одной из задач проекта являлась разработка системы управления этой насосной станцией. Главной целью, поставленной перед разработчиками системы управления насосной станцией, являлось обеспечение бесперебойной подачи воды и использование энергосберегающих методов регулирования ее производительности.

В процессе работы система управления должна обеспечивать:

- поддержание заданного давления на выходе насосной станции;
- возможность работы насосов насосной станции в ручном и автоматическом режиме;

- автоматическое переключение основного/дополнительных насосов в соответствии с диагностированными авариями насосов;
- контроль аварий преобразователя частоты;
- контроль датчика давления «на обрыв»;
- защита насосной станции от «сухого хода».

Кроме этого, система управления должна была поддерживать развитый человеко-машинный интерфейс, который позволял бы отображать текущее состояние станции и ее агрегатов, а также оперативно извещал о наступлении аварийных состояний.

Прежде чем приступать к разработке проекта, необходимо было рассмотреть принципы организации регулирования подачи воды на подобные объекты, определиться с количеством насосов, их мощностью, выбрать элементную базу построения системы управления.

Были рассмотрены способы регулирования подачи воды, проанализированы присущие им положительные и отрицательные моменты. Как известно, они делятся на три типа: количественные, качественные и комбинированные. Качественные способы подразумевают под собой регулирование за счет изменения характеристик насоса, количественные – за счет изменений сети подачи воды, когда характеристики насоса остаются неизменными. К качественным методам, применяемым сегодня на практике, можно отнести метод частотного регулирования – изменение подачи производится изменением частоты вращения привода насоса. К количественным относят: дросселирование – метод заключающийся в установке на отводящем патрубке устройства (дросселя), которое будет изменять характеристики отводящей трубы и тем самым напор подаваемой жидкости; перепуск – в этом случае при достижении определенного давления излишки воды будут сбрасываться в подводящий патрубок; ступенчатое включение насосов – характеристики подачи в этом случае будут определяться количеством насосов, работающих в параллельных ветвях сети подачи воды. На практике встречаются различные комбинации этих методов, позволяющие порой добиться наилучших эксплуатационных характеристик систем подачи воды.

В качестве метода регулирования производительности насосной станции было решено использовать именно комбинацию основных методов – метода частотного регулирования со ступенчатым включением насосов. Суть его заключается в следующем. Насосами оснащаются несколько параллельных ветвей сети трубопроводов подачи воды. Один из насосов (его условно при этом называют «основным») подключается к частотному

преобразователю, который изменяет подачу воды плавно. В случае, когда основной насос не справляется, в сеть подачи воды подключается необходимое число параллельных ветвей с насосами, работающими напрямую.

Выбор данного комбинированного метода обусловлен несколькими положительными факторами. Если для обеспечения плавного регулирования подачи воды использовать лишь метод частного регулирования, то это потребует применения достаточно мощного насоса, и соответственно мощного частотного преобразователя. При выходе их из строя подача воды прекратится полностью. При использовании комбинированного метода применяются несколько насосов меньшей мощности и один частотный преобразователь также меньшей мощности. Это сразу позволяет увеличить надежность работы насосной станции и существенно снизить затраты на приобретение частотного преобразователя. При использовании интеллектуальной системы управления удастся добиться еще большего. В случае выхода из строя одного из насосов система управления может переключиться на использование других и подавать воду, в то время, когда сломанный насос можно будет обслуживать и ремонтировать. Но самое главное, систему управления можно реализовать так, чтобы была возможность переключать частотный преобразователь от одного насоса к другому, в зависимости от их работоспособности и так, чтобы можно было усреднить время их наработки.

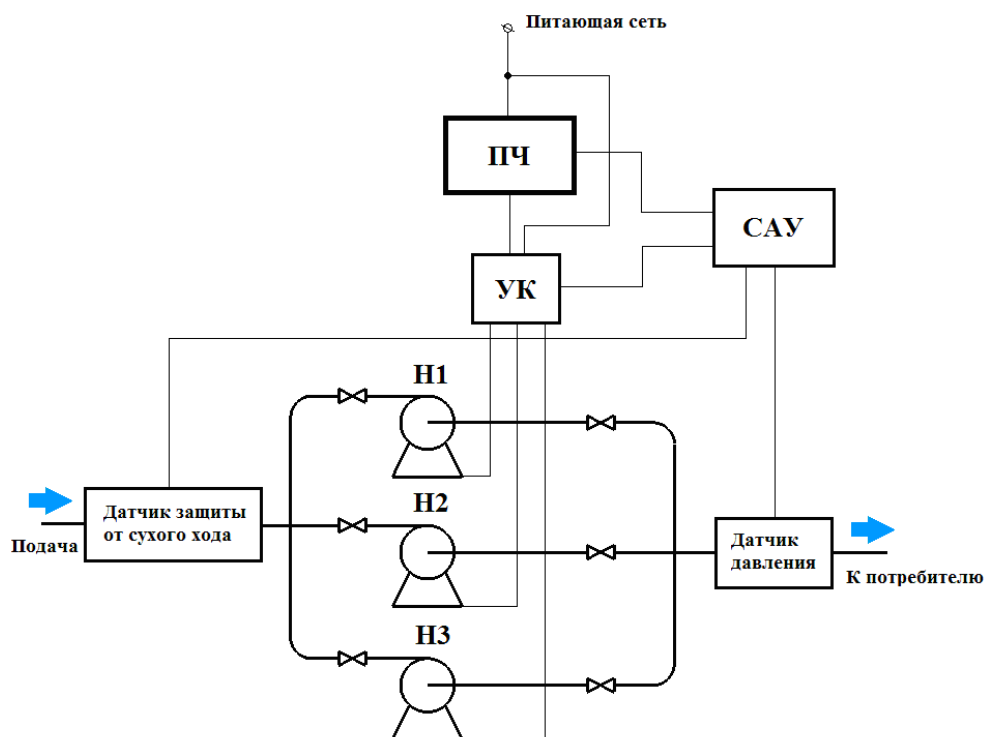


Рис. 1. Структурная схема насосной станции.

Таким образом, была принята структурная схема насосной станции, показанная на рисунке 1. Система автоматического управления (САУ) осуществляет выбор того, какой из насосов (Н1...3) будет выполнять роль основного, и с помощью устройства коммутации (УК) подключает к нему преобразователь частоты (ПЧ). Число включенных насосов и частота вращения основного насоса определяется по сигналу датчика давления, исходя из необходимости получения заданного напора воды на выходе насосной станции и его плавного регулирования.

Состав системы представлен на рисунке 2.

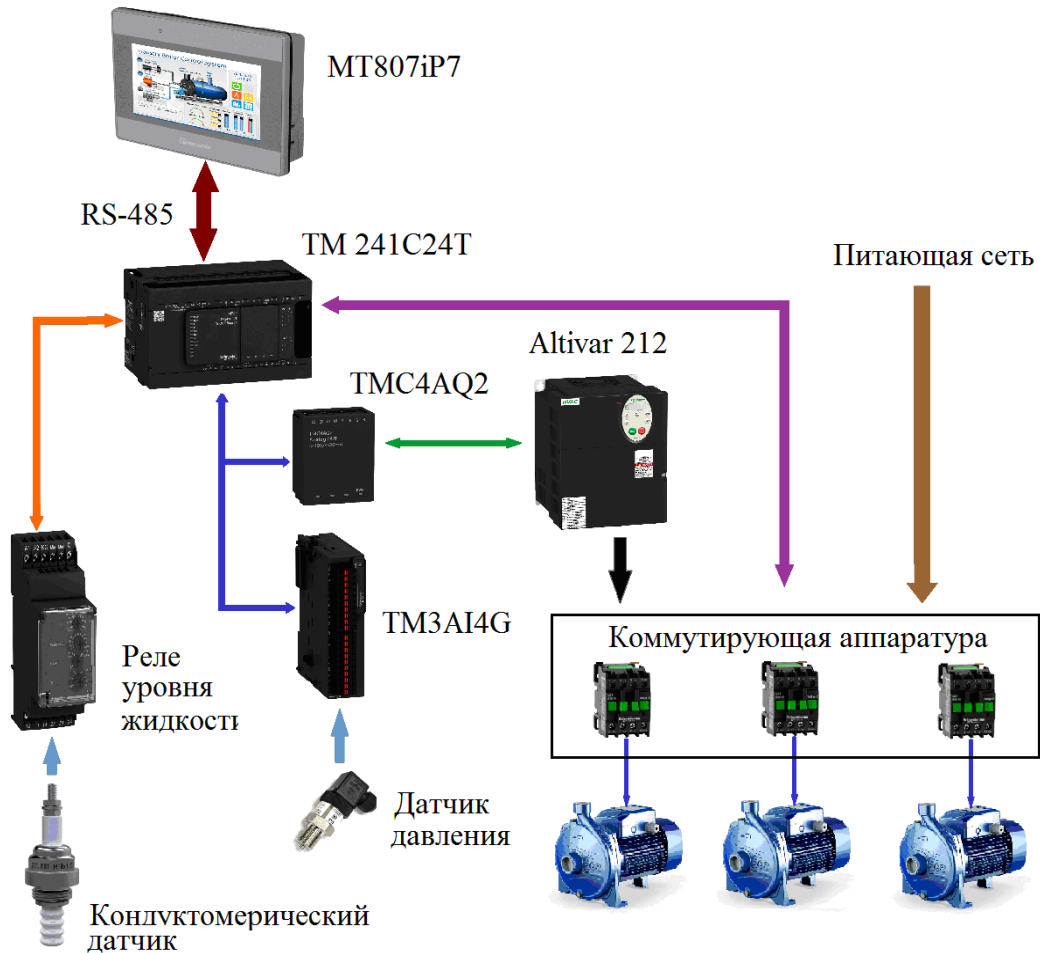


Рис. 2. Состав системы управления насосной станцией.

Система управления была реализована на программируемом логическом контроллере TM241C24T компании Schneider Electric. Регулирование в программе контроллера осуществляется с помощью функционального блока ПИД регулятора. Для расширения количества входов-выходов контроллера используются модули аналогового ввода/вывода компании Schneider Electric. К контроллеру они подключены по внутренней

шине. К аналоговым входам модуля TM3AI4G подключены датчики давления и температуры, к выходу аналогового модуля – преобразователь частоты. Для управления частотно регулируемым приводом используется преобразователь частоты Altivar 212 компании Schneider Electric. Человеко-машинный интерфейс реализован на панели оператора компании Weintek. Она позволяет эргономично и с достаточной разрешающей способностью на экране отображать и задавать необходимые параметры установки, а также извещать об авариях. Для контроля давления используется датчик давления компании OVEN. Для защиты от сухого хода используется реле уровня жидкости компании Schneider Electric и кондуктометрический датчик типа свеча.

Программа работы контролера разрабатывалась на языке FBD в пакете SoMachine Logic Builder. Проект реализации человеко-машинного интерфейса создавался в пакете EasyBuilder Pro.

Система визуализации включает в себя структуру экранов, на которых отображается состояние насосной станции, задаются параметры ее работы: давление, коэффициенты ПИД регулятора, условия переключения насосов, осуществляется выбор основного и дополнительного насоса, отображаются, архивируются и настраиваются аварийные ситуации. На рисунке 3 показан один из основных экранов проекта «Технологическая схема».

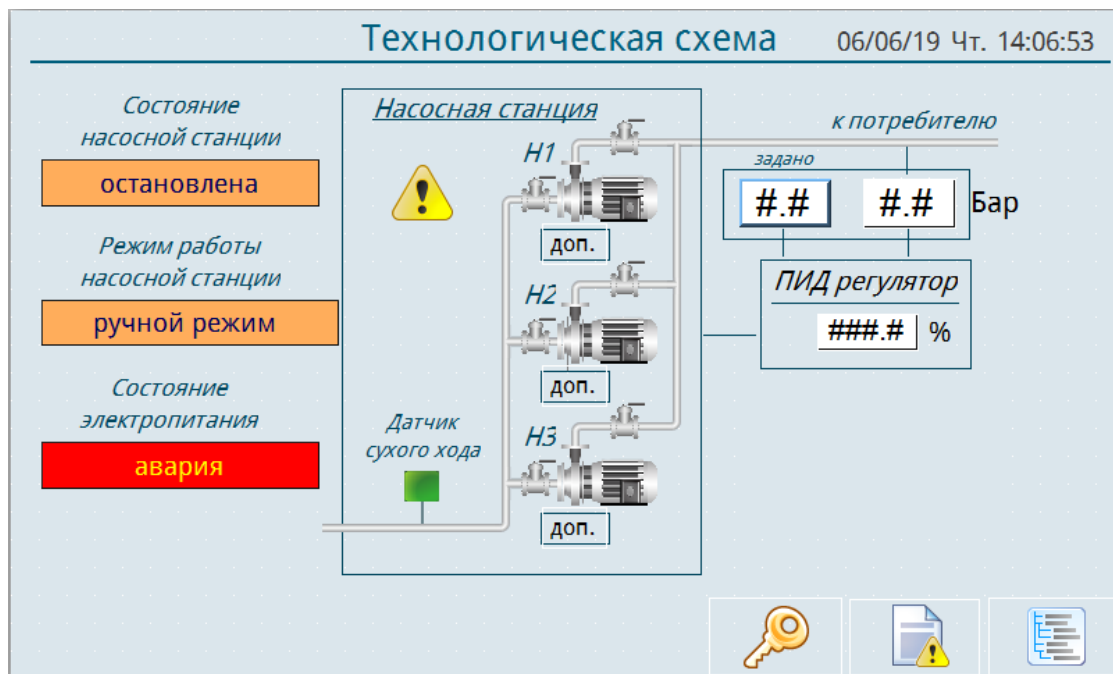


Рис. 3. Экран «Технологическая схема» системы визуализации.

Таким образом, благодаря рациональному выбору комбинированного метода регулирования и современной элементной базы, разработка системы управления насосной станцией была успешно реализована. В настоящее время проведенные разработки внедрены в практику на одной из свиноферм ЗАО «Мордовский бекон – Ковылкино».

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 365 с.
2. Шишов О. В. Современные технологии промышленной автоматизации. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. – 276 с.
3. Лищенко С. А. Регулирование работы насосов на водопроводных насосных станциях. – М.: Стройиздат, 1999. – 84 с.
4. Лобачев П. В. Насосы и насосные станции. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1993. – 191 с.
5. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. – М.: Энергия, 1977. – 424 с.
6. Ротач В. Я. Теория автоматического управления. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 340 с.
7. ПЛК, ПК-совместимые контроллеры, удаленный ввод/вывод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.se.com/ru/ru/> (дата обращения 05.06.2019).
8. Панели серии MT8000iE/mTV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://weintek.pro/catalogue/ie_mtv_series/ (дата обращения 05.06.2019).

БЕСПАЛОВ Н. Н., СМИРНОВ Д. П., ТРОФИМОВ В. А., ДЁМКИН П.М.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВСХОЖЕСТИ СЕМЯН ЛУКА
ПРИ ИХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ АЭРОИОНАМИ
ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ И ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ПОЛЯРНОСТИ**

Аннотация. В статье рассматривается разработка устройства для обработки семян лука отрицательными и положительными аэроионами. Проводится исследование всхожести семян, обработанных данными аэроионами. Рассмотрены структурная схема разрабатываемого устройства и назначение основных блоков.

Ключевые слова: аэроионы отрицательной полярности, аэроионы положительной полярности отрицательное напряжение, умножитель напряжения.

**BESPALOV N. N., SMIRNOV D. P., TROFIMOV V. A., DYOMKIN P. M.
STUDY OF GERMINATION OF ONION SEEDS AT THEIR PRELIMINARY
IONIZATION WITH AEROIONS OF NEGATIVE AND POSITIVE POLARITY**

Abstract. The paper discusses the development of a device for ionization of onion seeds with negative and positive aeroions. The authors study the germination of seeds ionized with the aeroions. The block diagram of the device being developed and the purpose of the blocks are considered.

Keywords: negative polarity aeroions, positive polarity aeroions, negative voltage, voltage multiplier.

Известно, что аэроионизация семян сельскохозяйственных растений и самих растений отрицательными аэроионами кислорода обуславливает повышение их всхожести и увеличивает урожайность различных растений. Это установили еще в прошлом веке, в частности, родоначальник метода аэроионизации профессор А. Л. Чижевский [1].

В 2003 году В. П. Скипетров, Н. Н. Беспалов, А. В. Зорькина описали влияние отрицательных аэроионов на растения (на примере огурцов). В результате было выявлено, что их урожайность увеличилась на 20% [2].

Также в 2003 году был опубликован патент «Способы и устройства для испытания или обработки семян, корней и т.п. перед посевом или посадкой», в котором описывается способ предпосевной обработки семенного материала [4].

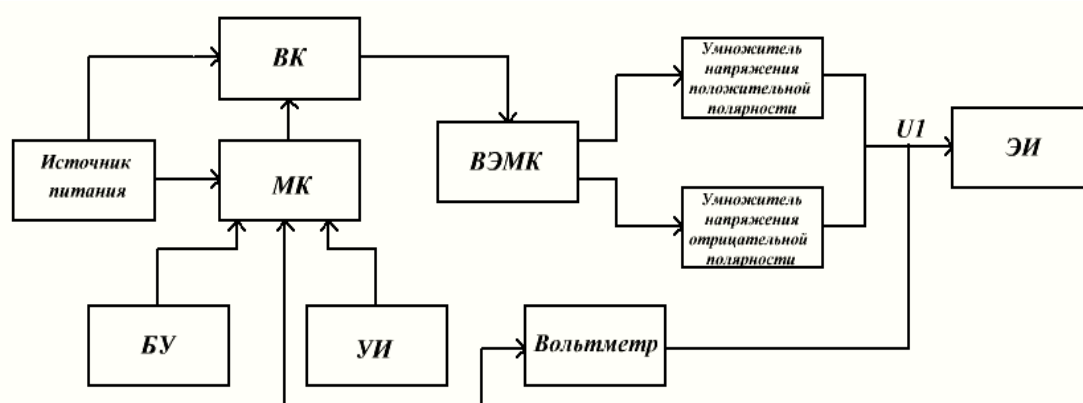
Влияние «атмосферного электричества» на растения исследовалось с 1748 года многими авторами. В этом году аббат Нолет сообщал об экспериментах, в которых он «электризовал» растения, поместив их под заряженные электроды. Он наблюдал ускорение их прорастания и роста. Грандьеу (1879) наблюдал, что растения, которые не подвергались

влиянию атмосферного электричества, так как были помещены в проволочный сеточный заземленный ящик, показали уменьшение веса на 30–50% по сравнению с контрольными растениями [5].

Однако по многим причинам системы аэроионизации не были доведены до серийного выпуска и применения. В настоящее время серийно выпускаются только бытовые ионизаторы воздуха, которые предназначены для ионизации воздуха в жилых помещениях. При этом не существует методик активации семян аэроионами кислорода.

Разрабатываемое устройство будет предназначено для использования в сельском хозяйстве и тепличных комплексах. С помощью такой специализированной техники можно будет отработать методики аэроионизации семян и растений для создания оптимальных условий выращивания растительной сельскохозяйственной продукции и повышения урожайности. В данной работе произведено исследование всхожести при воздействии отрицательных и положительных аэроионов на семена сельскохозяйственных растений.

На рисунке 1 представлена структурная схема разрабатываемого устройства.



БУ – блок управления напряжением и задание времени обработки
 ВК – выходной каскад
 МК – микроконтроллер Arduino
 УИ – устройство индикации
 ВЭМК – высоковольтный электромеханический ключ
 ЭИ – электроэффлювиальный излучатель

Рис. 1. Структурная схема устройства для аэроионизации сельскохозяйственных семян и растений.

В соответствии с выработанными методиками аэроионизации, устройство должно соответствовать следующим техническим параметрам для реализации активации всхожести и роста сельскохозяйственных растений:

- 1) выходное плавно регулируемое постоянное напряжение на электроэффлювиальном излучателе – от 4 кВ до 25 кВ;

- 2) концентрацию аэроионов положительной или отрицательной полярности от 1 000 до 2 млн. единиц в кубическом сантиметре на расстоянии от электроэффлювиального излучателя 1 метр;
- 3) обеспечение заданных интервалов времени сеансов аэроионизации;
- 4) измерение напряжения на электроэффлювиальном излучателе и вывод данной информации на дисплей;
- 5) измерение концентрации аэроионов различной полярности в зоне действия на семена.

При помощи устройства, изображенного на рисунке 1, проведено исследование воздействия ионов кислорода отрицательной и положительной полярности на семена лука. Из обычной сети магазинов сельскохозяйственных растений было приобретено 14 партий семян лука, в каждой из которых насчитывалось около 100 семян. Шесть партий семян были обработаны ионами кислорода отрицательной полярности, еще шесть положительными с заданными интервалами времени. Были построены усредненные графики, изображенные на рисунках 2 и 3.

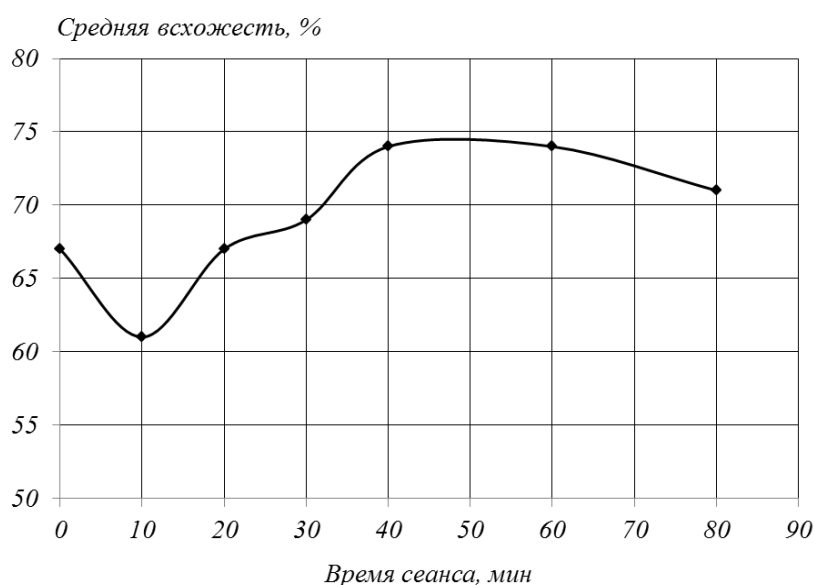


Рис. 2. График средней всхожести семян лука, обработанных аэроионами отрицательной полярности.

Из рисунка 2 видно, что средняя всхожесть семян, не обработанных аэроионами кислорода отрицательной полярности, составляет 67%. При 10 минутах обработки отрицательными аэроионами выявилось подавление средней всхожести с 67% до 61%, а при обработке в 20 минут всхожесть равна начальной.

В интервале времени от 20 до 60 минут средняя всхожесть растет и достигает своего максимума в 74%, а при дальнейшей обработке ионами кислорода отрицательной

полярности в 80 минут средняя всхожесть падает до 71%.

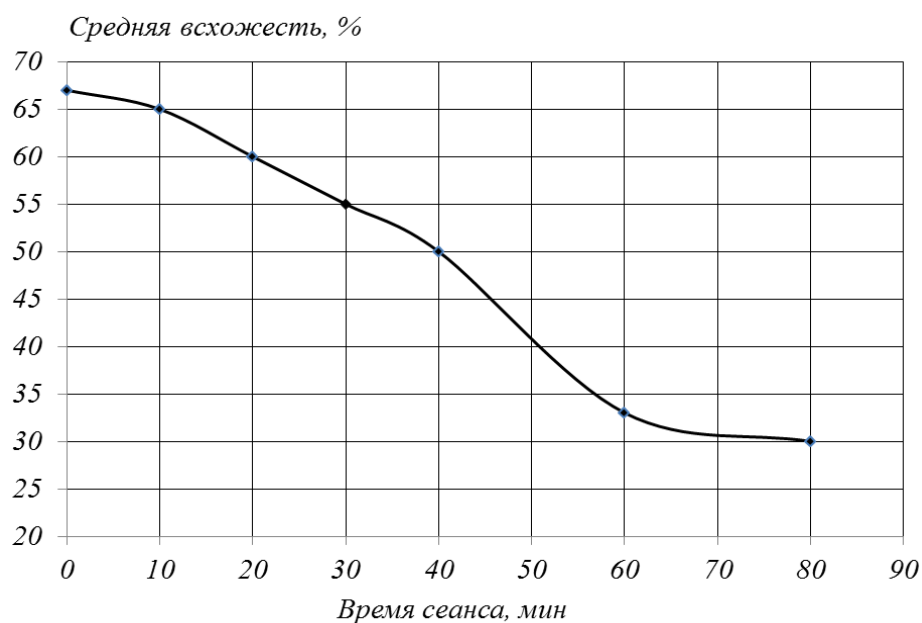


Рис. 3. График средней всхожести семян лука, обработанных аэроионами положительной полярности.

Из рисунка 3 видно, что средняя всхожесть не обработанных семян составляет 67%. При 10 минутах обработки положительными аэроионами кислорода всхожесть уменьшается с начальной в 67% до 65%. При дальнейшем увеличении времени обработки с 10 до 40 минут всхожесть падает примерно по 5% на каждые 10 минут, а при 80 минутах всхожесть достигает минимума в 30%.

Данные проведенного эксперимента показывают, что максимальная всхожесть семян лука при их предварительной обработке аэроионами кислорода отрицательной полярности достигается при времени обработки от 40 до 60 минут, а при обработке положительными аэроионами кислорода выявилось достаточно большое подавление всхожести. Это позволяет сделать вывод о том, что положительные аэроионы кислорода негативно влияют на всхожесть семян.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чижевский А. Л. Руководство по применению ионизированного воздуха в промышленности, сельском хозяйстве и в медицине: Методические указания при использовании аэроионификационными установками «Союзтехники». – М.: Госпланиздат, 1959. – 18 с.
2. Скипетров В. П. Феномен «живого» воздуха. – Саранск: СВМО, 2003. – 92 с.
3. Чижевский А. Л. Аэроионификация в народном хозяйстве. – 2-е изд. – М.:

Стройиздат, 1989. – 488 с.

4. Пат. 2218693 Российская Федерация, МПК 7 А 01 С 1/00 Способ предпосевной обработки семенного материала / Н. Н. Беспалов; заявитель и патентообладатель. Саранск. – № 2000131736/09; заявл. 2002.05.08 ; опубл. 20.12.2003 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2218693> (дата обращения 05.06.2019).

5. НПФ Янтарь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ionization.ru/ru/module/smartblog/details?id_post=91 (дата обращения 06.06.2019).

СИДОРОВ Д. П., КАМАЕВА А. А.

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН

Аннотация. Одной из наиболее обсуждаемых информационных технологий последних лет является блокчейн. В большинстве публикаций рассматривается только одна сторона данной технологии, а именно ее преимущества по сравнению с классическими решениями. С другой стороны, блокчейн обладает множеством недостатков, препятствующих его практическому внедрению. В статье систематизированы ограничения и недостатки блокчейна, проанализированы возможные пути их преодоления.

Ключевые слова: информационные технологии, блокчейн, криптовалюта, биткойн.

SIDOROV D. P., KAMAEVA A. A.

PROBLEMS OF INTRODUCTION OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY

Abstract. The blockchain is one of the most discussed information technologies of the recent years. Most publications consider only one side of this technology, namely its advantages over classical solutions. On the other hand, the blockchain has many disadvantages that prevent its practical implementation. The article presents an overview of the limitations and disadvantages of blockchain. The author analyzes some possible ways to overcome them.

Keywords: information technologies, blockchain, cryptocurrency, bitcoin.

Впервые технология блокчейн (англ. *blockchain*) была описана группой исследователей в 1991 году [1]. Ее возникновение напрямую связано с развитием Интернета и появлением электронных денег. Целью технологии было создание децентрализованной платежной системы, которая позволяла бы пользователям пересылать друг другу средства в атмосфере полного недоверия. Однако в то время основная масса пользователей не обладала скоростным доступом в Интернет и накопителями достаточной емкости, позволяющими реализовать идеи, заложенные в блокчейн.

Практическую реализацию технология блокчейн получила только в 2008 году, когда неизвестный пользователь под псевдонимом Сатоши Накамото (англ. *Satoshi Nakamoto*) опубликовал техническое описание своего протокола криптовалюты и создал первую версию программного обеспечения, в котором этот протокол был реализован [2]. 3 января 2009 года в новой сети, получившей название «Биткойн» (англ. *Bitcoin*), были сгенерированы первые блоки. Данная сеть позволяла пользователям осуществлять переводы биткойнов друг другу без участия стороннего посредника, при этом само слово «биткойн» стало употребляться не только как название самой системы, но и как название денежной единицы. На сегодняшний

день именно криптовалюты являются наиболее известным, значимым и распространенным примером использования блокчейн-технологии [3; 4].

Описание принципов функционирования технологии блокчейн с разной степенью детализации можно найти, например, в [5–7]. Резюмируя приведенную в указанных источниках информацию, базовые принципы блокчейна можно определить следующим образом.

Основной задачей технологии является хранение информации в цифровом формате, исключая возможность подделки данных. Механизм работы блокчейна основан на децентрализованной цепочке равнозначных блоков, каждый из которых содержит три элемента: данные блока, хэш блока и хэш предыдущего блока. Хэш блока – это уникальный код, который присваивается блоку с целью его последующей идентификации. Если кто-то меняет данные блока, его хэш меняется. Уличить подмену данных можно с помощью хэша предыдущего блока, который записан в следующем блоке. Несовпадение кодов указывает на замену данных в предыдущем блоке. Изменение одного блока делает все следующие за ним блоки недействительными.

В широком смысле, под термином блокчейн (цепочка блоков) понимают следующее: это полностью распределенная пиринговая система журналов учета, использующая программный модуль, реализующий алгоритм, который обрабатывает информационное содержимое упорядоченных взаимосвязанных блоков данных как единое целое с помощью криптографических технологий и технологий защиты данных для обеспечения и поддержки целостности этой системы [5].

Блокчейн позволяет автоматизировать транзакции, не привлекая при этом третью сторону. В системе нет центрального руководства, проверкой транзакций занимается особая категория пользователей, называемая майнерами. Майнеры подтверждают подлинность совершенных транзакций и формируют из них блоки, которые выстраиваются в цепочки. В отсутствии посредников кроется основное преимущество технологии. В настоящий момент все операции с деньгами, документами и прочими данными требуют наличия посредников, проверяющих подлинность проведенных операций. В блокчейне же транзакции проверяются и подтверждаются участниками системы. Программный код сети доступен всем, и любой может посмотреть данные по операциям транзакций.

В зависимости от цели применения технологии, блокчейн-блоки могут содержать самые разные данные. Например, блокчейн может применяться для хранения медицинских записей, создания цифрового нотариуса, сбора налогов, а также в других сферах, требующих учёта взаимодействия больших групп людей. Что касается криптовалют, блоки содержат

информацию о финансовых транзакциях: сумму и дату перевода, а также публичную часть идентификаторов участников сделки [6–8].

Преимуществам технологии блокчейн и возможным областям ее практического применения в настоящее время посвящено большое количество публикаций [3; 4; 6; 8; 9]. Поэтому здесь не будем даже кратко останавливаться на освещении данных вопросов. Следует отметить, что в большинстве публикаций, посвященных блокчейну, авторы концентрируют свое внимание именно на плюсах данной технологии и лишь кратко упоминают (или вообще не упоминают), что она далеко не идеальна, что у нее есть и минусы. Наиболее оптимистично настроенные эксперты предполагают, что эта технология – одно из самых важных изобретений человечества после создания всемирной сети Интернет и что скоро абсолютно все будет работать на блокчейне.

Когда заходит речь о перспективах применения блокчейна в той или иной практической области, то зачастую рассматриваются идеальные условия функционирования системы без учета влияния различных факторов, существующих в объективной реальности: накладные расходы, связанные с эксплуатацией оборудования; юридические аспекты; человеческий фактор.

Например, рассмотрим вопрос о безопасности использования технологии блокчейн в секторе криптовалют. Она обеспечивает высокий уровень защиты в сети, делая транзакции анонимными, но это одновременно создает риски для использования криптовалют в преступных целях [10]. Кроме того, технологии, лежащие в основе функционирования криптовалют, как и любые информационные системы подвержены различного рода уязвимостям.

Самым слабым в цепочке обращения криптовалют является звено, в котором криптовалюты обмениваются на традиционные деньги. Так как это происходит на вновь созданных нерегулируемых биржах, то они часто становятся объектом хакерских атак. Ярким примером проблемы безопасности криптовалют является история биржи Coincheck в Японии, которая была взломана мошенниками, в результате чего были похищены 520 млн. токенов NEM с потерями для биржи на сумму около \$440 млн. Хакеры воспользовались уязвимостью IT-систем и с помощью вируса украли ключи шифрования кошельков пользователей. Эти ключи были выложены на различных сайтах в «даркнете» (DarkNet) [4].

Существуют и другие ловушки на рынке криптовалют. Например, в связи с быстрыми темпами появления новых криптобирж, становится сложно определить их исторические показатели и протестировать их на благонадежность. Появляются «серые» биржи, которые в

любой момент могут приостановить свою деятельность, заранее выведя активы, как произошло в случае с японской биржей Mt. Gox в феврале 2014 года [4].

Для правительств многих стран наиболее важной проблемой безопасности обращения криптовалют является их использование в целях отмывания денег или финансирования терроризма. Японское правительство, министры финансов и главы центральных банков Франции и Германии предлагают сделать регулирование криптовалют международным с целью предотвращения отмывания денег посредством виртуальных валют. МВФ также придерживается точки зрения о необходимости регулирования рынка цифровых валют.

Таким образом блокчейн не является абсолютно совершенной технологией и не обходится без некоторых ограничений. Систематизируем основные ограничения технологии блокчейна и причины, по которым эти ограничения создают серьезные затруднения для коммерческого применения этой технологии.

Рассмотрим технические ограничения блокчейна.

1. Недостаточная секретность. Блокчейн-система является полностью распределенным пиринговым реестром, обслуживающим полную хронологию данных транзакций. Все подробности транзакций, такие как передаваемые объекты и их количество, учетные записи, участвующие в передаче, и время передачи, доступны всем. Это необходимо для того, чтобы каждый член системы получил возможность определить и подтвердить право владения, а также проверить новую транзакцию (например, для обнаружения атаки типа двойное расходование). Таким образом, недостаточная секретность операций является неотъемлемым составным элементом блокчейн-системы. Без такого уровня открытости блокчейн-система не смогла бы выполнять свои функции. Но такой уровень открытости часто становится ограничивающим фактором для применения в приложениях, которые требуют большей секретности.

2. Модель защиты. Технология блокчейна использует асимметричную криптографию для идентификации и аутентификации пользователей, а также для авторизации транзакций. Номера учетных записей в блокчейн-системе в действительности являются открытыми криптографическими ключами. Только владелец соответствующего закрытого (секретного) ключа может получить доступ к объектам собственности, принадлежащим конкретной учетной записи. Только те данные транзакции, которые содержат цифровую подпись, созданную с помощью соответствующего секретного ключа, являются корректными и могут осуществить передачу объектов собственности из одной учетной записи в другую. Секретный ключ (private key) – это единственный инструмент защиты, позволяющий выполнить авторизацию законного владельца. После того как

секретный ключ учетной записи получает постороннее лицо преднамеренно, случайно, по ошибке или в результате перехвата данных, такая учетная запись уже не является защищенной.

3. Ограниченная масштабируемость. Блокчейн – это пиринговая система, ориентированная на достижение двух целей: с одной стороны, она позволяет каждому добавлять новые транзакции в совместно обслуживаемую хронологию транзакций, с другой – она обеспечивает защищенность хронологии данных транзакций от изменений и подделок. Блокчейн-система соблюдает баланс между обеими целями, используя неизменяемую структуру данных с возможностью только добавления, которая требует решения хэш-головоломки при каждой операции добавления нового блока. Решение хэш-головоломки требует значительных затрат времени, поэтому любая попытка изменения хронологии транзакций будет связана с неприемлемо большими накладными расходами. К сожалению, за такое средство защиты приходится платить снижением скорости обработки данных, следствием чего является ограниченная масштабируемость системы. Эта характеристика блокчейн-системы считается серьезным препятствием для использования ее в тех случаях, когда требуются высокая скорость обработки данных, высокая масштабируемость и высокая пропускная способность.

4. Высокий уровень накладных расходов. Проблема больших накладных расходов связана с проблемой ограниченной масштабируемости. Решение хэш-головоломки или подтверждение выполненной работы преднамеренно сделано чрезвычайно трудоемким и затратным в плане объема вычислений. Это средство защиты, которое делает хронологию данных транзакций практически не изменяемой. Затраты на вычисления могут быть отображены в различных единицах измерения, например в количестве вычислительных циклов, в затраченном времени, в единицах израсходованной электроэнергии или в денежном выражении. Но результат будет одним и тем же: подтверждение выполненной работы требует больших затрат. Следовательно, вся блокчейн-система связана с накладными расходами. Подавляющее большинство этих накладных расходов зависит от уровня сложности хэш-головоломки.

5. Скрытая централизация. Обязательность решения хэш-головоломки для каждого блока, добавляемого в структуру данных блокчейна, и правила распределенных поощрений за вклад в поддержку целостности системы неизбежно приводят к конкуренции между членами системы. Обладатели необходимых финансовых ресурсов вкладывают деньги в специализированные аппаратные средства, которые позволяют решать хэш-головоломки, тем самым внося полезный вклад в систему. С другой стороны, рискованные действия по

проверке и добавлению новых данных транзакций становятся невыгодными для тех, кто не имеет доступа к специализированной аппаратуре, следовательно, такие пользователи вынуждены отказываться от предоставления своих вычислительных ресурсов системе. В результате предположительно большая и разнородная группа равноправных партнеров, совместно поддерживающая целостность системы, в конечном итоге становится очень маленькой группой объектов, каждый из которых обладает огромной вычислительной мощностью в форме специализированных аппаратных средств. Эта оставшаяся группа партнеров образует своеобразную монополию, в которой ответственность за поддержку целостности системы разделена между немногими членами группы.

6. Недостаточная гибкость. Блокчейн-система – это сложная техническая конструкция, которая сформирована на основе разнообразных концепций и протоколов, оптимизированных и адаптированных для совместной работы. Любые изменения в этой тонко настроенной экосистеме могут быть чрезвычайно затруднительными. На самом деле не существует конкретно определенной процедуры изменения или обновления основных компонентов блокчейн-системы, после того как она начала свою работу. Это неявно обуславливает долгий срок сопровождения технологий, на основе которых сформирована технология блокчейна. Например, криптографические процедуры должны быть корректными на протяжении всего жизненного цикла блокчейн-системы, то есть в перспективе – в течение десятков и даже сотен лет. То же самое относится и к алгоритму блокчейна, и к методикам разрешения конфликтов. Кроме того, определенные проблемы для разработчиков блокчейн-системы связаны с ее неизменяемостью, поэтому трудно исправлять ошибки и вносить усовершенствования в протокол блокчейна. Эти характеристики делают весь комплект (стек) технологий блокчейна менее гибким, чем другие технологии.

7. Критический размер. Сопrotивляемость различным манипуляциям и вытекающая из этого степень доверительности к совместно обслуживаемой хронологии данных транзакций основаны на предположении, что основные вычислительные мощности системы управляются честными узлами. Тем не менее в маленьких пиринговых системах с ограниченной вычислительной мощностью это управляющее большинство может оставаться весьма незначительным (в абсолютном выражении), что, в свою очередь, может создавать потенциальную возможность для проведения атак типа «51 процент». Эта проблема особенно опасна для криптовалют с низкой рыночной капитализацией и небольшим количеством пользователей-участников. Таким образом, любая блокчейн-система требует критической массы честных узлов для поддержки и обеспечения сопротивляемости атакам с применением значительных вычислительных мощностей. Достижение критического размера,

при котором атаки типа «51 процент» становятся невозможными, представляет собой очень трудную задачу, с необходимостью решения которой неизбежно сталкивается каждая новая блокчейн-система.

Существуют нетехнические ограничения блокчейна.

1. Недоверие с юридической точки зрения. Блокчейн – это технология, которая предоставляет пользователям возможность управления и передачи прав владения собственностью в открытой и полностью распределенной пиринговой системе. Способ, которым независимые равноправные партнеры совместно управляют правами владения собственностью с помощью распределенного согласования, поставил вопросы, касающиеся законности последовательностей транзакций, выполняемых и управляемых в блокчейн-системе. Вопросы, относящиеся к юридической правомочности и приемлемости с точки зрения законодательства транзакций, выполняемых в блокчейн-системе, должны обсуждаться вне зависимости от безопасности, защищенности и сложности соответствующей технологии. Это вопрос включения новой методики управления правами владения собственностью в существующую систему законодательства. Те, кто застал времена появления и начального развития Интернета, могут заметить сходство между юридическим статусом блокчейна в наши дни и недоверием с точки зрения законодательства к интернет-коммерции в 1990-е годы.

2. Недоверие со стороны пользователей. Недоверие со стороны пользователей, их предвзятое отношение является еще одним ограничением, которое нельзя недооценивать. Открытый (общедоступный) юридический статус блокчейн-системы вызывает чувство неуверенности у пользователей, в свою очередь, снижая их заинтересованность в использовании этой системы. Дополнительным фактором, влияющим на доверительное отношение пользователей, является уровень их знаний и образования. Не следует ожидать, что клиенты будут пользоваться блокчейн-системой и полностью доверять ей, если им непонятны основные принципы ее функционирования.

Подводя итог всему вышесказанному, можно сделать вывод о том, что технические и нетехнические ограничения нужно рассматривать как главные препятствия для применения технологии блокчейна в реальных приложениях. Способы преодоления конкретных ограничений всегда были и остаются предметом интенсивных исследований и перспективных разработок. Подробное обсуждение этих исследований не относится к тематике данной статьи. Тем не менее, кратко остановимся на способах преодоления ограничений технологии блокчейна.

Преодоление технических ограничений технологии блокчейна может потребовать вмешательства во все компоненты и на всех технических уровнях. Одна из главных трудностей в процессе преодоления технических ограничений технологии блокчейна – различие между усовершенствованием этой технологии и изменением ее основ.

Нетехнические ограничения технологии блокчейна могут рассматриваться как социальные, экономические, юридические и психологические аспекты перехода к новой технологии. Образовательные и законодательные инициативы могут стать дополнительными средствами для перехода к использованию блокчейна. Пример Интернета и электронной коммерции уже показал, что требуется определенное время для ответа на вопросы, связанные с законодательством, которые возникают вместе с новыми технологиями, а кроме того, время также требуется для того, чтобы пользователи поняли новые технологии, стали им доверять и применять. Тот же пример Интернета и электронной коммерции также показал, что образовательные инициативы, направленные на изучение функциональности новых технологий, увеличивают степень доверия к ним, способствуют их распространению среди пользователей и решению юридических проблем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Haber S., Stornetta W.S. How to time-stamp a digital document // Journal of Cryptology. – January 1991. – Volume 3, Issue 2. – P. 99–111.
2. Nakamoto S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (дата обращения 06.05.2019).
3. Винья П., Кейси М. Эпоха криптовалют. Как биткоин и блокчейн меняют мировой экономический порядок. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2017. – 432 с.
4. Соколов В. Н., Иванова К. С., Уварова П. А. Блокчейн и криптовалюты: обзор трендов и перспектив [Электронный ресурс] // Международный дискуссионный клуб «Валдай». – 2018. – Режим доступа: <http://ru.valdaiclub.com/files/21191/> (дата обращения 06.05.2019).
5. Дрешер Д. Основы блокчейна: вводный курс для начинающих в 25 небольших главах. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 312 с.
6. Лелу Л. Блокчейн от А до Я. Все о технологии десятилетия. – М.: Эксмо, 2018. – 256 с.
7. Антонопулос А. Осваиваем биткойн. Программирование блокчейна. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 428 с.
8. Свон М. Блокчейн: Схема новой экономики. – М.: Олимп-Бизнес, 2017. – 240 с.

9. Равал С. Децентрализованные приложения. Технология Blockchain в действии. – СПб.: Питер, 2017. – 240 с.
10. Цой В. В., Царев Е. О., Домбровский Ю. Е. Обеспечение безопасности при использовании криптовалюты // Банковское дело. – 2017. – № 11. – С. 4–8.

БЕСПАЛОВ Н. Н., ДЁМКИН П. М., ПАНЬКИН К. Ю., ЯХЛОВ А. В.
АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СТРУКТУРЕ СИЛОВОГО ДИОДА

Аннотация. В статье приведен способ аналитической оценки распределения активной мощности электрических потерь на составных частях структуры силового диода в состоянии высокой проводимости. Полученные результаты могут быть использованы для расчёта и моделирования силовых диодов в различных программных средах.

Ключевые слова: аналитическая модель, формула, схема замещения, моделирование.

BESPALOV N. N., DYOMKIN P. M., PANKIN K. Y., YAKHLOV A. V.
ANALYTICAL ASSESSMENT OF ACTIVE POWER DISTRIBUTION
OF ELECTRIC LOSSES IN POWER DIODE STRUCTURE

Abstract. The article presents a method for analytical assessment of the active power distribution of electrical losses in the component parts of the structure of a power diode in the state of high conductivity. The study results can be used to calculate and simulate power diodes in various software environments.

Keywords: analytical model, formula, equivalent circuit, simulation.

Математические модели силовых полупроводниковых приборов используются для расчёта и моделирования электрических принципиальных схем различных электронных устройств, например, таких как преобразователи электрической энергии. В современных программных средах для моделирования схем для аналоговой, цифровой и силовой электроники используются модели полупроводниковых приборов основанные на технологии SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) – симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом, основанной на замене прибора схемой замещения и схемами с распределенными параметрами. Пример SPICE-модели из [1], созданной на основе схемы Гуммеля-Пуна, представлен на рисунке 1.

Данная технология моделирования полупроводниковых приборов пригодна для моделирования электрических принципиальных схем устройств интегральной электроники и необъективна для моделирования электрических принципиальных схем устройств дискретной силовой электроники из-за значительного разброса параметров отдельных полупроводниковых приборов присутствующих в составе схемы устройства. Особенно это важно при расчёте электрических потерь, а соответственно и температурных режимов работы полупроводниковых приборов.

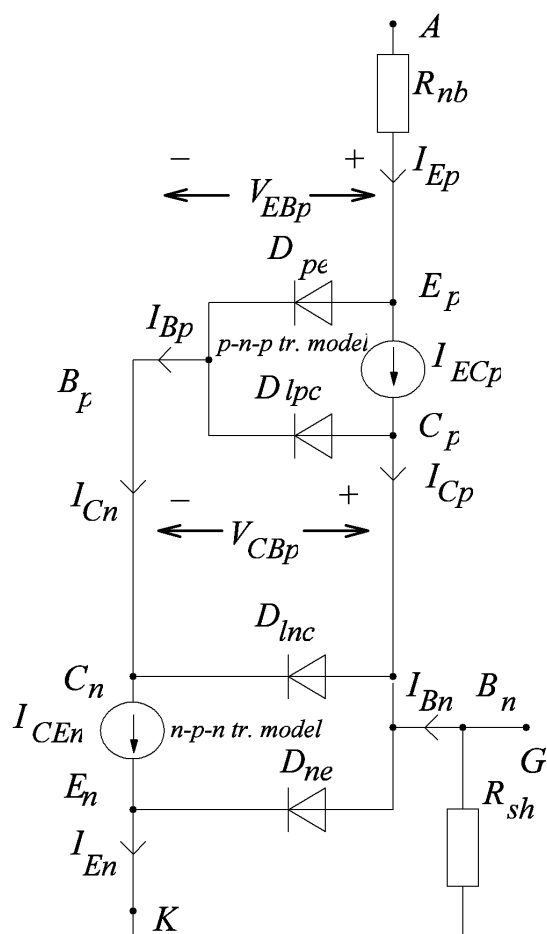


Рис. 1. SPICE-модель тиристора на основе схемы Гуммеля-Пуна.

Для моделирования устройств дискретной силовой электроники математические модели полупроводниковых приборов должны быть описаны аналитическими формулами, основанными на физических процессах, протекающих в полупроводниковых структурах.

В данной работе рассмотрена аналитическая физико-математическая модель (далее – АФМ) силового диода в состоянии высокой проводимости, схема замещения которой представлена на рисунке 2.

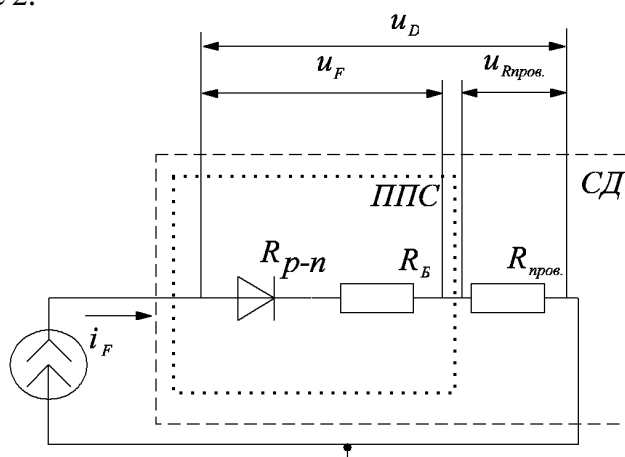


Рис. 2. Функциональная схема модели силового диода в состоянии высокой проводимости.

На рисунке 2 введены следующие обозначения: *ППС* – полупроводниковая структура, *СД* – силовой диод, i_F – прямой ток, протекающий через *СД*, R_B – сопротивление базовой области полупроводниковой структуры *СД*, R_{p-n} – сопротивление *p-n* перехода *СД*, $R_{пров.}$ – сопротивление внутренних проводников от внешних контактов до структуры полупроводникового элемента *СД*, u_F – прямое падение напряжения на полупроводниковой структуре *СД*, $u_{R_{пров.}}$ – падение напряжения на сопротивлении внутренних проводников от внешних контактов до структуры полупроводникового элемента *СД*, u_D – падение напряжения на всей структуре *СД*.

Для создания аналитического физико-математического описания данной схемы за основу взята модель *СД* в *СВП* [2], которая представлена следующим выражением:

$$u_F = \frac{2kT_j}{q} \ln \frac{i_F}{I_{si}} + \frac{1,5kT_j}{q} \exp \left(\frac{W_n}{2L'_p} \right) + \frac{W_n}{16S} i_F.$$

В работах [3; 4] эта модель преобразована в эквивалентное сопротивление *СД* в *СВП*, которая представлена следующей формулой:

$$r_F = \left(\frac{2kT_j}{q} \ln \left[\frac{4L_p}{\pi q D^2 D_p n_i \exp \left[B \left(1 - \frac{T_{j0}}{T_j} \right) \right]} \right] \times i_F + \frac{1,5kT_j}{q} \exp \left[\frac{W_n}{2} \sqrt{\frac{b+1}{2bD_p \tau_p}} \right] \right) \times (i_F)^{-1} + \frac{W_n}{4\pi D^2} \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5}.$$

К данной *АФМ* в работе [5] добавлено эквивалентное последовательное сопротивление внутренних проводников структуры *СД*, обозначенное как $R_{пров.}$ (рис. 2).

Таким образом, была получена модель *СД* в *СВП*, которая представлена следующим выражением:

$$r_F = \left(\frac{2kT_j}{q} \ln \left[\frac{4L_p}{\pi q D^2 D_p n_i \exp \left[B \left(1 - \frac{T_{j0}}{T_j} \right) \right]} \right] \times i_F + \frac{1,5kT_j}{q} \exp \left[\frac{W_n}{2} \sqrt{\frac{b+1}{2bD_p \tau_p}} \right] \right) \times (i_F)^{-1} + \frac{W_n}{4\pi D^2} \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5} + R_{пров.}$$

При этом в данной АФМ учитываются динамические тепловые процессы, протекающие в СД в СВП при протекании прямого тока [3–5].

Исходя из полученной АФМ, можно вывести выражения для расчёта мощности электрических потерь на составных частях структуры СД. Формула расчёта электрической мощности имеет следующий вид:

$$P = i^2 \times R.$$

Тогда мощность электрических потерь в полупроводниковой структуре $P_{ППС}$ СД определится как:

$$P_{ППС} = i_F^2 \times R_{ППС} = i_F^2 \times \left[\left(\frac{2kT_j}{q} \ln \left[\frac{4L_p}{\pi q D^2 D_p n_i \exp \left[B \left(1 - \frac{T_{j0}}{T_j} \right) \right]} \right] \times i_F \right) + \frac{1,5kT_j}{q} \exp \left[\frac{W_n}{2} \sqrt{\frac{b+1}{2bD_p \tau_p}} \right] \times (i_F)^{-1} + \frac{W_n}{4\pi D^2} \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5} \right].$$

Мощность электрических потерь в последовательном сопротивлении внутренних проводников структуры полупроводникового элемента СД равна:

$$P_{R_{пров.}} = i_F^2 \times R_{пров.}$$

Общая мощность электрических потерь в СД составит сумму мощности потерь на элементах структуры СД:

$$P_{общ} = P_{ППС} + P_{R_{пров.}}$$

или

$$P_{общ} = i_F^2 \times r_F = i_F^2 \times \left[\left(\frac{2kT_j}{q} \ln \left[\frac{4L_p}{\pi q D^2 D_p n_i \exp \left[B \left(1 - \frac{T_{j0}}{T_j} \right) \right]} \right] \times i_F \right) + \frac{1,5kT_j}{q} \exp \left[\frac{W_n}{2} \sqrt{\frac{b+1}{2bD_p \tau_p}} \right] \times (i_F)^{-1} + \frac{W_n}{4\pi D^2} \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5} \right] + R_{пров.}.$$

В результате данной работы определены аналитические модели всех основных характеристик силовых диодов в состоянии высокой проводимости с учётом воздействия на них начальной и изменяющейся температуры как полупроводникового кристалла диода, так и силовых металлических выводов. На основе этих моделей в дальнейшем будет проведено исследование статических и динамических электрических процессов в силовых диодах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sayah G. T., Zekry A. A., Soliman F. A. A SPICE model of thyristors with amplifying gate and emitter-shorts // IET Power Electronics – 2014. – Vol. 7. – pp. 724–735.
2. Дерменжи П. Г., Кузьмин В. А., Крюкова Н. Н. Расчёт силовых полупроводниковых приборов / под ред. В. А. Кузьмина. – М.: Энергия 1980. – 184 с.
3. 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 (56). – С. 405–412.
4. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Григорович С. Ю. Описание модели СД в состоянии высокой проводимости // Научный вестник. – 2015. – № 2(4). – С. 25–31.
5. Беспалов Н. Н., Горячкин Ю. В., Дёмкин П. М., Панькин К. Ю. Особенности вольт-амперной характеристики силового диода при воздействии ударного тока с учётом диффузионной ёмкости // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. Материалы XIII всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары, 2019. – С. 255–258.

КИРДЯШКИН Н. Н., ПАДЕРОВ В. П.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТИРИСТОРОВ ОТ КОНСТРУКЦИИ
ВСТРОЕННОГО ДИОДА ВКЛЮЧЕНИЯ

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния конструкции диода включения на напряжение включения тиристорov с самозащитой от перенапряжения. Рассматриваются результаты физико-топологического моделирования.

Ключевые слова: высоковольтный тиристор, самозащита от перенапряжения, диод включения, моделирование напряжения включения.

KIRDYASHKIN N. N., PADEROV V. P.
SIMULATION OF DEPENDENCE OF SWITCHING VOLTAGE OF HIGH-VOLTAGE
THYRISTORS ON CONSTRUCTION OF BREAKOVER DIODE

Abstract. The article is devoted to the study of the influence of the breakover diode construction on the switching voltage of thyristors with self-protection against overvoltage. The results of a physical and topological simulation are provided.

Keywords: high-voltage thyristor, self-protection against overvoltage, breakover diode, turn-on voltage simulation.

Одним из способов создания тиристорov с самозащитой от перенапряжения является встраивание в центральную область прибора диода включения – ДВ (breakover diode – BOD) [1], как показано на рисунке 1. Данный диод имеет кривизну перехода в центральной части и тонкий p^+ -слой на периферии. Кривизна перехода имеет результатом возрастание максимальной напряженности электрического поля в области ДВ и дает регулируемое уменьшение напряжения пробоя ДВ ниже блокирующего напряжения пробоя тиристора в области фаски. Совместно с несколькими вспомогательными тиристорами и токоограничивающим резистором на слое p^+ -базы это гарантирует, что тиристор безопасно включается лавинным током диода включения, когда напряжение, приложенное к прибору, превышает напряжение пробоя диода включения.

В [2] показано, что напряжение включения тиристора может быть задано путем изменения радиуса центральной p -области с кривизной перехода (внутренний радиус тонкого p^+ -кольца слоя бора) и ширины слоя бора (рис. 1). Однако зависимости приведены в относительных единицах без указания параметров структуры и только при одной глубине перехода тонкого p^+ -слоя бора. Целью данной статьи является двумерное физико-

топологическое моделирование высоковольтной тиристорной структуры в системе Synopsys TCAD-10 [3; 4] и построение зависимости напряжения включения структуры при перенапряжении от внешнего радиуса ($R_{\text{внеш}}$) и глубины залегания (h) тонкого p^+ -слоя. Эта зависимость позволит сформулировать практические рекомендации по структуре ДВ для эффективной защиты тиристора от перенапряжения.

В качестве объекта моделирования была использована часть структуры типичного силового тиристора, рассчитанного на величину повторяющегося импульсного напряжения в закрытом состоянии $U_{\text{DRM}} = 6\,500\text{ В}$. При этом задавались электрофизические параметры структуры, соответствующие тиристорам, рассчитанным на данное напряжение. Также было проведено моделирование той же структуры с фаской. Напряжение включения по фаске составило 7883 В . Чтобы создать структуру с самозащитой от перенапряжения, напряжение включения по центру должно быть меньше напряжения включения по фаске на $200\text{--}300\text{ В}$. Для моделирования была создана двумерная структура, показанная на рисунке 1, где h – глубина залегания p^+ -слоя, $R_{\text{внут}}$ – внутренний радиус кольца, $R_{\text{внеш}}$ – внешний радиус кольца.

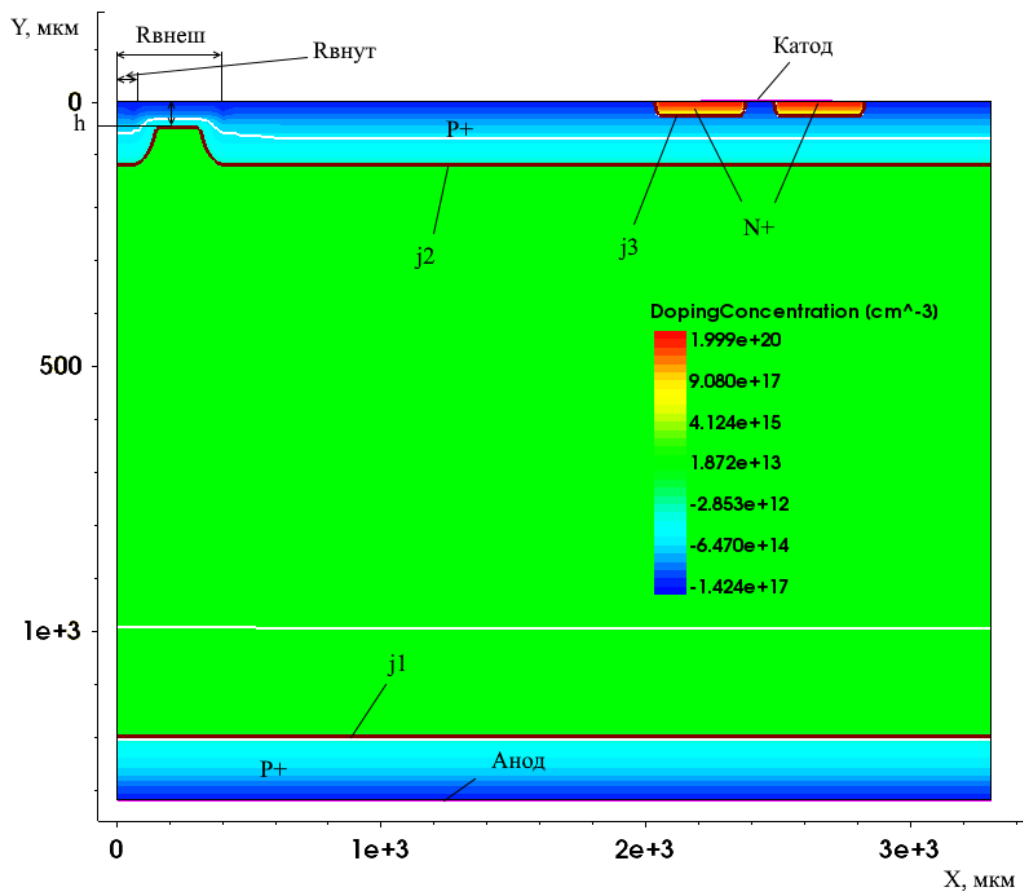


Рис. 1. Двумерная модель тиристорной структуры с диодом включения.

Моделирование структуры проводилось при глубине p^+ -кольца 10, 20, 30 и 40 мкм, а внутренний радиус оставался постоянным и составлял 60 мкм, внешний радиус менялся с 300 мкм до 1 000 мкм с шагом 100 мкм. На структуру подавался полусинусоидальный импульс напряжения амплитудой 10 кВ и длительностью 10 мс. В анодную цепь включался токоограничительный резистор 2,5 кОм. Структура моделировалась в цилиндрической системе координат. Для моделирования лавинного пробоя в модель Laskner, поскольку эта модель перекрывает диапазон критической напряженности поля от 10^5 до 10^6 В/см, максимальное время жизни носителей заряда задавалось равным 70 пс. Полученные зависимости изображены на рисунке 2.

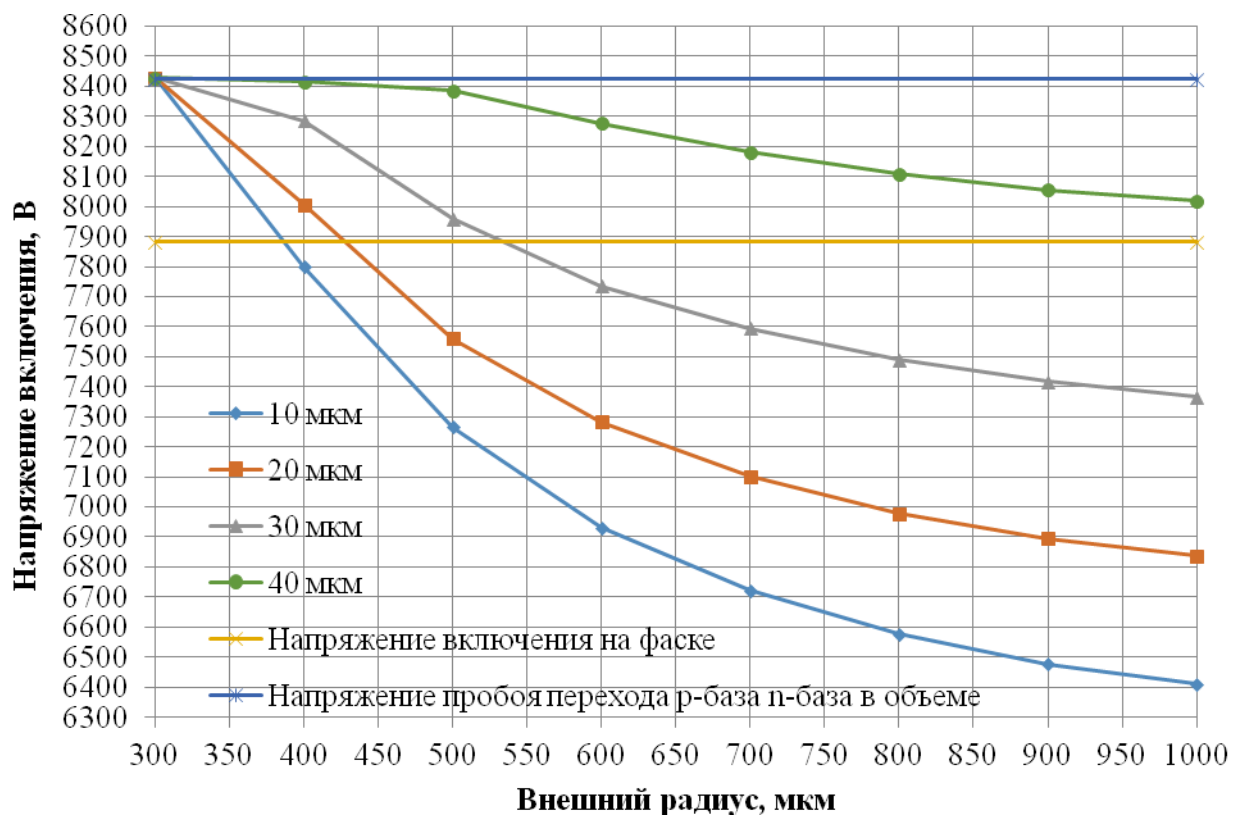


Рис. 2. Зависимость напряжения включения от внешнего радиуса ($R_{\text{внеш}}$) кольца, при внутреннем радиусе ($R_{\text{внут}}$) 60 мкм, глубине залегания p^+ -слоя (h) 10, 20, 30 и 40 мкм.

Из рисунка 2 можно сделать вывод, что при увеличении внешнего радиуса при глубине перехода бор-подложки (h) 10 мкм, напряжение включения уменьшается с 8424 В (при $R_{\text{внеш}} = 300$ мкм) до 6411 В (при $R_{\text{внеш}} = 1000$ мкм), при глубине 20 мкм с 8424 В (при $R_{\text{внеш}} = 300$ мкм) до 6837 В (при $R_{\text{внеш}} = 1000$ мкм), при глубине 30 мкм с 8424 В

(при $R_{\text{внеш}} = 300$ мкм) до 7366 В (при $R_{\text{внеш}} = 1000$ мкм) и при глубине 40 мкм с 8424 В (при $R_{\text{внеш}} = 300$ мкм) до 8018 В (при $R_{\text{внеш}} = 1000$ мкм). Для гарантированного включения прибора в центральной части структуры, внешний радиус, при глубине залегания p^+ -слоя (h) 10 мкм, должен быть больше 420 мкм – 450 мкм, при глубине залегания p^+ -слоя (h) 20 мкм, должен быть больше 470 мкм – 490 мкм и при глубине залегания p^+ -слоя (h) 30 мкм, должен быть больше 650 мкм – 700 мкм. При глубине залегания p^+ -слоя (h) 40 мкм структура будет включаться в области фаски, поскольку при внешнем радиусе 1000 мкм, напряжение включения в центральной области больше напряжения включения по фаске.

Из анализа полученных зависимостей можно сделать следующие выводы.

1. Напряжение включения структуры с ДВ уменьшается с увеличением внешнего радиуса кольца и уменьшением глубины залегания p^+ -слоя.
2. Внешний радиус кольца не рационально увеличивать больше, чем на ширину области пространственного заряда перехода j_2 при пробое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 5455434 США, МПК Н 01 L 29 / 743, Thyristor with breakdown region / F. Pfirsch; заявитель и правообладатель Siemens Aktiengesellschaft – № 19930059492; заявл. 10.05.1993; опубл. 03.10.1995. – 5 с.
2. Niedernostheide F. -J., Schulze H.-J., Kellner-Werdehausen U., Dorn J., Westerholt D. Light-Triggered Thyristors with Integrated Protection Functions // Power Semiconductor Devices and ICs. – 2000. – Vol. 12. – P. 267–270.
3. Sentaurus Structure Editor User Guide. Synopsis TCAD Release 10.0., 2017. – 880 p.
4. Sentaurus Device User Guide. Synopsis TCAD Release 10.0, 2017. – 1546 p.

НАСЫРЫМБЕКОВА П. К., БАТЫРКАНОВ Ж. И.
ВЫБОР МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЭКСПЕРТНОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. Проведен критический анализ существующих моделей представления знаний. Показаны области эффективного применения рассматриваемых моделей. Продемонстрирован пример построения обучающей экспертной системы для курса «Теория автоматического управления» с выбором комбинационной, а именно семантико-фреймовой модели представления знаний. Приведены фрагменты применения разработанной экспертной обучающей системы по этому курсу.

Ключевые слова: экспертная обучающая система, база знаний, машина вывода, модуль извлечения знаний, модуль обучения, система объяснений, модуль тестирования, фрейм, слоты, семантико-фреймовая модель.

NASYRYMBEKOVA P. K., BATYRKANOV ZH. I.
CHOOSING A KNOWLEDGE REPRESENTATION MODEL
WHEN DEVELOPING AN EXPERT TRAINING SYSTEM

Abstract. A critical analysis of the current models of knowledge representation is carried out. The areas of effective application of the considered models of knowledge representation are shown. To develop a training expert system for studying the course “Theory of Automatic Control”, a combined model was chosen, namely, the semantic-frame model of knowledge representation. The fragments of the developed expert training system for studying the course “Theory of Automatic Control” are presented.

Keywords: expert training system, knowledge base, output machine, module for knowledge extraction, learning module, system of explanation, testing module, frame, slots, semantic-frame model.

Экспертная обучающая система (ЭОС) строится на основе знаний экспертов предметных областей (ученых, преподавателей, методистов, психологов). В настоящее время она обычно реализуется в форме компьютерной программы, которая контролирует и осуществляет процесс обучения. Назначение такой системы состоит в том, что она, с одной стороны, помогает учащимся самостоятельно обучаться, а с другой — преподавателям обучать и контролировать учащихся [1].

Как правило, выделяются следующие основные компоненты ЭОС:

1. база знаний;
2. модуль обучений;
3. модуль извлечения знаний;
4. модуль тестирования;
5. машина вывода;
6. система объяснений.

При разработке экспертной системы очень важно выбрать эффективную модель представления знаний. К настоящему времени существуют следующие модели представления знаний: семантическая; продукционная; фреймовая; логико-предикатная, а также их комбинации.

Экспертная система состоит из:

- решателя (интерпретатора), который обеспечивает последовательность реализации правил для решений конкретной задачи на основе правил и фактов, хранящихся в базе знаний и в базе данных;
 - базы данных и знаний, которая состоит из фактов и правил изученной предметной области, также в ней хранятся константы, справочные материалы и промежуточные данные;
 - подсистемы объяснений, которая позволяет пользователю получить ответ на вопрос: «Почему система принимает такое решение?»;
 - интеллектуального редактора базы знаний, который предназначен как для модификации имеющихся правил, так и добавления в базу знаний новых;
 - интерфейса пользователя, комплекса программ, который получает результаты и реализует диалог пользователя с системой на стадии ввода информации.
- При этом структура экспертной системы представляется следующим образом (рис. 1).

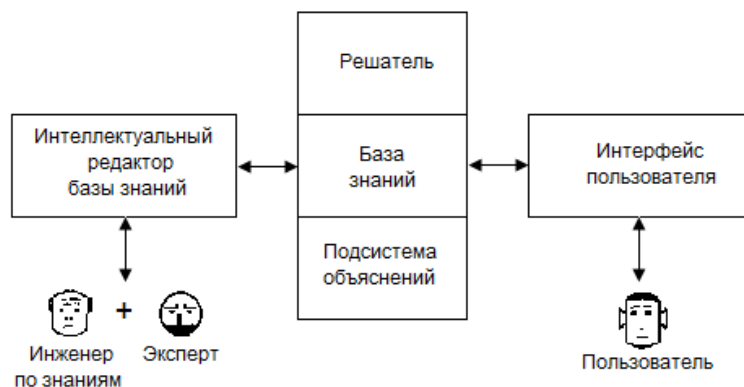


Рис. 1. Структура экспертной системы.

Одной из наиболее важных проблем, характерных для систем, основанных на знаниях, является проблема представления знаний [5]. Для того, чтобы манипулировать всевозможными знаниями из реального мира с помощью компьютера, необходимо осуществить их моделирование. В таких случаях необходимо отличать знания, предназначенные для обработки компьютером, от знаний, используемых человеком. При большом объеме знаний надо упрощать последовательные отдельные элементы управления знаниями.

При проектировании моделей представления знаний надо учитывать такие факторы, как простота понимания и однородность представлений. Однородные представления приводят к упрощению управления знаниями и упрощению механизма управления логическими выводами. Представление знаний должно быть понятно и пользователю системы, и эксперту. В противном случае приобретение знаний и проведение их оценки затруднится. Можно выделить следующие типичные модели представления знаний:

- модель, которая основана на использовании фреймов;
- логическая модель;
- модель, которая основана на использовании правил (продукционная модель);
- модель семантической сети [2].

Язык представления знаний, основанных на фреймовой модели, эффективен для структурного описания сложных понятий и решения задач, в которых, в соответствии с ситуацией, желательно применять различные способы вывода. В то же время на таком языке затрудняется управление завершенностью и постоянством целостного образа. В частности, по этой причине существует опасность нарушения присоединенной процедуры, проблема заикливания процесса вывода.

Логические модели будут использоваться для выведения заключения с помощью силлогизма и представления знания в системе логики предикатов первого порядка.

Человеческая логика – это интеллектуальная модель с нечеткой структурой. В модели правил знания представлены совокупностью правил вида «ЕСЛИ – ТО». Продукционной системой называется система с базами знаний, основанная на этой модели. Эти системы бывают двух типов – с прямым и обратным выводом.

В продукционной системе с обратным выводом строится дерево с помощью правил *И/ИЛИ*, связывающее в единые целые факты и заключения, оценка этого дерева на основе факта, имеющая в базе данных, и есть логический вывод. Логические выводы бывают прямые, обратные и двунаправленные [3]. Для прямых выводов отправной точкой является процесс оценки, предоставленные данные приостанавливаются на отрицательных узлах, а

гипотезы, соответствующие наивысшему уровню дерева (корню), используются в качестве выводов (если не все дерево было пройдено). Однако для таких выводов характерно дерево, а также большие объемы данных, которые не имеют прямого отношения к выводам, которые излишни. Преимуществом обратного вывода является то, что оценивается только та часть дерева, которая имеет отношение к заключению, если отрицания или утверждения невозможны, то порождения дерева лишает смысл. В двунаправленных выводах сначала запрашиваются данные, которые необходимы для принятия решений о пригодности данной гипотезы, а затем оцениваются небольшие объемы полученных данных и выбираются гипотезы (по примеру прямого вывода). На основе этих выводов можно реализовывать более гибкие и мощные системы.

Продукционная система включает три компонента: интерпретатор для получения логического вывода, база правил, состоящая из набора продукций (правил вывода), база данных, содержащая множество фактов. Выводы выполняются в виде цикла «понимание–выполнение», т. к. каждый цикл, обновляет базу данных, которая будет выполнять часть выбранных правил. В результате содержимое базы данных преобразуется от первоначального к целевому, т.е. целевая система синтезируется в базе данных. Для продукционной системы характерен цикл выбора и выполнения правил, т. к. из-за необходимого периодического сопоставления с образцом в базе правил с увеличением чисел правил скорость вывода существенно уменьшается. Следовательно, такие системы не годятся для решения крупномасштабных задач.

Упорядочим слабые и сильные стороны хорошо известных продукционных систем.

Сильные стороны: простота создания и понимания отдельных правил; простота пополнения и модификации; простота механизма логического вывода.

Слабые стороны: отличие от структуры человеческих знаний; взаимное отношение неясности правил; обработка крайне низкой эффективности; сложность оценки; логический ввод при отсутствии гибкости.

Таким образом, если объектом является небольшая задача, то выявляется только сильная сторона продукционной системы. В случае увеличения объема знаний, необходимо делать гибкие выводы или увеличивать скорость вывода, требуются структурированные знания и решение сложных задач. Тогда необходимо группировать знания и структурировать базу данных.

Фреймовая модель впервые предложена М. Минским [4]. В общем случае фрейм означает абстрактный образ понятия, объекта, явления и т. д. Информация, которая относится к фрейму, содержится в слоте (составляющей фрейма). Все фреймы органически

взаимосвязаны и объединяют декларативные и процедурные знания, и формируется единая фреймовая система.

Теория фреймов служит толчком для развития нескольких языков представления знаний, которые стали довольно распространенными языками благодаря своей гибкости и широким возможностям. Язык представления знаний, основанный на фреймовой модели, особенно эффективен для сложных концепций и структурных описаний решения проблем, в которых, в зависимости от ситуации, используются различные методы дедукции. В то же время на таком языке постоянство целостных образов и контроль полноты затруднены. В частности, по этой причине существуют присоединенные процедуры больших опасных нарушений. Надо отметить, что фреймовая система без механизма присоединенных процедур чаще всего используется как системы продукции базы данных.

Модель семантической сети – это модель представления знания на основе методов семантической сети. Семантическая сеть – это информационная модель предметной области, имеющая вид ориентированного графа, вершинам которого соответствуют объекты предметной области, а дуги задают отношения между ними. Объектами могут быть понятия, события, свойства, процессы. Таким образом, семантическая сеть является одним из способов представления знаний. В названии соединены термины из двух наук: «семантика» в языкознании изучает смысл единиц языка, а «сеть» в математике представляет собой разновидность графа – набора вершин, соединённых дугами (рёбрами), которым присвоено некоторое число. В семантической сети роль вершин выполняют понятия базы знаний, а дуги (причем направленные) задают отношения между ними. Таким образом, семантическая сеть отражает семантику предметной области в виде понятий и отношений.

Для экспертной обучающей системы для самостоятельного изучения предмета, например, такого как «Теория автоматического управления», эффективным является представление знаний в виде семантико-фреймовой модели. При этом понятия, категории, объекты представляются в виде фреймов, а связь между фреймами осуществляется в виде семантических отношений.

Например, понятие «система управления» в рамках данного предмета можно характеризовать следующим фреймом: система управления – название фрейма; слоты – объект управления; регулятор; адаптер и т.д.

Фрейм в этом случае представляется в виде:

Система управления <(Объект управления - инерционный); (регулятор - ПИ регулятор);

(адаптация-к параметрическим возмущениям);...>.

Семантическая связь устанавливается между фреймами в виде отношений типа: система устойчива; в системе отсутствует автоколебание и т.д.

Фрейм имеет структуру:

название фрейма <(Слот 1, значение); (Слот 2, значение); ... (Слот N, значение)>.

В некоторых случаях структуру фрейма представляют в виде:

ИМЯ ФРЕЙМА:

(имя 1-го слота; значение 1-го слота),

(имя 2-го слота; значение 2-го слота),

.....

(имя N-го слота; значение N-го слота).

В теории фреймов предусматривается наследование свойств. И во фреймах, и в семантических сетях наследование происходит по АКО – связям (A-kind-of=это). Слот АКО указывает на фрейм более высокого уровня.

1-й фрейм

Система автоматического управления (САУ):

1-й слот: САУ, это система управления без участия человека,

2-й слот: САУ, состоит из объекта управления и регулятора,

3-й слот: Объект управления, выходные величины – это управляемые величины,

4-й слот: Регулятор, это устройство, которое воздействует на объект

.....

2-й фрейм

Устойчивость САУ:

1-й слот: Устойчивость САУ, это необходимое условие работоспособности,

2-й слот: Устойчивость линейных САУ – исследуется при помощи критериев устойчивости

.....

3-й фрейм

Критерии устойчивости линейных систем

1-й слот: Алгебраические критерии: критерий Гурвица, критерий Гаусса,

2-й слот: Частотные критерии: критерий Михайлова, критерий Найквиста

.....

4-й фрейм

Критерий Гурвица

1-й слот: Критерий Гурвица – это алгебраический критерий,

2-й слот: Критерий устойчивости по Гурвицу, заключается в положительности диагональных миноров матрицы, состоящих из коэффициентов характеристического полинома

.....

5-й фрейм

Характеристический полином

1-й слот: Характеристический полином определяется по передаточной функции системы, если передаточная функция представлена в виде правильной дроби $B(P)/A(P)$, то $A(P)$ – характеристический полином.

Рассмотрим пример – фрагмент семантико-фреймовой модели представления знаний при изучении предмета «Теория автоматического управления» (рис. 2).

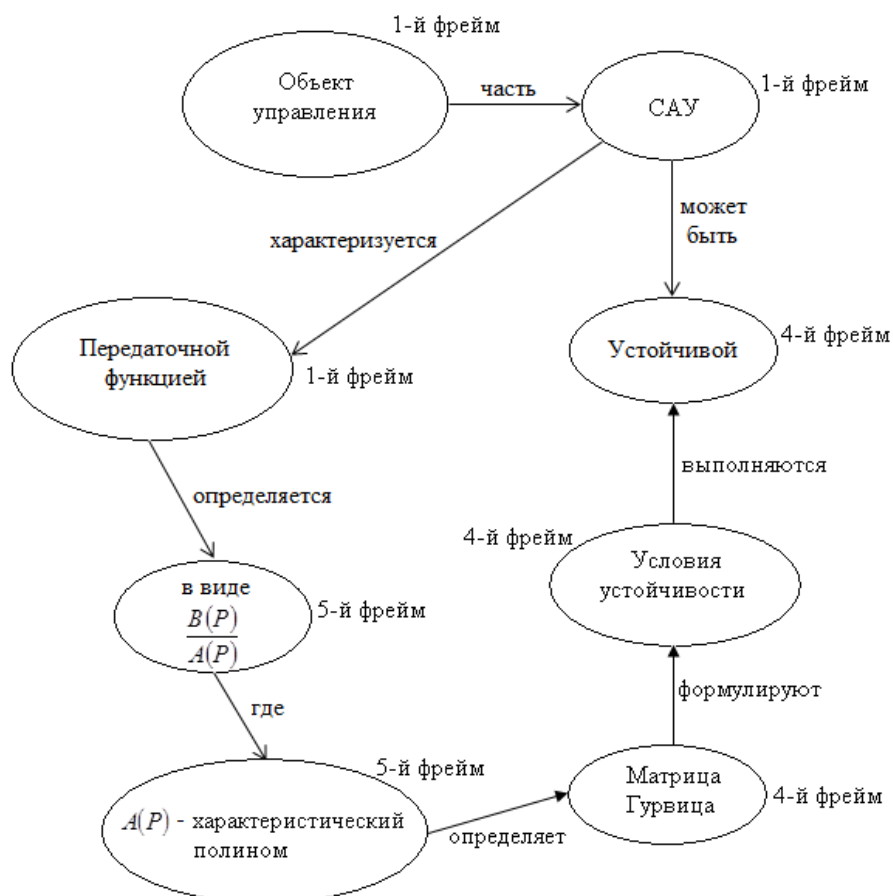


Рис. 2. Пример семантико-фреймовой модели представления знаний при изучении предмета «Теория автоматического управления».

Программная реализация модели была выполнена с использованием системы управления базами данных MS SQL, ориентированной на графический интерфейс разработки программного обеспечения Delphi. Экспертные системы имеют две категории пользователей и два отдельных входа, соответствующих различным целям взаимодействия пользователей с ЭС. Доступ к подсистеме приобретения знаний имеет возможность только эксперт. Вход в подсистему защищен паролем. В данной подсистеме эксперт может дополнять базу знаний новыми правилами и модификациями имеющихся. Экспертная система способна отвечать на определенные вопросы (рис. 3).

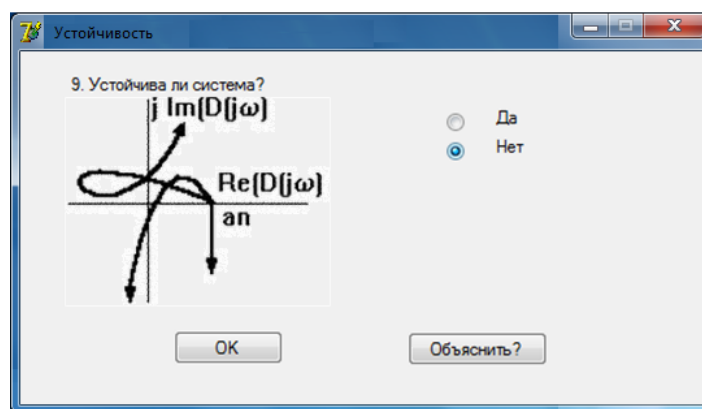


Рис. 3. Окно обучающей системы с возможностью перехода к ответу.

Пользователь может вводить параметры для определения устойчивости звена охваченной единичной обратной связью (рис. 4).

Рис. 4. Окно обучающей системы с возможностью ввода параметров для расчетов.

Если система устойчива, то выдается соответствующее сообщение (рис. 5).

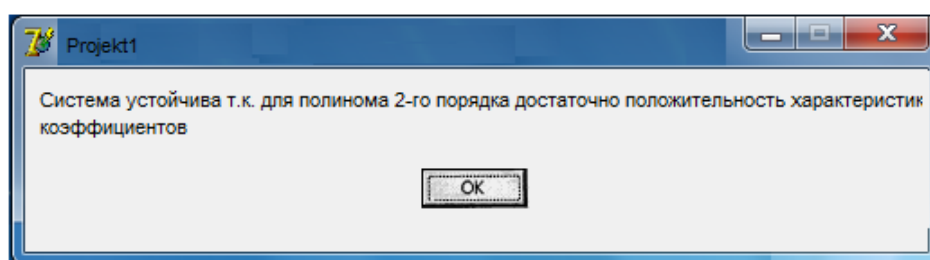


Рис. 5. Сообщение обучающей системы о результатах расчетов.

Таким образом, в ходе рассмотрения существующих моделей представления знаний, выявлена область их эффективного применения. Анализ показал рациональность применения семантико-фреймовой модели представления знаний для технических предметов со сложными логическими связями между их понятиями и определениями. В результате разработана конкретная семантико-фреймовая модель представления знаний, используемая при изучении раздела «Устойчивость» по дисциплине «Теория автоматического управления».

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
2. Нейлор К. Как построить экспертную систему / пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 286 с.
3. Нейман Ю. М., Хлебников В. А. Педагогическое тестирование как измерение. – М.: Центр тестирования МО РФ, 2000. – 67 с.
4. Осуга С. Обработка знаний / пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 293 с.
5. Уэно Х., Исидзука М. Представление и использование знаний. – М.: Мир, 1989. – 220 с.

МУСКАТИНЬЕВ А. В., ПОДГОРНОВ Д. А.,
ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ

Аннотация. В статье предлагается принципиальная схема источника питания светодиодного светильника, предназначенного для использования в медицинских учреждениях. Его отличительными чертами являются повышенная электрическая изоляция, применение пассивного корректора мощности, максимальный коэффициент стабилизации тока нагрузки. Выполнен сравнительный анализ пассивных корректоров мощности, приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: светодиодный светильник, пассивный корректор мощности, электронный трансформатор.

MUSKATINYEV A. V., PODGORNOV D. A.,
POWER SUPPLY FOR LED LAMP

Abstract. The article proposes a schematic diagram of the source for powering a LED lamp designed for use in medical institutions. Its distinguishing features are increased electrical insulation, the use of passive power corrector, and the maximum coefficient of stabilization of the load current. A comparative analysis of the passive power correctors is performed. The simulation results are presented.

Keywords: LED lamp, passive power corrector, electronic transformer.

К светодиодным светильникам, предназначенным для использования в медицинских учреждениях, предъявляют повышенные требования по электрической изоляции от напряжения сети. Степень стабилизации тока нагрузки также является немаловажным фактором в пользу светильника, поскольку приводит к увеличению срока его службы. Приведенные отличительные черты существенно влияют на конфигурацию функциональной и принципиальной схемы светильника. Рассмотрим это влияние на конкретном примере проектирования источника питания для светильника, реализованного на светодиодах типа 3W-290 Lm-3,6 В-700 мА-4300 К [1]. Внешний вид светодиода показан на рисунке 1. Свечение – теплое, белое. Предполагается использовать в светильнике 10 диодов, включенных последовательно. Тогда мощность P_n , выделяемая в нагрузке составит, примерно, 25 Вт. Для такого уровня потребляемой мощности использование корректора коэффициента мощности необязательно. Однако его применение будет предусмотрено. Питание светильника осуществляется от сети переменного тока 220 В $\pm 20\%$ с гальванической развязкой и повышенной электрической изоляцией. При выборе силовой части схемы и драйвера управления ключами необходимо добиться коэффициента

стабилизации тока нагрузки не более 3% и возможности регулировки яркости свечения светильника.

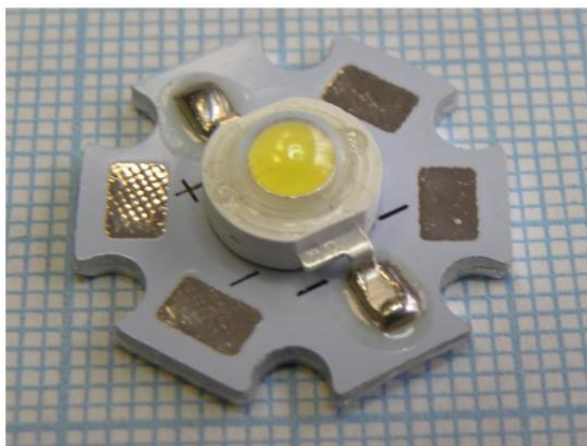


Рис. 1. Внешний вид используемого светодиода.

С учетом перечисленных требований была разработана функциональная схема источника питания светодиодного светильника, показанная на рисунке 2. Отличительной

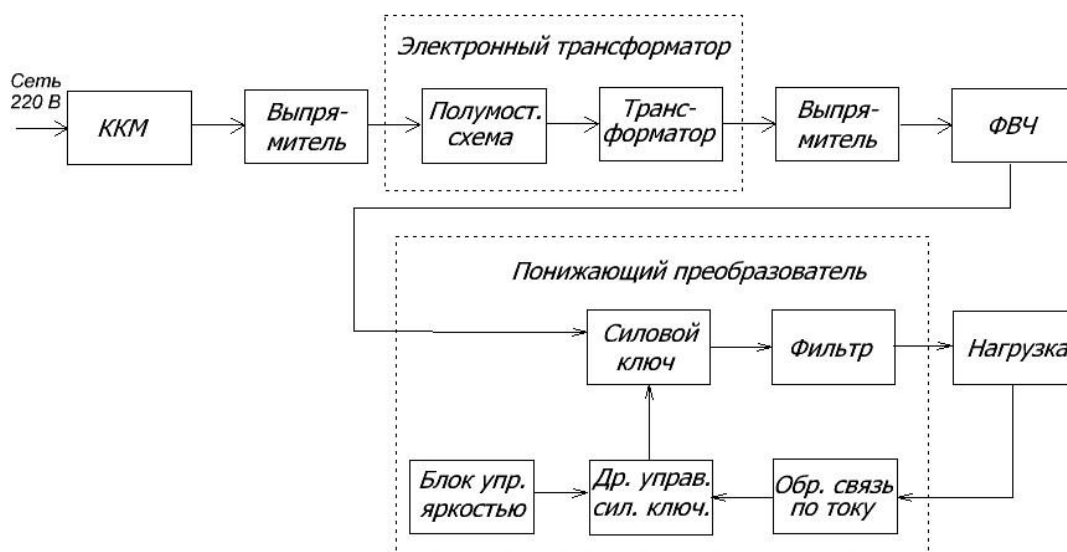
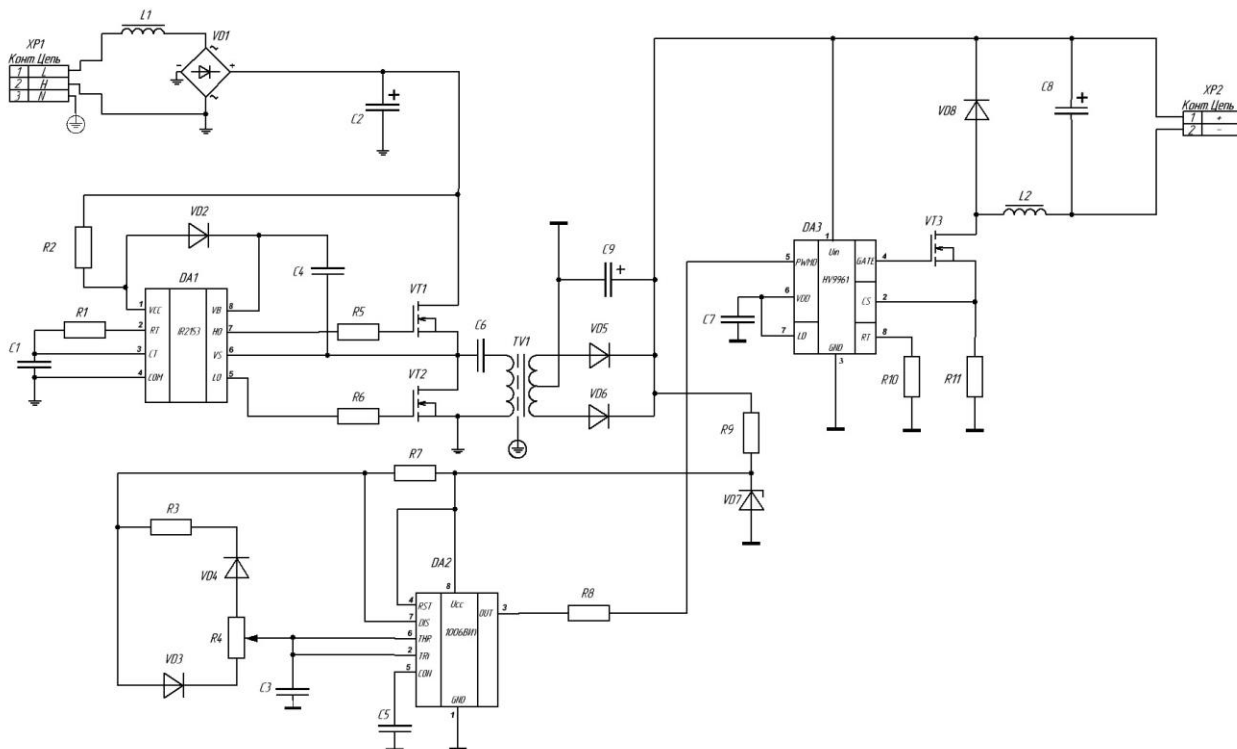


Рис. 2. Функциональная схема источника питания.

особенностью схемы является применение электронного трансформатора, состоящего из полумостового преобразователя и непосредственно высокочастотного трансформатора. Применение такого модуля позволяет обеспечить надежную гальваническую развязку от сети и сформировать оптимальное напряжение питания для силового каскада. Кроме этого, непосредственная связь нагрузки с силовым каскадом позволяет получить максимальный коэффициент стабилизации по току.

Принципиальная схема источника питания представлена на рисунке 3. В качестве



схемы управления силовым ключом VTЗ применен драйвер HV9961 фирмы Supertex. Он позволяет управлять внешним MOSFET транзистором, обеспечивая ток нагрузки до 1 А. Величина тока ограничивается суммарным зарядом со стороны затвора силового транзистора, который не должен превышать 25 нК для частоты переключения ≤ 100 кГц и быть менее 15 нК для частоты ≥ 100 кГц [2]. Ток нагрузки I_n (для нашего случая 700 мА) задается в соответствии с выражением:

В инструкции для пользователей тип драйвера в совокупности с силовыми элементами VT3, L2, C11 и VD8 определяют как обратногоходовой понижающий преобразователь. Однако по структуре силовой части он больше напоминает схему «чоппера» [3] с наличием цепи обратной связи по току. Элементом R10 задается время выключенного состояния t_{off} (а не частота) выхода драйвера *Gate*, предназначенного для управления силовым транзистором VT3. Выражение для определения указанного параметра может быть представлено как [2]:

$$t_{off} (\text{мкс}) = [R10(\text{ком}) / 25] + 0,3 \quad (2)$$

Время включенного состояния t_{on} косвенно зависит от ряда других параметров (индуктивности дросселя $L2$, входного напряжения U_{ex} , напряжения на нагрузке U_n), что в конечном итоге определяет номинальное значение периода $T = t_{off} + t_{on}$ и частоты переключения транзистора VT3, а также их отклонение относительно номинальных величин в процессе стабилизации тока нагрузки. При оценке приведенных параметров следует ориентироваться на ряд ограничений, указанных в инструкции пользователя [2, 4]. В первую очередь, это касается рабочего диапазона коэффициента заполнения D , выражаемого соотношением:

$$D = t_{on} / (t_{off} + t_{on}). \quad (3)$$

Режим стабилизации тока нагрузки с максимальной точностью 3% обеспечивается при изменении параметра D в диапазоне 0,1 – 0,75 [2]. Если в качестве номинального значения принять параметр $D = 0,5$, то из (2) вытекает, что $t_{on} = t_{off}$. Тогда можно ввести понятие номинального значения входного напряжения $U_{ном}$ драйвера и номинальной частоты работы силового ключа f_o , которые соответственно определяются как:

$$U_{ном} = U_n / D ; f_o = 1 / 2t_{off} \quad (4)$$

Последним важным параметром, который необходимо определить, это индуктивность дросселя фильтра $L2$. Для его вычисления можно использовать известное соотношение $L_2 = U_L * \Delta t / (\Delta I_L)$. За время выключенного состояния силового ключа в выходном LCD фильтре можно считать, что $U_L = U_n$, а $\Delta t = t_{off}$. Полный размах тока в дросселе ΔI_L примем равным $0,3 I_n$. Окончательно получаем:

$$L_2 = U_n * t_{off} / (0,3 I_n). \quad (5)$$

Регулировку яркости светильника с использованием драйвера HV9961 можно выполнять подачей постоянного напряжения на вход LD, или применять модулирующий сигнал ШИМ, подаваемый на вход PVMD. В схеме выбран второй способ – формирование сигнала ШИМ таймером 1006 ВИ1. Схема позволяет регулировать коэффициент заполнения выходного импульса в пределах от 0,1 до 0,9. Частота генератора с ШИМ может быть выбрана в широких пределах, например, (100 – 10000) Гц.

Электронный трансформатор светильника содержит высокочастотный понижающий трансформатор TV1, ключевые транзисторы VT1 и VT2, включенные по полумостовой схеме и драйвер управления ключами с встроенным задающим генератором IR2153.

Пассивный корректор коэффициента мощности (ККМ) состоит из элементов $L1$ и $C2$ [5]. Расчет параметров элементов ККМ может быть определен с использованием эмпирических зависимостей, приведенных ниже:

$$L1 = 1 / (4\pi^2 f^2); C2 * R_n \approx 3T_c = 60 \text{ мс}, \quad (6)$$

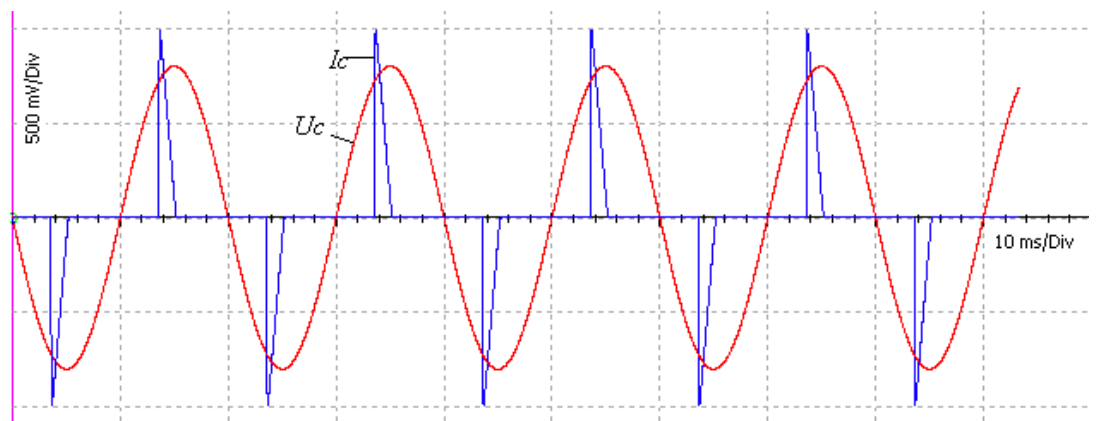
где: T_c – период сетевого напряжения, равный 20 мс;

f – резонансная частота $L1C2$ фильтра, выбранная равной первой гармонике выпрямленного напряжения 50 Гц;

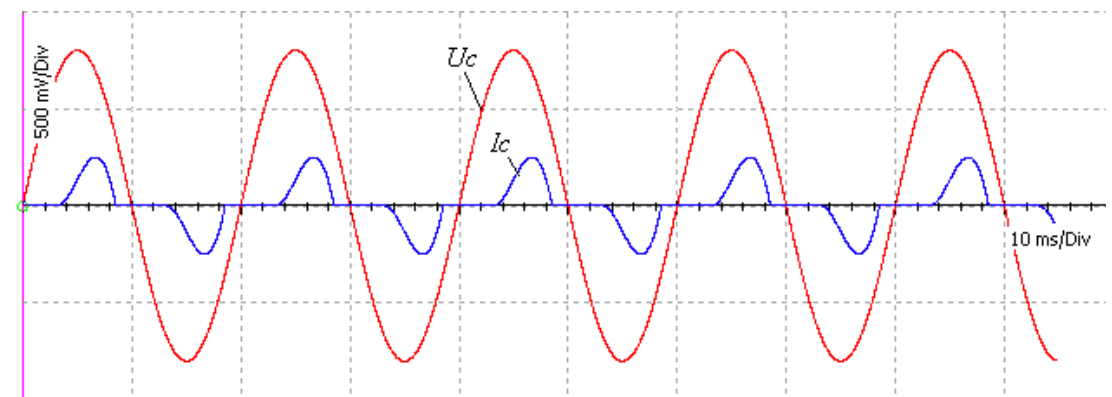
R_n – сопротивление нагрузки ККМ.

Для мощности P_n в нагрузке светильника равной 25 Вт и напряжении на выходе выпрямителя порядка 300 сопротивление нагрузки ККМ ориентировочно составляет $R = 3600$ Ом. С учетом выражений (6) параметры элементов ККМ для светильника равны: $L1 = 500$ мГ, $C2 = 17$ мкФ (примем 20 мкФ).

На рисунке 4 относительно входного напряжения U_c показана форма тока, потребляемого из сети I_c источником питания без входного дросселя (рис. 4а) и с ККМ, параметры элементов которого определены выше (рис. 4б).



а)



б)

Рис. 4. Форма токов, потребляемых из сети источником питания.

Из представленного рисунка видно, что амплитуда потребляемого из сети тока на рисунке 4а) в 4 раза больше по сравнению с рисунком 4б). Форма тока на рисунке 4б) более сглажена и близка к синусоиде. Однако оценка эффективности применения ККМ по

параметру коэффициента мощности $KM = \cos \varphi$ невозможна вследствие отличия формы тока от синусоиды. Для подобных систем применяется иная форма записи коэффициента мощности (PF – power factor):

$$PF = 1 / \sqrt{1 + (THD)^2}, \quad (7)$$

где THD – суммарное значение коэффициента нелинейных искажений в абсолютных единицах (*total harmonic distortions*).

Параметр THD определяется при моделировании электронных схем, например, в среде Multisim, в разделе Фурье-анализ. Указанный параметр вычисляется в процентах как суммарное значение коэффициента нелинейных искажений по формуле:

$$THD = \left[\sqrt{\left(\sum_{i=2} V_i^2 \right)} / V_1 \right] * 100\%. \quad (8)$$

То есть параметр вычисляется как корень квадратный из суммы квадратов каждой гармоники, начиная со второй, и делением результата на амплитуду основной гармоники.

Результаты Фурье-анализа проводились для числа гармоник равного 9. Дальнейшее увеличение этого параметра незначительно изменяло результат. Анализ схемы без ККМ, то есть только выпрямителя, нагруженного на рассчитанную емкость фильтра 20 мкф, показал ожидаемый худший результат. Для нее параметр THD равен 153% (1,53), а значение KM (PF) в соответствии с (7) равно величине 0,55. Для схемы на рисунке 1 с элементами, составляющими ККМ, параметр THD определен как 65% (0,65), а значение KM (PF), рассчитанное по формуле (7), соответствует 0,86.

Полученные результаты указывают на эффективность применяемой конфигурации ККМ по сравнению с обычной схемой. Дальнейшие исследования показали, что увеличение индуктивности дросселя уменьшает значение THD и улучшает форму входного тока. Окончательное решение следует принимать с учетом допустимых массогабаритных показателей и цены светильника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Светодиодные модули и сборки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.promelec.ru/catalog/1961/1962/1972/1/> (дата обращения 05.06.2019).
2. Драйвер светодиодов с режимом регулирования по среднему току [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://supertex-i.ru/doc/HV9961_ru.pdf (дата обращения 05.06.2019).
3. Семенов Б. Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов. – М.: СОЛОН-Р, 2001. – 327 с.

4. Медник А., Краснополянский Л. Взаимозаменяемость и функциональные различия между импульсными драйверами светодиодов HV 9910B и HV9961 производства Supertex Inc // Полупроводниковая светотехника. – 2009. – № 1. – С. 26–29.
5. Твердов И. Пассивные корректоры коэффициента мощности для однофазных и трехфазных модулей питания // Компоненты и технологии. – 2009. – № 4. – С. 94–97.

ВИЛКОВ Е. А., ИЛЬИН М. В.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОБСТВЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ИМПЕДАНСОВ
СИЛОВЫХ КРИСТАЛЛОВ IGBT-МОДУЛЯ¹**

Аннотация. В статье рассматривается тепловая модель IGBT-модуля на основе дискретного представления СПП. Предложен подход к определению собственных тепловых импедансов силовых кристаллов в составе IGBT-модуля для формирования тепловой модели на основе электротепловой аналогии. Данная модель учитывает зависимость теплового сопротивления и тепловой ёмкости силового кристалла от его расположения в модуле.

Ключевые слова: IGBT-модуль, тепловая модель, электротепловая аналогия, метод конечных элементов, собственное тепловое сопротивление.

VILKOV E. A., ILYIN M. V.

**PARAMETER DEFINITION OF THERMAL SELF- IMPEDANCES
OF IGBT MODULE POWER DEVICES**

Abstract. The article considers the thermal model of IGBT module based on the discrete representation of transistors and diodes. The authors propose an approach to definition of thermal self-impedances of power devices of IGBT module for the formation of a thermal model by electrothermal analogy. This model considers the dependence of thermal resistance and thermal capacity of power device on its location in the module.

Keywords: IGBT module, thermal model, electrothermal analogy, finite element method, thermal self-impedances.

В настоящее время преобразователи частоты, применяемые в составе электропривода, как правило, строятся на основе силовых полупроводниковых приборов (СПП) модульной конструкции. Такое решение имеет множество преимуществ с точки зрения надёжности, экономической эффективности и качества конечной продукции. Устройства, используемые в составе модуля, подобраны по электрическим и тепловым характеристикам уже на заводе-изготовителе и оптимизированы для работы в конкретной области применения.

Для повышения надёжности электропривода в современные системы управления встраиваются тепловые модели силовых ключей. Применение тепловых моделей позволяет

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №15-19-20057).

предсказать температуру полупроводникового прибора, оценить тепловой режим его эксплуатации и, в случае предельных нагрузок, предотвратить выход из строя электронного ключа и обмотки электродвигателя [1].

Достаточно часто подобные модели разрабатываются на основе метода электротепловой аналогии. Данные модели имеют множество достоинств, наиболее важные из которых это приемлемая точность расчёта температуры, низкие требования к вычислительным ресурсам устройства, возможность интегрирования тепловой модели непосредственно в систему управления [2; 3].

Однако электротепловая аналогия не лишена недостатков. Одним из постулатов данной теории является линейное распространение тепла. Таким образом, применение данных тепловых моделей в классическом виде ограничено теми областями, где основной тепловой поток распространяется в одном направлении от источника потока к радиатору. Такое распространение теплового потока наблюдается в дискретных СПП. Однако в модульной конструкции тепловые потоки от силовых кристаллов распространяются не только в сторону охладителя, но также части потоков распространяются в направлении соседних кристаллов, тем самым влияя на их тепловой режим.

Построение тепловых моделей в данном случае связано с определёнными трудностями. Необходимо точно знать физические параметры элементов конструкции, встречающихся на пути теплового потока, их геометрический размер, материалы и свойства, а также величину дополнительных тепловых потоков от соседних элементов. Данные параметры определить очень сложно в виду нелинейности распространения тепла. Кроме того, сложность теоретических расчётов существенно возрастает, поскольку одни и те же элементы конструкции в разной степени нагреваются разными приборами локально.

Поскольку каждый кристалл силового модуля имеет собственный путь отвода теплового потока, а элементы, через которые он проходит, нагреваются не равномерно, то для определения температуры полупроводниковых приборов было решено синтезировать собственную конфигурацию тепловой модели на базе RC-цепей типа Foster. Она изображена на рисунке 1.

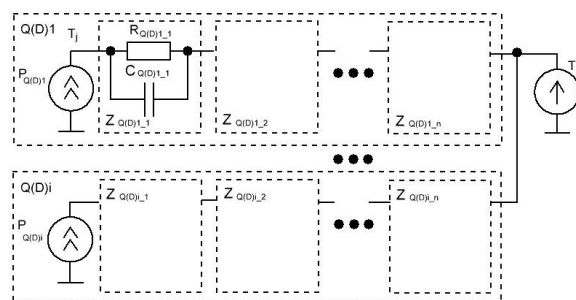


Рис. 1. Линейная электротепловая модель силового модуля.

Данная тепловая модель основывается на дискретном представлении полупроводниковых приборов, где каждый кристалл в составе модуля представляется отдельным элементом и имеет собственную линейную тепловую модель. Поскольку тепловые потоки от разных кристаллов проходят через одни и те же элементы конструкции, то они могут быть представлены несколькими RC цепями в разных тепловых моделях, и иметь разную локальную температуру. В связи с этим нет необходимости рассчитывать тепловое сопротивление и тепловую ёмкость для каждого элемента конструкции, достаточно чтобы их общая переходная характеристика теплового сопротивления кристалл-атмосфера, соответствовала переходному процессу для отдельного кристалла.

Недостатком данного подхода является невозможность прогнозирования температуры промежуточных элементов конструкции, таких как припой, медная подложка, изолятор, алюминиевое основание, радиатор. Данная тепловая модель не предполагает прямого переноса тепловой энергии от одного кристалла к другому, однако она учитывает влияние силовых элементов на путь распространения тепла в объёме общих подложек, основания и радиаторе. Теоретически рассчитать соотношение переданного тепла несколькими кристаллами достаточно сложно, поэтому был сделан вывод о необходимости определения тепловых потоков с помощью современных средств трёхмерного моделирования.

Программный продукт ANSYS Mechanical 17.0 позволяет определить как распространяется тепло в IGBT-модуле методом конечных элементов. В качестве исследуемого образца был выбран силовой IGBT модуль PS22A78-E, который представляет собой трехфазный инвертор, содержащий шесть IGBT-транзисторов и шесть обратно включённых силовых диодов. Внешний вид модуля и электрическая схема соединений СПП в модуле представлены на рисунке 2.

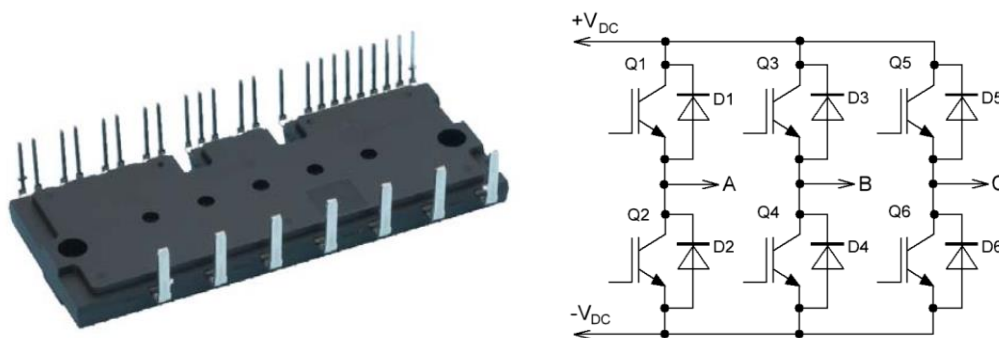


Рис. 2. Внешний вид модуля и электрическая схема соединений СПП в модуле.

На основе конструкции модуля была построена трёхмерная модель основных конструктивных элементов, через которые распространяется тепловой поток. В преобразователе силовой модуль является единой тепловой системой с его охладителем.

Поэтому исследование тепловых режимов IGBT-модуля проводилось совместно с его системой охлаждения. Разработанная трёхмерная модель представлена на рисунке 3. Геометрические размеры, соотношения между элементами, их взаимное расположение и материалы, используемые в модели, соответствуют реальной конструкции.

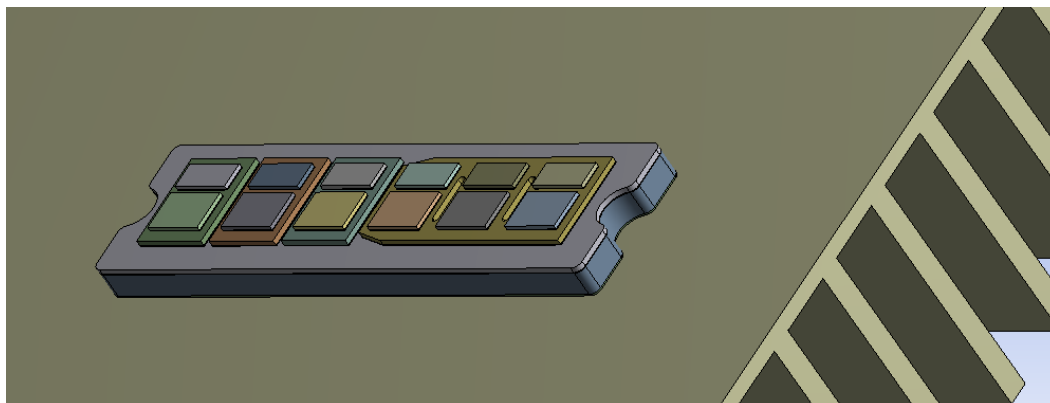


Рис. 3. 3D-модель IGBT-модуля с радиатором в ANSYS.

Для исследования тепловых эффектов в цифровой среде важной частью задачи было определить наиболее значимые граничные условия, являющиеся физическим обоснованием данной трёхмерной модели [4]. Были приняты следующие условия проведения эксперимента:

- источником нагрева является поток тепла постоянной мощности, эквивалентный мощности потерь, выделяемой на элементе в процессе работы электрической схемы;
- тепловой поток приложен к верхней грани силового кристалла и распространяется в сторону охлаждаемых элементов;
- вся поверхность радиатора, контактирующая с атмосферой, является излучателем конвекционного типа с величиной излучения $5 \cdot 10^{-6}$ Вт/мм², что соответствует естественной конвекции с воздухом;
- все остальные элементы конструкции покрыты компаундом, и величина излучения через компаунд пренебрежительно мала;
- температура, измеряемая на каждом элементе, отражает максимальное значение температуры в объёме, так как именно максимальная температура, будет сказываться на аварийных режимах работы СПП.

Определение величин теплового импеданса кристалл-атмосфера осуществлялось с помощью трёхмерной модели в среде ANSYS. Процедура определения заключалась в следующем. Поскольку для передачи тепла из одной области в другую необходима разность температур, необходимо было создать единственный тепловой поток кристалл-атмосфера и исключить обмен тепла между кристаллами соседних СПП. Это достигалось в 2 этапа. На

первом этапе кристаллы были нагреты до одинаковой температуры внешним источником постоянной температуры, и был измерен тепловой поток, проходящий через каждый элемент в сторону радиатора в установившемся режиме. На втором этапе кристаллы выступали в качестве нагревателя. Мощность потерь постоянной величины, выделяемая на них для достижения одинаковой температуры, была измерена в предыдущем опыте. Таким образом, был получен переходной процесс температур кристаллов в условиях постоянного нагрева соседей. Тепловой импеданс для каждого кристалла в каждый момент времени был рассчитан по формуле

$$Z_{th} = \frac{T_j - T_a}{P}, \quad (1)$$

где Z_{th} – собственный тепловой импеданс кристалла, T_j – температура нагреваемого кристалла, T_a – температура атмосферы, P – мощность потерь, вызывающая нагрев до температуры T_j .

Полученные зависимости теплового импеданса представлены на рисунке 4.

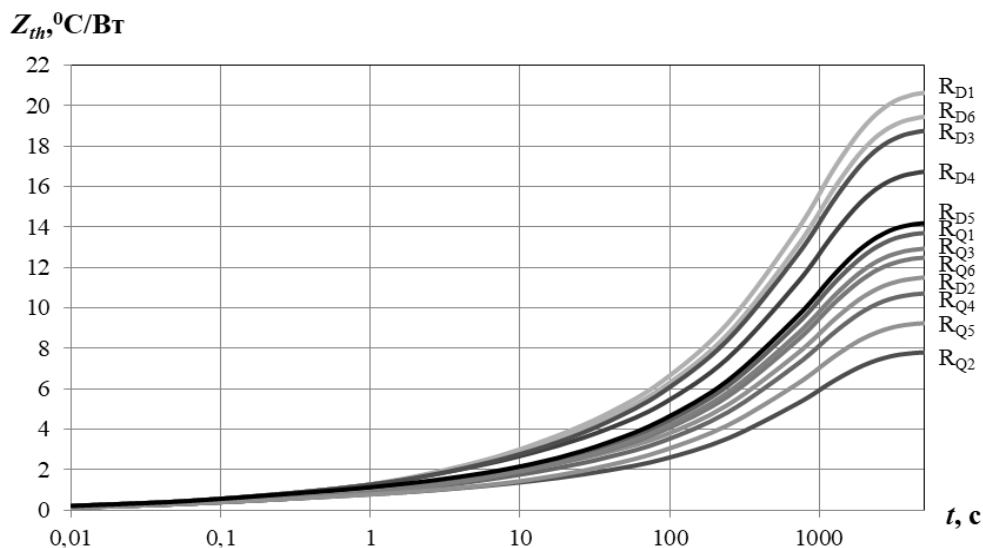


Рис. 4. Переходные тепловые сопротивления кристалл-атмосфера СПП.

Для перехода к тепловой модели на основе электротепловой аналогии используем аппроксимацию временных зависимостей собственных тепловых сопротивлений. Для аппроксимации используем функцию переходного процесса для RC цепи n-го-порядка

$$Z_{th}(t) = \sum_{i=1}^n R_{thi} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{thi}}} \right), \quad (2)$$

где R_{th} – тепловое сопротивление в установившемся значении;
 $\tau_{th} = R_{th}C_{th}$ – тепловая постоянная времени, где C_{th} – теплоёмкость.

Параметры уравнения аппроксимации (2) находились автоматически с помощью

программного комплекса LabVIEW. На рисунке 5 представлены результаты аппроксимации теплового импеданса одного из кристаллов.

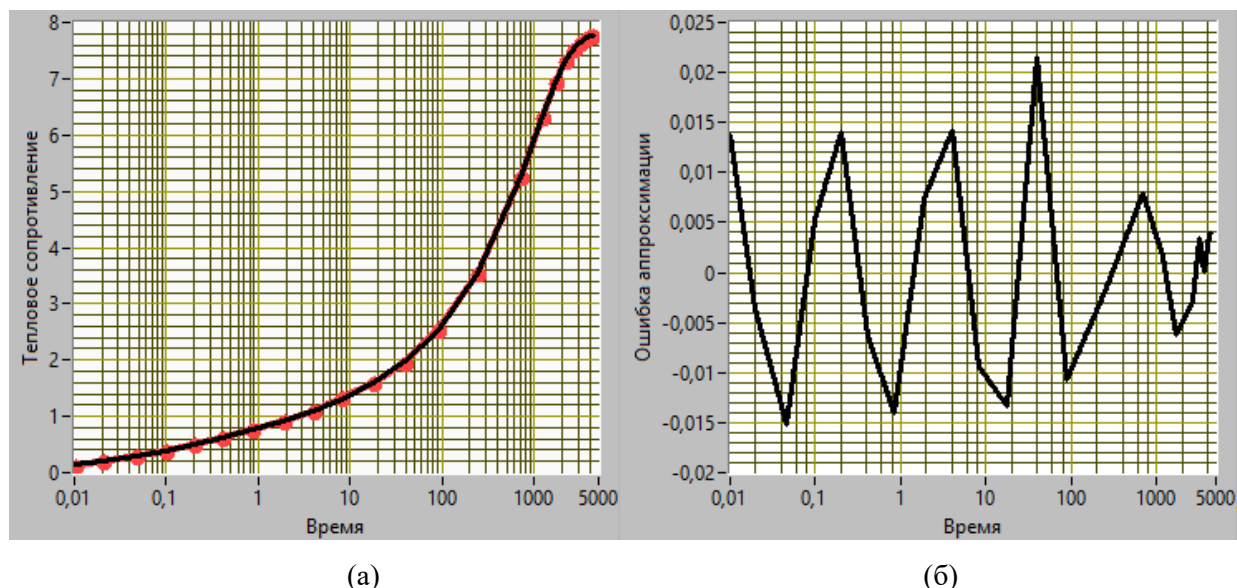


Рис. 5. Переходные тепловые сопротивления кристалл-атмосфера СПП.

На рисунке 5а входные данные моделирования отображены в виде красных точек, чёрной линией показана функция аппроксимации с подобранными коэффициентами. На рисунке 5б изображена абсолютная ошибка аппроксимации.

Полученные параметры функции аппроксимации приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры функции аппроксимации

Z	R1, °C/Вт	C1, Дж/°C	R2, °C/Вт	C2, Дж/°C	R3, °C/Вт	C3, Дж/°C	R4, °C/Вт	C4, Дж/°C	R5, °C/Вт	C5, Дж/°C	R _{макс} , °C/Вт	Собщ, Дж/°C
Q2	0,260	0,071	0,431	0,679	0,625	9,190	0,987	74,155	5,518	167,582	7,821	1,674
D2	0,330	0,041	0,626	0,424	0,905	5,643	1,483	46,535	8,182	112,839	11,527	2,609
Q4	0,271	0,071	0,459	0,858	0,947	6,173	1,432	49,050	7,632	120,718	10,741	1,427
D4	0,385	0,044	0,714	0,588	1,453	4,095	2,249	31,473	11,966	77,136	16,767	2,033
Q6	0,298	0,077	0,434	1,075	1,111	5,736	1,760	39,960	8,912	103,580	12,515	1,217
D6	0,458	0,053	0,777	0,918	1,719	4,670	2,638	28,599	13,901	66,602	19,493	1,407
Q1	0,309	0,077	0,484	1,162	1,170	6,000	1,969	36,107	9,805	94,099	13,737	1,143
D1	0,448	0,053	0,761	0,864	1,803	4,357	2,939	26,029	14,742	62,903	20,692	1,495
Q3	0,318	0,081	0,520	1,115	0,995	7,343	1,913	37,371	9,218	100,116	12,964	1,150
D3	0,375	0,046	0,710	0,570	1,503	4,203	2,796	24,776	13,406	68,732	18,790	2,093
Q5	0,252	0,070	0,432	0,678	0,632	9,702	1,391	48,093	6,559	140,102	9,266	1,676
D5	0,339	0,043	0,626	0,446	0,960	5,640	2,174	30,166	10,121	90,588	14,220	2,505

Экспериментальным способом было установлено, что наилучшая аппроксимация достигается при использовании значения $n = 5$. В этом случае среднеквадратическое отклонение

полученной функции от исходных данных моделирования составляет 0,0005, а количество параметров тепловой цепи не замедляет расчёт температуры. Аппроксимация данной функции обладает наибольшей сходимостью при начальных значениях теплоёмкости представленных числами различных разрядов, а начальные значения тепловых сопротивлений равны максимальному значению теплового сопротивления, разделённому на порядок цепи.

Исходя из полученных данных, максимальное тепловое сопротивление достигается в конце переходного процесса и равно сумме тепловых сопротивлений входящих в состав RC-цепей. Общая тепловая ёмкость соответствует последовательному соединению ёмкостей. На рисунке 6 изображено трёхмерное представление линейных RC цепей для транзисторов и диодов. Максимальное тепловое сопротивление и общая тепловая ёмкость представлены графиком для кристаллов в соответствии с их физическим расположением в модуле.

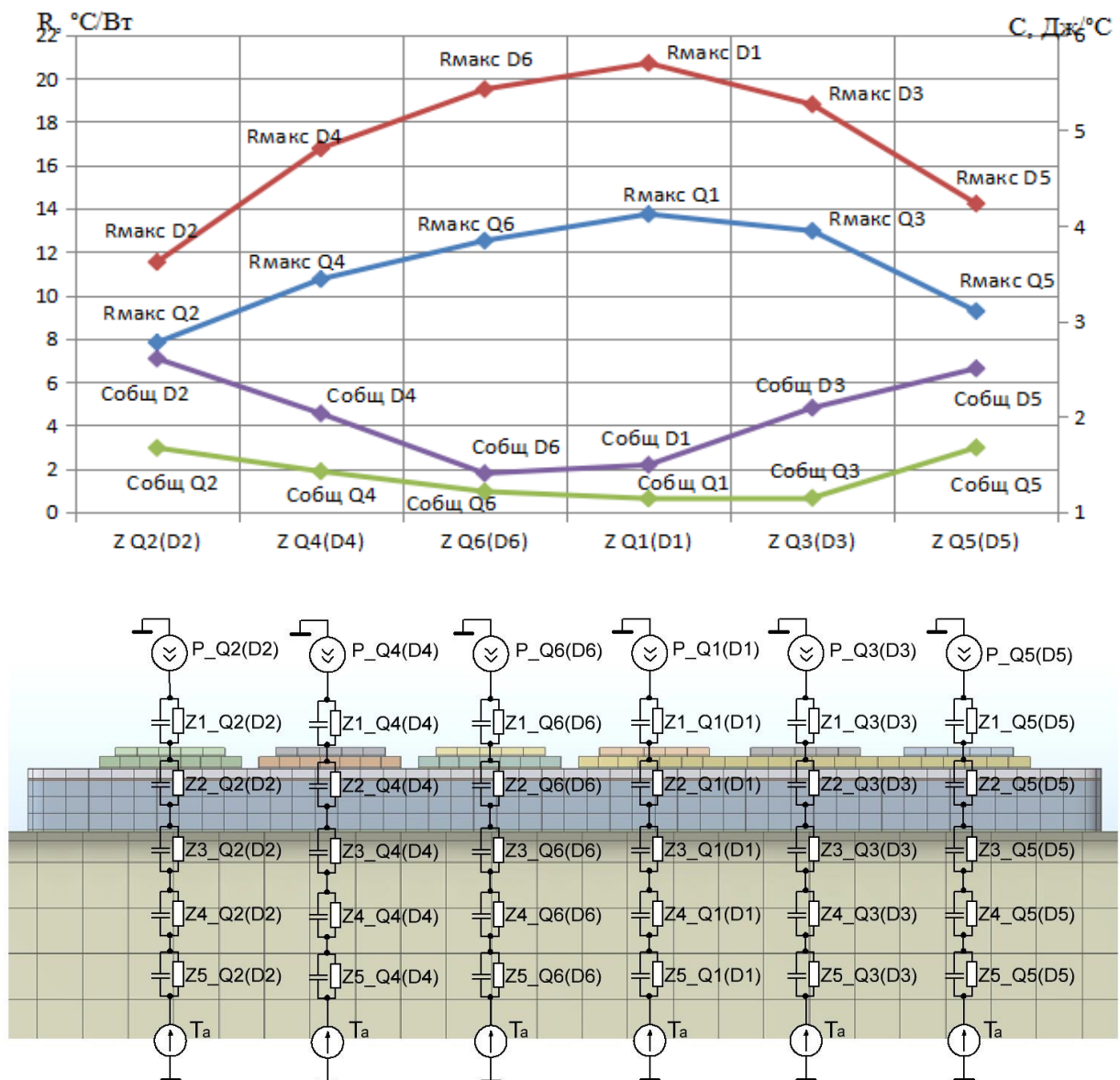


Рис. 6. Тепловые сопротивления и тепловые ёмкости в соответствии с представлением линейных электротепловых цепей на трёхмерной модели.

Таким образом, можно видеть, что собственные тепловые сопротивления полупроводниковых приборов сильно отличаются в зависимости от их расположения в силовом модуле, и даже если они имеют одинаковые электротепловые характеристики, они будут работать в разных тепловых режимах. Наиболее неблагоприятные условия работы будут у диода D1, который имеет наибольшее тепловое сопротивление кристалл-атмосфера, а, следовательно, хуже всего рассеивает тепло. Как видно из графиков, общее тепловое сопротивление диодов выше, чем тепловые сопротивления соответствующих транзисторов. Это связано с меньшей площадью поверхности диодов, через которую они выделяют тепло.

С другой стороны, центральные полупроводниковые кристаллы имеют наименьшую тепловую ёмкость. Это связано с тем, что область распространения тепла под этими кристаллами прогреется быстрее всего за счёт воздействия соседних кристаллов. А тепловая ёмкость кристалла D2 имеет наибольшее значение, поскольку с этой стороны имеется хороший отток тепла в виде большого радиатора.

В технической документации на данный модуль приведено значение среднего теплового сопротивления для транзистора и диода в устоявшемся режиме. Однако, как видно из исследования, параметры кристаллов СПП могут сильно отличаться в зависимости от положения в силовом модуле и их представления в тепловой модели. Предложенная тепловая модель и методика определения её параметров позволяет учесть эту разницу и точно определить тепловой режим полупроводниковых устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ilyin M., Bobrov M., Lapshina V., Briz F., Anuchin A. Analysis of the influence of the switching strategy on the IGBTs temperature in AC drives // 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – Riga, 2016. – P. 1–6.
2. Ilyin M., Popov A., Briz F., Gulyaev I. On-line temperature monitoring of power modules in AC drives // 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe). – Warsaw, 2017. – P. 1–10.
3. Thermal Equivalent Model of IGBT Modules 12th Mar.'15 LD-ES-150379 © Hitachi Power Semiconductor Device Ltd. – 2015.
4. Bahman A., Ma K., Blaabjerg F. A Lumped Thermal Model Including Thermal Coupling and Thermal Boundary Conditions for High-Power IGBT Modules // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – P. 2518–2530.

БЕСПАЛОВ Н. Н., ГОРЯЧКИН Ю. В., КЛЕЧКИН Е. И., ГРИГОРЬЕВ А. Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЛЬТЬЕ

Аннотация. В работе приводятся результаты исследования основных термоэлектрических параметров элементов Пельтье модели ТЕС–12706. Сняты зависимости температуры «холодной» стороны от протекающего через модуль тока, а также максимального времени удержания минимальной температуры «холодной» стороны от тока. Характеристики сняты с различным охлаждением элементов, а также с различным их расположением относительно друг друга.

Ключевые слова: элемент Пельтье, охлаждение, радиатор, температура, ток, характеристика.

BESPALOV N. N., GORYACHKIN YU. V., KLECHKIN E. I., GRIGORIEV A. G.

STUDY OF THERMOELECTRIC PARAMETERS OF PELTIER ELEMENTS

Abstract. A study of the basic thermoelectric parameters of the Peltier elements of the TEC–12706 model is carried out. The dependences of the cold side temperature on the currents flowing through the module as well as the maximum retention time of the minimum cold side temperature on the currents were found out. The data was read off different cooling of the elements and off their different location to each other.

Keywords: Peltier element, cooling, radiator, temperature, current, characteristic.

При эксплуатации полупроводниковых приборов их надежность обуславливается исходным качеством и режимами эксплуатации. Для повышения надежности полупроводниковых приборов (ПП) и устройств электроники в целом требуется обеспечить наиболее оптимальные режимы их эксплуатации. Для решения этой задачи нужно иметь информацию о значениях параметров каждого отдельного прибора, в том числе о значениях температурных параметров и возможностях их работы при высокой и низкой температуре.

Стандартами утверждены несколько видов испытаний, проводящихся под воздействием низкой температуры. Каждое испытание предназначено для проверки различных параметров ПП, зависящих от температуры.

В разрабатываемом аппаратно-программном комплексе для охлаждения ПП при проведении испытаний в качестве охладительного элемента применяется элемент Пельтье, способный создавать разницу температуры при протекании через него постоянного тока.

При разработке комплекса необходимо иметь информацию о параметрах элемента Пельтье при различных значениях тока через элемент и методах отвода тепла с «горячей»

стороны.

Для исследования использовались элементы Пельтье ТЕС–12706, рассчитанные на максимальный ток 6 А. Данные модули способны поддерживать разность температуры до 75 °С. Габаритные размеры модуля 40×40×3,8 мм.

Первое испытание проводилось для одиночного элемента Пельтье без дополнительного теплоотвода. В результате были получены зависимости, показанные на рисунках 1 и 2. На рисунке 1 изображена зависимость минимальной температуры «холодной» стороны элемента Пельтье T_{min} от тока I , на рисунке 2 — зависимость времени поддержания минимальной температуры t , т.е. времени, в течение которого температура холодной стороны не станет возрастать, от тока I .

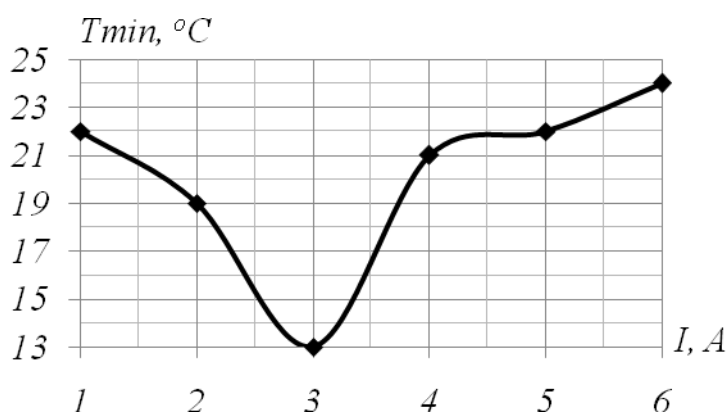


Рис. 1. Зависимость минимальной температуры «холодной» стороны элемента Пельтье от протекающего через него тока.

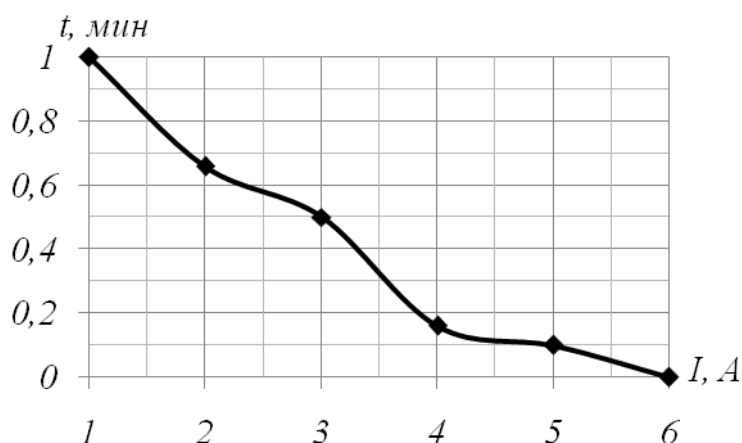


Рис. 2. Зависимость времени поддержания минимальной температуры элемента Пельтье от протекающего через него тока.

Из результатов измерений видно, что минимально достигнутая температура элемента Пельтье без отвода тепла составляет +13 °С, а время поддержания данной температуры не превышает одной минуты.

В соответствии с выводами предыдущего испытания, второе испытание проводилось для одиночного элемента Пельтье с радиатором на «горячей» стороне. Использовался радиатор с габаритными размерами 100×172×60. Площадь охлаждения равна 1 100 см². Для улучшения теплообмена между охладителем и элементами Пельтье использовалась термопаста. В результате были получены зависимости, показанные на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 изображена зависимость минимальной температуры «холодной» стороны элемента Пельтье от протекающего через него тока, на рисунке 4 — зависимость времени поддержания минимальной температуры «холодной» стороны элемента Пельтье от протекающего через него тока.

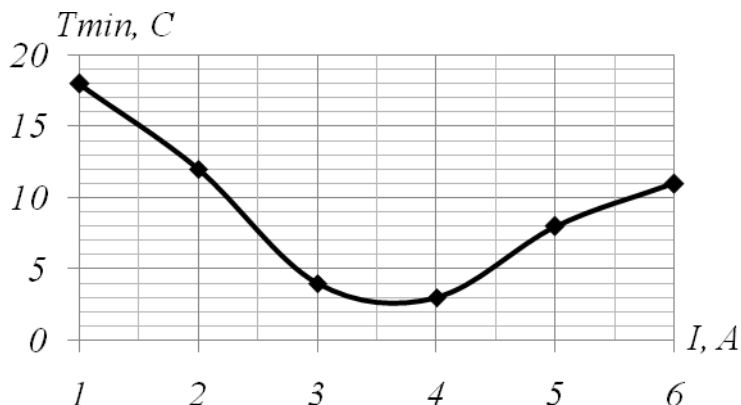


Рис. 3. Зависимость минимальной температуры «холодной» стороны элемента Пельтье от протекающего через него тока.

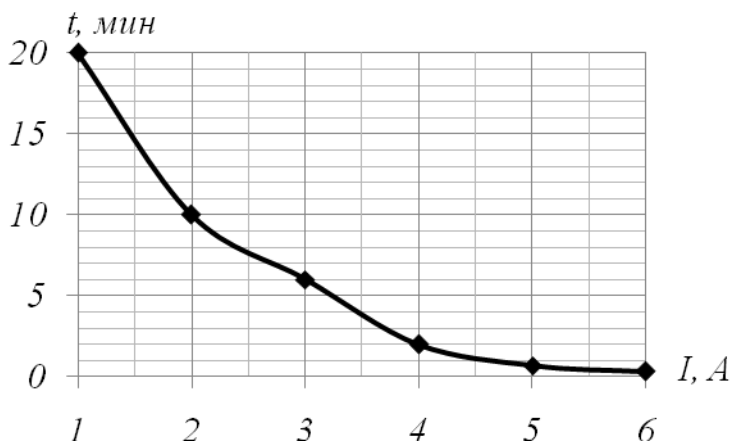


Рис. 4. Зависимость времени поддержания минимальной температуры элемента Пельтье от протекающего через него тока.

Результаты показывают, что минимальная достигнутая температура «холодной» стороны $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а время поддержания минимальной температуры элемента Пельтье при средних токах возросло до 5 минут.

Из предыдущего испытания ясно, что с помощью одиночного элемента Пельтье, даже с дополнительным охлаждением, получить отрицательную температуру достаточно проблематично, поэтому была сконструирована система из трех элементов Пельтье, где два элемента Пельтье охлаждают третий. Система использует активный теплоотвод. Внешний вид данной системы показан на рисунке 5.



Рис. 5. Внешний вид системы элементов Пельтье с активным охлаждением.

Принцип работы данной системы следующий. Два нижних элемента Пельтье установлены на радиатор, «горячей» стороной к нему, для обеспечения хорошего теплоотвода. Соединение элементов с радиатором, для лучшей теплопроводности, промазано термопастой КПТ-8. На эти два модуля сверху установлен еще один таким образом, что его «горячая» сторона находится в контакте с «холодными» сторонами нижних элементов Пельтье. Соединение верхнего и нижних элементов Пельтье также промазано термопастой для лучшего теплового контакта. Сверху элементы Пельтье прижаты пластиной, которая винтами крепится к радиатору (для лучшего теплового контакта). Таким образом, спаренные нижние элементы Пельтье отводят тепло с «горячей» стороны верхнего, за счет чего «холодная» сторона верхнего модуля охлаждается гораздо сильнее, нежели у одиночного элемента Пельтье.

В результате испытания данной системы были получены зависимости, показанные на рисунках 6 и 7. На рисунке 6 показана зависимость минимальной температуры «холодной» стороны элемента Пельтье от тока, на рисунке 7 – зависимость времени поддержания минимальной температуры «холодной» стороны элемента Пельтье от протекающего через

него тока.

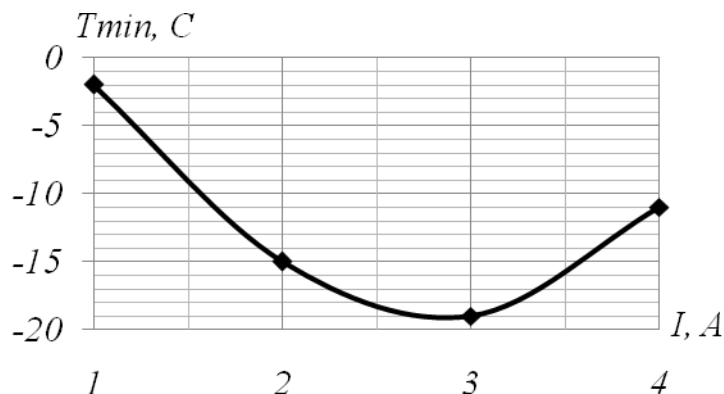


Рис. 6. Зависимость минимальной температуры «холодной» стороны элемента Пельтье от протекающего через него тока.

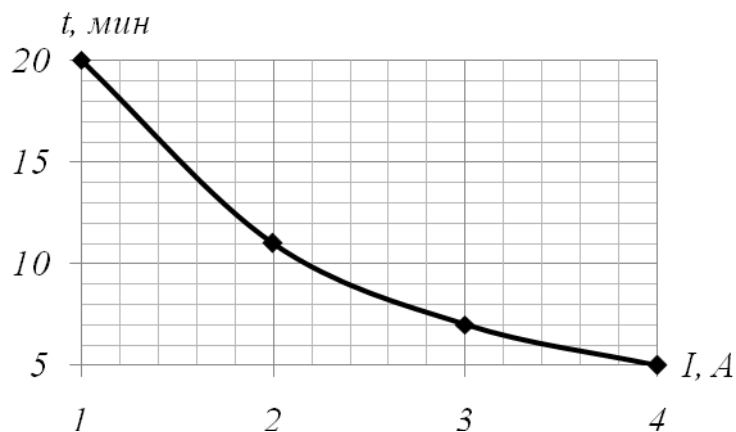


Рис. 7. Зависимость времени поддержания минимальной температуры элемента Пельтье от протекающего через него тока.

Из графиков видно, что минимальная достигнутая температура «холодной» стороны составляет $-19\text{ }^\circ\text{C}$, а время устойчивого состояния элемента Пельтье при средних токах выросло до 10 минут. При токе 1 А удалось добиться устойчивого состояния элемента Пельтье. Из данного испытания видно, что эффективность данной конструкции намного выше одиночного элемента Пельтье, а минимальная температура гораздо ниже.

Были проведены испытания данной установки с активным охлаждением, при котором было достигнуто устойчивое состояние при токе 2 А. Температура «холодной» стороны при этом стабилизировалась на уровне $-5\text{ }^\circ\text{C}$.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1) одиночный элемент Пельтье не способен создавать необходимый стабильный температурный режим в установившемся режиме продолжительное время ввиду саморазогрева выделяющейся в нем электрической энергии;

2) для длительной работы элемента Пельтье в установившемся режиме с поддержанием одной из поверхностей элемента отрицательной температуры необходим эффективный отвод тепла от противоположной нагреваемой поверхности с помощью различных охлаждающих устройств, включая системы пассивного и активного охлаждения;

3) наибольшее охлаждение поверхности элемента Пельтье достигается при значении тока через элемент равное примерно половине его предельного тока.

Далее результаты данного исследования будут применены при создании устройства для испытания маломощных полупроводниковых приборов при определении их электрических и тепловых параметров и характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудометов В. Полупроводниковые холодильники Пельтье [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ixbt.com/cpu/peltje.html> (дата обращения 01.06.2019).
2. Элемент Пельтье TEC1-12706. Характеристики, применение, условия эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mypractic.ru/element-pelte-tec1-12706-xarakteristiki-primenenie-usloviya-ekspluatacii.html> (дата обращения 01.02.2019).

ХОЛОПОВ А. С., БАЛЬЗАМОВ А. Ю.

**ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БАТАРЕЙНОГО ПИТАНИЯ
УДАЛЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ДАТЧИКОВ**

Аннотация. В статье рассматривается целесообразность батарейного питания для удаленного датчика, применяемого в системе беспроводного сбора данных. Приводятся расчетные графики, показывающие примерное время работы устройства сбора данных в зависимости от мощности передатчика, времени опроса датчиков и при различных типах батарей.

Ключевые слова: автоматизация, датчик, компонент, АЦП, контроллер, приемопередатчик, батарея, аккумулятор.

HOLOPOV A. S., BALZAMOV A. YU.

EXPEDIENCY OF BATTERY POWER FOR REMOTE WIRELESS SENSORS

Abstract. The article examines the expediency of battery power for a remote sensor used in a wireless data collection system. The authors calculated the graphs showing the approximate operating time of the data collection device, depending on the transmitter power, sensor polling time and types of batteries.

Keywords: automation, sensor, component, ADC, controller, transceiver, battery, accumulator.

Уже достаточно давно в мире термин «автоматизация» перестает ассоциироваться со словосочетанием «технологический процесс». Это значит, что автоматизация все больше проникает в разные сферы жизни и деятельности. Все большее количество вещей оборудовано датчиками и исполнительными устройствами и не обязательно, что эти вещи – сложные технические устройства, даже не обязательно, что они вообще электрические.

Например, можно оборудовать датчиком почтовый ящик, чтобы знать, не приходило ли вам письмо и не обязательно для этого проводить к нему электрический и информационный кабель, достаточно оснастить его датчиком, радиопередатчиком и батареей.

По замыслу в удаленном устройстве сбора данных применяются три основных компонента – контроллер, АЦП и приемопередатчик. Рассмотрим пример построения такого устройства на основе компонентов с малым энергопотреблением. В качестве контроллера была выбрана микросхема компании Atmel семейства AVR – Atmega48P [1; 2]. В обозначении этой микросхемы суффикс «P» расшифровывается как «picoPower» – семейство экономичных AVR-контроллеров. Также в устройстве будет применяться внешний АЦП

ADS1115, ток потребления которого в режиме измерения равен всего двум микроамперам [3]. Самый энергопотребляющий компонент – приемопередатчик RFM95 [4]. Данный приемопередатчик отличается от своих аналогов наличием различных режимов сна и ожидания, а также в основе своей имеет технологию приема/передачи LoRa, одна из особенностей которой – малое энергопотребление в рабочих режимах [5]. В таблице 1 указано энергопотребление каждого компонента в различных режимах.

Таблица 1

**Значения потребляемых токов компонентами устройства
в разных режимах при напряжении питания 3,3 В**

Компонент	Рабочий режим, мА	Режим ожидания, мкА
ATmega48P	0,4	0,2
ADS1115	0,15	0,6
RFM95	20–120	0,2

Отсюда можно определить энергопотребление устройства в рабочем режиме и в режиме ожидания при различной продолжительности нахождения в каждом из них. Энергопотребление модуля приема и передачи данных изменяется довольно в широких пределах, причина этому – различная выходная мощность, которую можно задавать в зависимости от удаления модуля от приемника. Соответственно, можно рассчитать два значения потребляемых устройством токов – при максимальном удалении от приемника и при минимальном. С учетом потребления вспомогательных цепей это будет составлять около 21 мА и 121 мА соответственно. В режиме ожидания устройство потребляет 0,0002 мА.

Энергопотребление зависит от режима работы конкретного устройства, ведь логика работы следующая – при первом включении устройства оно посылает запрос на «головной контроллер», спрашивая «как часто и какое измерение мне производить?», на что получает нужный ответ. В дальнейшем уже от этого ответа зависит то, как часто оно будет выходить из режима ожидания в рабочий режим, который, исходя из технического описания приемопередатчика, длится около 400 мс. В это время включается выход его из режима сна и передача 8 килобайт данных. Например, если требуется производить опрос какого-либо датчика каждую минуту, то из 60 секунд ожидания примерно половину секунды устройство находится в рабочем режиме.

Расчет времени работы устройства от батареи осуществляется по формуле:

$$t = C/I,$$

где t – время работы устройства [ч]; C – емкость источника питания [А*ч]; I – средний потребляемый ток в течение часа работы устройства [А].

На рисунках 1–4 представлены расчетные графики, показывающие примерное время работы устройства при трех разных значениях мощности передатчика, разном времени опроса датчиков и для различных типов батарей.

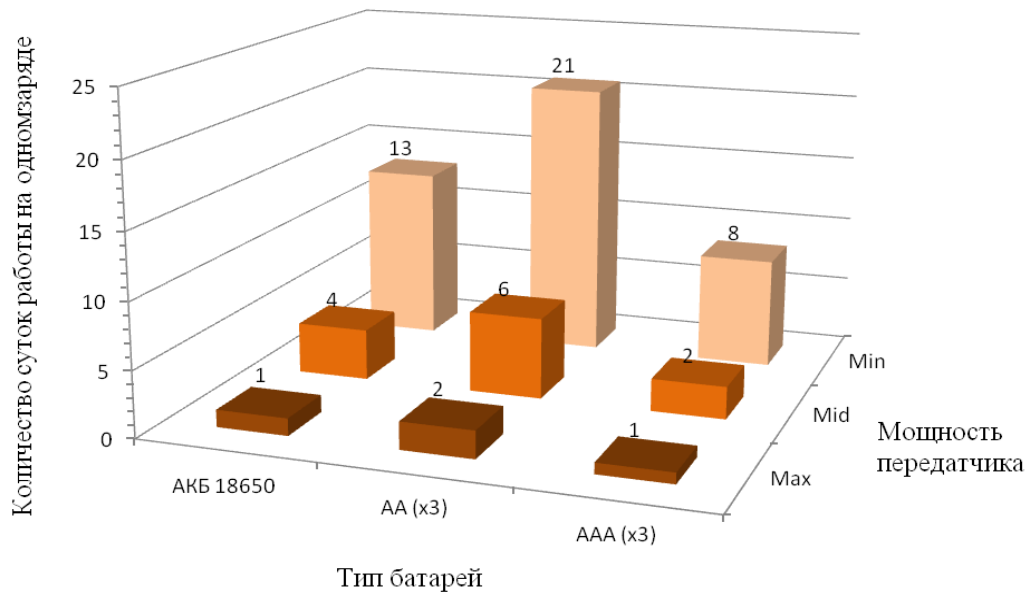


Рис. 1. Определение времени работы датчиков при их опросе один раз в секунду.

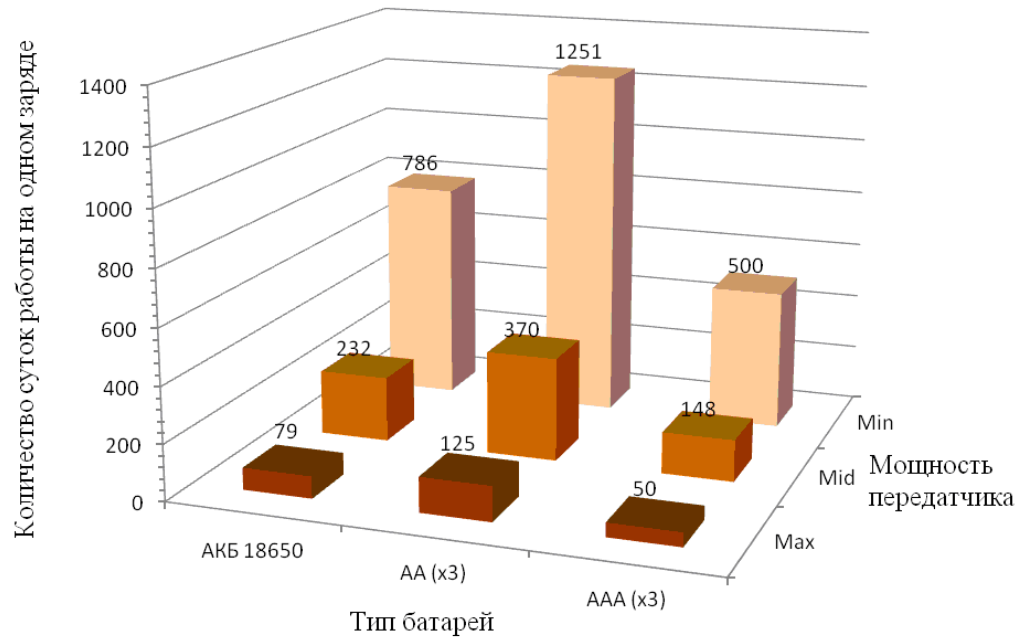


Рис. 2. Определение времени работы датчиков при их опросе один раз в минуту.

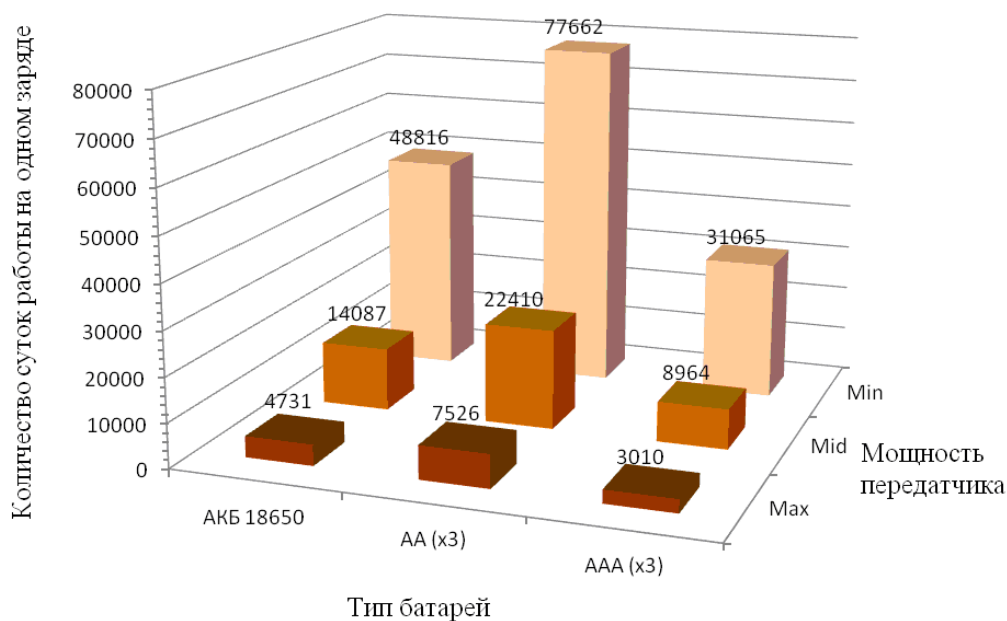


Рис. 3. Определение времени работы датчиков при их опросе один раз в час.

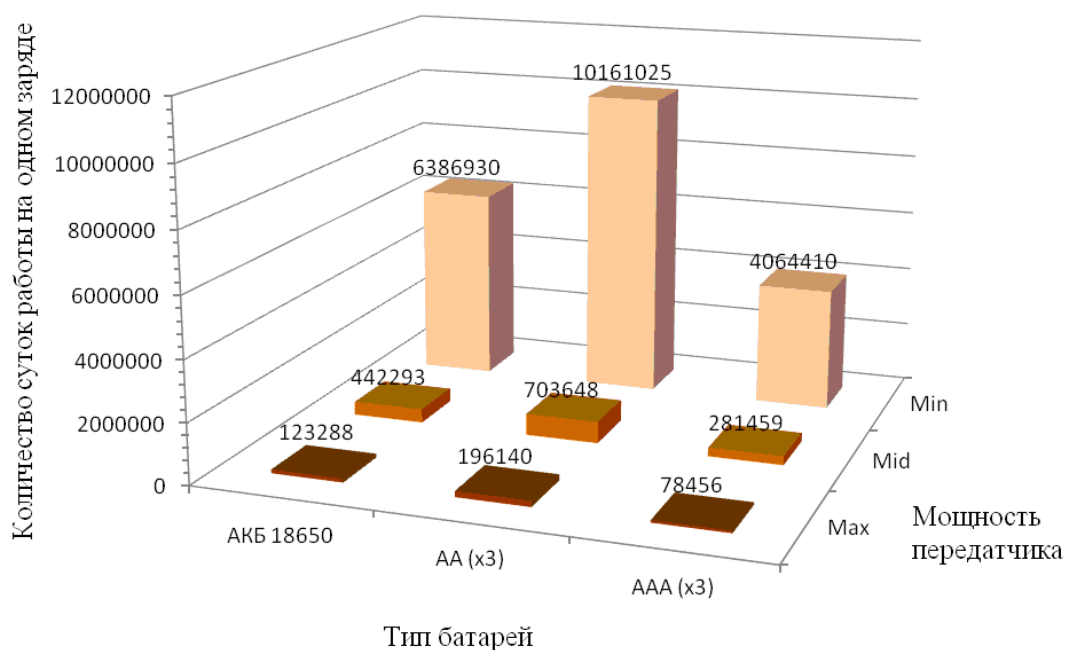


Рис. 4. Определение времени работы датчиков при их опросе один раз в сутки.

В приведенных графиках представлены результаты упрощенных расчетов по усредненным исходным данным о количестве времени, которое устройство может проработать. В них не включено множество различных факторов, таких как окружающая температура, конкретный тип и марка батарей и датчиков, не говоря уже о том, что такое большое время среднестатистическая батарея даже без нагрузки не продержит емкость, и разрядится за счет саморазряда.

Но даже без учета всех дополнительных факторов по результатам анализа можно судить о целесообразности применения батарейного питания в устройствах удаленного беспроводного сбора данных при наличии возможности оперативной замены батарей по заранее разработанному расписанию в зависимости от необходимой частоты опроса датчиков и требуемой мощности передатчика. Например, при опросе датчиков один раз в минуту и средней мощности передатчика, батареи типа АА (х3) в рассматриваемом устройстве необходимо заменять примерно раз в год.

ЛИТЕРАТУРА

1. AVR [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/AVR> (дата обращения 16.09.2018).
2. Atmel. Datasheet ATmega48P/PV / 88P/PV / 168P/PV. / © Atmel Corporation. – CA, San Jose, 2016. – 467 с.
3. Texas Instruments. Datasheet ADS1113, ADS1114, ADS1115. / © Texas Instruments Incorporated. – Texas, Dallas, 2018. – 53 с.
4. Hoperf electronic. Datasheet RFM95/96/97/98 (W). / © HOPE MICROELECTRONICS CO., LTD. – China, Guangdong, 2006. – 121 с.
5. LoRa [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/LoRa> (дата обращения 17.09.2018).