

А. А. Акимов, Д. В. Дерябин, В. П. Буц, Н. В. Горячев, Г. П. Разживина

СТРУКТУРА И СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДУЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ АЗОТА

A. A. Akimov, D. V. Deryabin, V. P. Buts, N. V. Goryachev, G. P. Razzhivina

STRUCTURE AND CIRCUIT DESIGN OF THE AUTOMATIC NITROGEN PUMP MODULE

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение электрической прочности вакуумных приборов является актуальной задачей. Для повышения электрической прочности вакуумных электронных приборов активно применяются лабораторные установки, имеющие в своем составе тригatronные разрядники. Необходима разработка модуля автоматической накачки азота в рабочее пространство тригatronных разрядников. *Материалы и методы.* Вводится импульсная тренировка высоковольтных вакуумных приборов высоковольтными наносекундными импульсами, т.е. импульсами, длительность которых меньше времени формирования пробоя. Показано, что модуль автоматической накачки азота является одним из важных элементов, который позволяет обеспечить полуавтоматический режим работы генератора высоковольтных наносекундных импульсов. *Результаты.* Приведены результаты разработки модуля автоматической накачки азота. Модуль является частью лабораторной установки повышения электрической прочности высоковольтных вакуумных приборов с помощью сверхкороткой импульсной последовательности. Для увеличения крутизны фронта кондиционирующего импульса и снижении времени запаздывания рабочее пространство тригatronного разрядника заполняется азотом под давлением в несколько атмосфер. Реализация полуавтоматического режима подачи сверхкоротких наносекундных импульсов на тренируемый вакуумный электронный прибор позволяет реализовать режим одновременного зондирования электродов импульсными пробоями и пробоями постоянного тока. *Выводы.* Разработанный модуль позволяет автоматизировать процесс наполнения тригatronного разрядника азотом при рабочем давлении до 10 бар и отказаться от контроля и управления с помощью операций, выполняемых человеком-оператором.

Ключевые слова: вакуумная техника, тренировка, электрическая прочность в вакууме, тригatron, азот.

Abstract. *Background.* Increasing the electrical strength of vacuum devices is an urgent task. To increase the electrical strength of vacuum electronic devices, laboratory facilities with tripartite arresters are actively used. It is necessary to develop a module for the automatic pumping of nitrogen into the working space of trigatron arresters. *Materials and methods.* Impulse training of high-voltage vacuum devices with high-voltage nanosecond pulses is introduced. pulses whose duration is shorter than the time of formation of breakdown. It is shown that the automatic nitrogen pump module is one of the important elements that allows to provide a semi-automatic mode of the generator of high-voltage nanosecond pulses. *Results.* The results of the development of the automatic nitrogen pump module are presented. The module is part of a laboratory installation for increasing the electrical strength of high-voltage vacuum devices using an ultrashort pulse train. To increase the steepness of the front of the conditioning impulse and to decrease the delay time, the working space of the trigatron arrester is filled with nitrogen under a pressure of several atmospheres. The realization of the semiautomatic mode of supply of ultrashort nanosecond pulses to a trained vacuum electronic device makes it possible to realize a mode of simultaneous probing of electrodes by pulsed breakdowns and breakdowns of a direct current. *Conclusions.* The developed module allows to automate the process of filling the trigatron arrester with nitrogen at an operating pressure of up to 10 bar and to refuse control and control by means of operations performed by the human operator.

Key words: vacuum technology, training, electric strength in vacuum, trigatron, nitrogen.

Повышение электрической прочности вакуумных приборов, в том числе высоковольтных, является одной из актуальных задач современной науки и техники. Сегодня специалисты в области создания вакуумных приборов справедливо считают, что кондиционирование высоковольтных вакуумных приборов, состоящее из двух последовательных этапов – обработки импульсными пробоя-

ми и обработки пробоями постоянного тока, позволяет повышать электрическую прочность тренируемого прибора.

Эффективным решением этой задачи авторам видится импульсная тренировка высоковольтных вакуумных приборов высоковольтными наносекундными импульсами, т.е. импульсами, длительность которых меньше времени формирования пробоя.

При импульсной тренировке высоковольтных вакуумных приборов широкое распространение получила схема формирования импульсов, приведенная на рис. 1 [1].

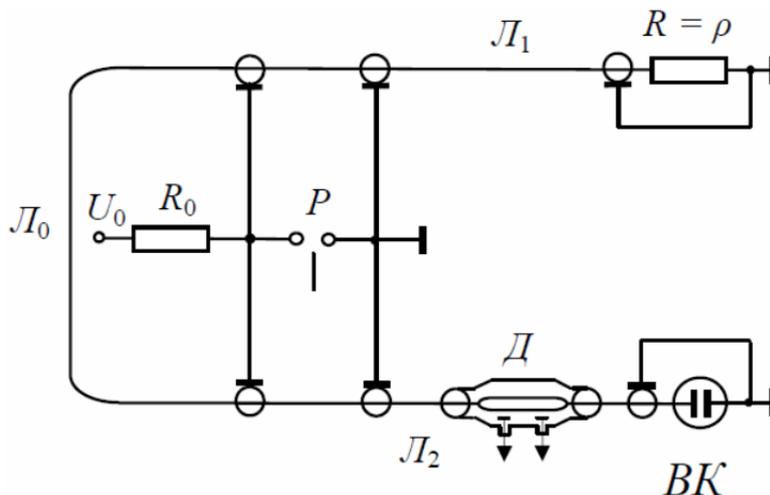


Рис. 1. Схема формирования импульсов: Д – делитель напряжения; L_0 – формирующая линия; L_1, L_2 – передающие линии; ВК – вакуумный конденсатор

Так как длительность высоковольтного импульса, воздействовавшего на вакуумный конденсатор ВК, в приведенной выше схеме определяется длиной формирующей линии $L_0 + L_1 + L_2$, то такая схема формирования получила название «кабельный генератор».

Для обеспечения крутого фронта зондирующего импульса на уровне не более 4 нс применяются разрядники тригatronного типа [1]. Тригatron представляет собой разновидность управляемого искрового разрядника с холодным катодом [2]. Этот трехэлектродный электронный прибор, два из электродов которого рабочие, предназначен для включения в коммутируемую мощную цепь и третий электрод – иницирующий (иногда называемый поджигающим), служит для включения прибора. Перед включением между рабочими электродами приложено высокое напряжение, но ток через прибор не протекает, так как электроды разделены жидким или газообразным диэлектриком. При включении прибора на управляющий электрод подается импульс высокого напряжения, ионизирующий газ или другой диэлектрик в пространстве между рабочими электродами. Начальная ионизация межэлектродного промежутка вызывает лавинное размножение зарядов в межэлектродной плазме, при этом электрическое сопротивление между рабочими электродами падает на много порядков, коммутируя внешнюю электрическую цепь. Восстановление прибора из состояния проводимости в непроводящее состояние происходит после снижения тока ниже некоторого малого тока, называемого током гашения. Таким образом, этот прибор не может быть выключен после включения подачей управления на управляющий электрод, а только снижением тока через него. Одновременно с вышесказанным для эффективной работы тригatronного разрядника в схеме, приведенной на рис. 1, необходимо обеспечить изоляцию во внутренней полости разрядника с помощью заполнения ее азотом с обязательным контролем давления. В известных реализациях кабельных генераторов, аналогичных приведенному на рис. 1, для этого использовался стрелочный манометр типа МД1. Контроль за давлением азота осуществлялся оператором, эксплуатирующим установку. Этот контроль осуществляется по следующей процедуре: оператор вручную открывает кран резервуара с азотом и визуально по показаниям стрелочного манометра контролирует давление в разряднике, после того как давление достигло требуемой величины, кран вручную закрывается. При каждом новом разряде процедура повторяется. Такая процедура реализации накачки азота не может считаться оптимальной, так как оператору установки приходится отвлекаться на визуальный контроль и ручную регулировку давления. Тем самым назрела задача автоматизации накачки азота в тригatronном раз-

ряднике. Для решения этой задачи авторами, основываясь на современных достижениях схемотехники наряду с результатами развития элементной базы, предложена структурная схема модуля автоматической накачки азота, приведенная на рис. 2.

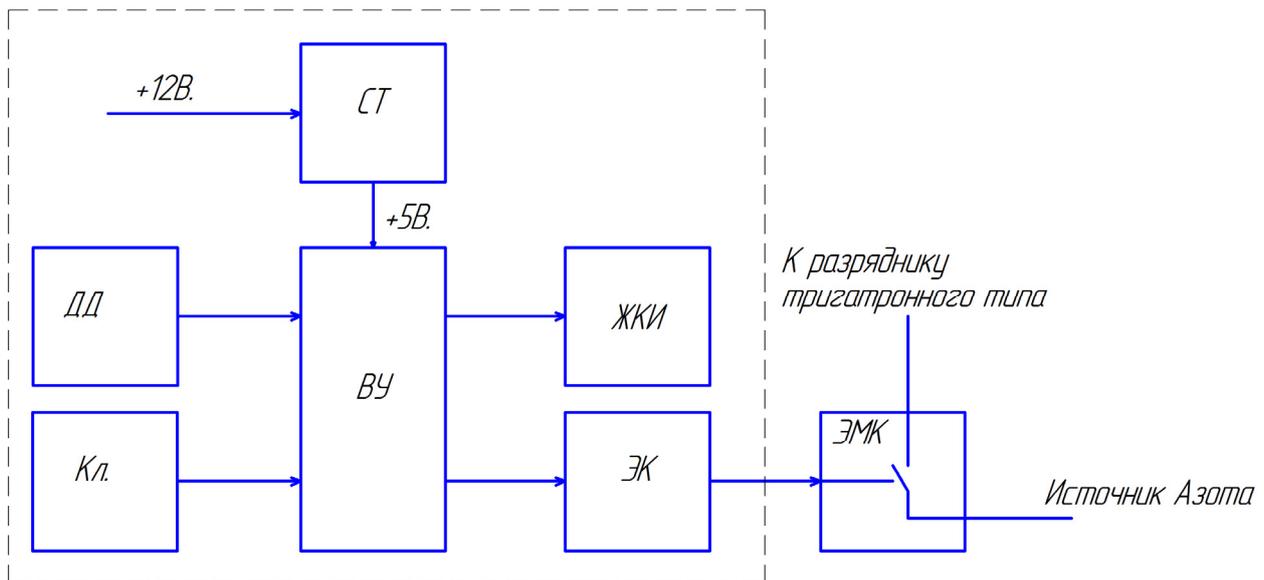


Рис. 2. Структурная схема модуля автоматической накачки азота: ДД – датчик давления; СТ – стабилизатор; ВУ – вычислительное устройство; Кл. – клавиатура; ЖКИ – жидкокристаллический индикатор; ЭК – электронный ключ; ЭМК – электромагнитный клапан

Модуль состоит из семи функциональных блоков. Датчик давления ДД измеряет давление во внутренней полости разрядника и передает данные о нем в вычислительное устройство ВУ. Последнее обрабатывает эти данные путем сравнения с предустановленной требуемой величиной давления азота и осуществляет управление с помощью электронного ключа электромагнитным клапаном подачи азота. Для оперативного контроля за давлением и регулировки используются жидкокристаллический индикатор ЖКИ и клавиатура соответственно. Электропитание устройства осуществляется от однополярного источника с номинальным напряжением 12 В и номинальной выходной мощностью не менее 6 Вт. Встроенный линейный стабилизатор СТ преобразует питающее напряжение в требуемое для электропитания ВУ и других блоков модуля однополярное напряжение 5В. Электропитание электромагнитного клапана осуществляется по отдельной линии в соответствии с техническими требованиями на конкретный типонаминал ЭМК. В случае если электропитание клапана осуществляется переменным напряжением 220 В от бытовой однофазной сети, необходимо использовать в качестве электронного ключа электронный прибор с оптоэлектрической развязкой между его входом и выходом. Применение гальванической развязки на основе разделительного трансформатора не целесообразно в связи с высокой индуктивностью обмоток трансформатора, что совместно с паразитной емкостью линии связи с ЭМК увеличивает время срабатывания последнего.

Предложенная структурная схема реализована в виде электрической принципиальной схемы, приведенной на рис. 3.

В качестве ВУ используется микроконтроллерный модуль DD1, основой которого является 8-разрядный микроконтроллер с архитектурой RISC. Оперативная информация о текущем давлении индицируется на двухстрочном 16-сегментном жидкокристаллическом индикаторе HG1. Индикатор основан на контроллере HD-44780 и в данной схемной реализации управляется по четырех разрядной шине данных DD4-DD7.

Интегральная микросхема (ИМС) DA1 представляет собой линейный однополярный стабилизатор напряжения, в качестве которого применена ИМС типа КФ1158ЕН501Б АДБК.431420.102-01ТУ с выходным напряжением 5 В.

В качестве керамических неполярных конденсаторов постоянной емкости применим отечественные ЭРИ К10-69в группы ТКЕ Н30, изготавливаемые по техническим условиям АЖЯР.673511.004 ТУ. Конденсаторы выбранной группы ТКЕ имеют широкий диапазон номинальной емкости, имеющий значение от 1000 пФ до 4,7 мкФ.

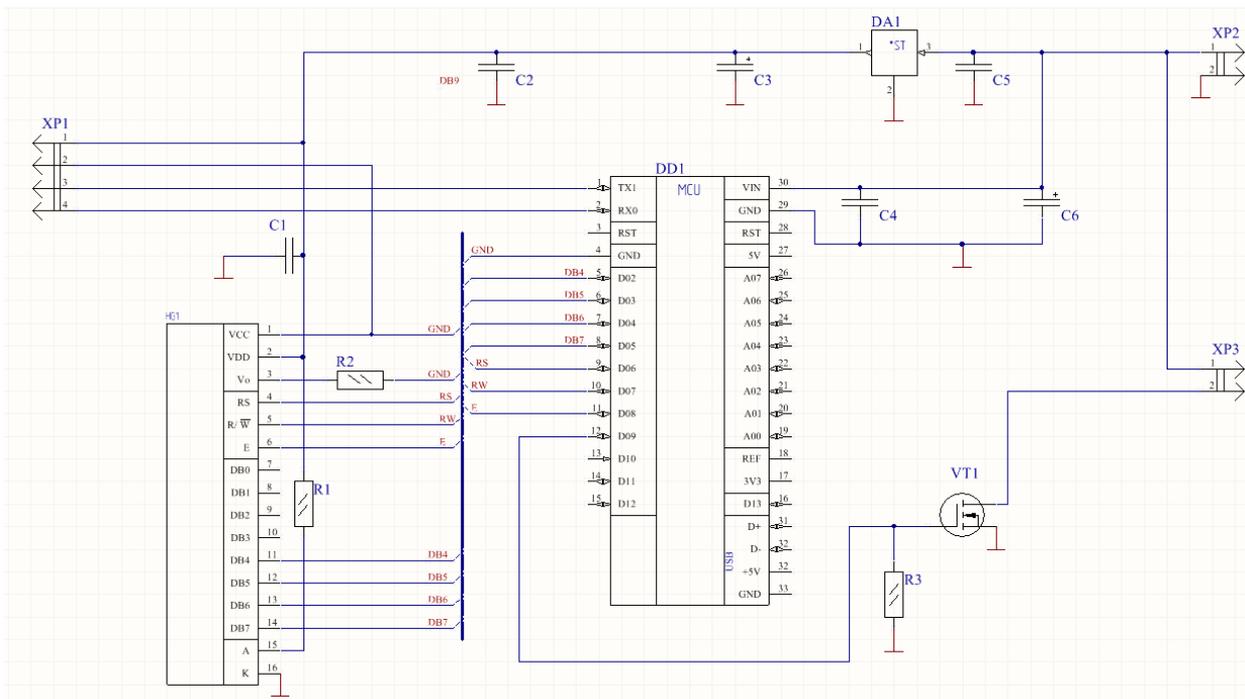


Рис. 3. Модуль автоматической накачки азота. Схема электрическая принципиальная

Конденсаторы типа К10-69в и группы ТКЕ Н30 имеют приемлемое для проектируемого устройства значение относительного температурного изменения емкости. График зависимости емкости от температуры приведен на рис. 4.

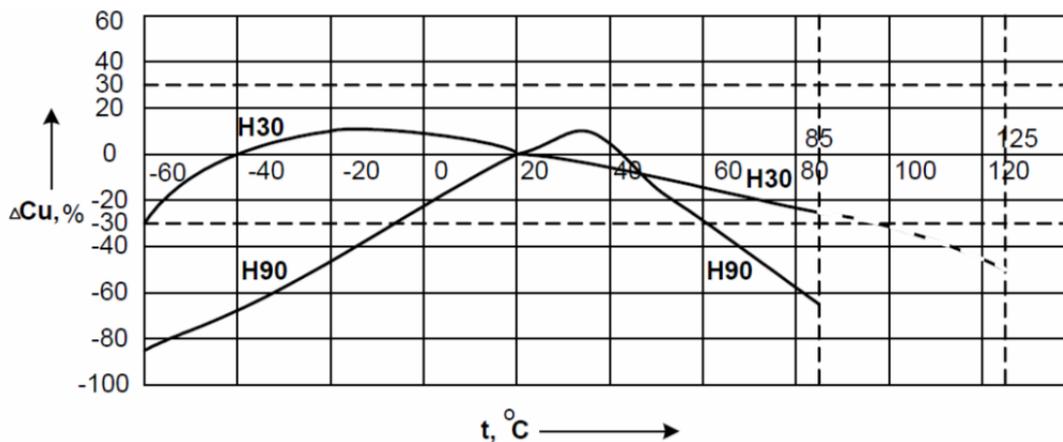


Рис. 4. Зависимость емкости конденсаторов групп ТКЕ Н30 и Н90 от температуры: ΔC_u – относительное изменение емкости

Данные конденсаторы также рекомендуются производителем для замены конденсаторов морально устаревшей серии К10-17.

В качестве полярных конденсаторов постоянной емкости применим отечественные танталовые оксидно-полупроводниковые ЭРИ К53-67, изготавливаемые по техническим условиям АЖЯР.673546.006 ТУ. Конденсаторы выбранного типа имеют широкий диапазон номинальной емкости от 0,1 до 680 мкФ и напряжения – 4...50 В.

Конденсаторы имеют климатическое исполнение В 5.1 по ГОСТ 15150. Конденсаторы серии К53-67 отвечают современным требованиям к подобным изделиям и имеют незначительную зависимость емкости от температуры (рис. 5). Данный тип оксидно-полупроводниковых конденсаторов обеспечивает стойкость к воздействию механических, климатических и биологических факторов по группе 6У согласно ГОСТ РВ 20.39.414.1.

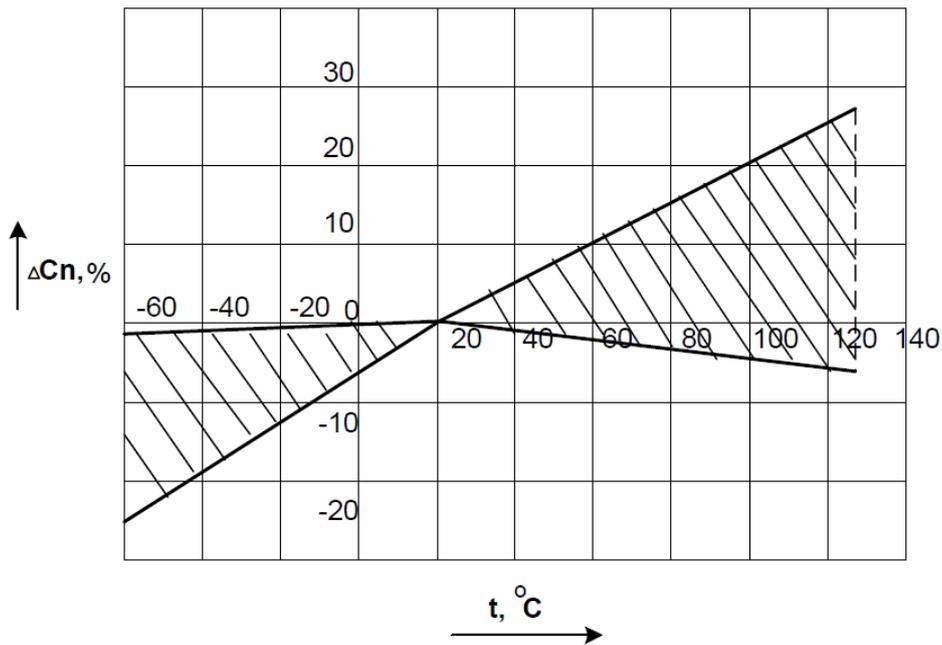


Рис. 5. Зависимость емкости конденсаторов типа К53-67 от температуры: ΔC_n – относительное изменение емкости

В качестве непроволочных постоянных резисторов применим ЭРИ Р1-12, отвечающие техническим условиям ШКАБ.434110.002 ТУ. Резисторы серии Р1-12 являются толстопленочными и выпускаются в широком диапазоне типономиналов стандартного ряда сопротивлений. Резисторы имеют хороший показатель зависимости максимально допустимой рассеиваемой мощности от температуры, представленный на рис. 6.

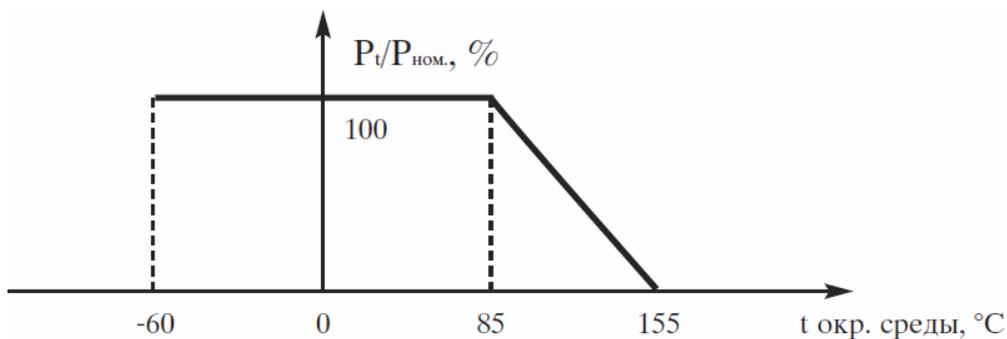


Рис. 6. Зависимость мощности рассеивания от температуры окружающей среды

При использовании ЭМК с максимальным током обмотки до 25 А при рабочем напряжении не более 25 В в качестве полупроводникового МОП ключа VT1 целесообразно применить полевой *n*-канальный транзистор КП723, соответствующий техническим условиям АДБК 432140.415ТУ (зарубежный аналог IRFZ44). Рабочий температурный диапазон данного электрорадиоизделия составляет от – 55 до + 125 °С. Транзистор имеет пороговое напряжение 2–4 В, что позволяет управлять им логическими уровнями без применения дополнительных схемотехнических решений, например, преобразователя уровня.

Вывод

Современные схемотехнические решения и применение современной элементной базы позволили обеспечить автоматизацию накачки азота в рабочей полости тригатронного разрядника. Учитывая, что необходимость накачки азота в рабочую полость тригатронного разрядника является определяющей для получения крутых скатов высоковольтного «тренирующего» импульса, автома-

тизация этого процесса позволяет качественно его модернизировать. Модернизация в первую очередь позволяет отказаться от контроля и управления с помощью операций, выполняемых человеком-оператором.

Таким образом, разработанный модуль автоматической накачки азота является одним из важных элементов, который позволяет обеспечить полуавтоматический режим работы генератора высоковольтных наносекундных импульсов. Реализация полуавтоматического режима подачи сверхкоротких наносекундных импульсов на тренируемый вакуумный электронный прибор позволит реализовать режим одновременного зондирования электродов импульсными пробоями и пробоями постоянного тока.

Библиографический список

1. Емельянова, Е. А. К вопросу о повышении электрической прочности вакуумных конденсаторов / Е. А. Емельянова, В. П. Буц, А. А. Рыжов, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 259–261.
2. Пичугина, М. Т. Высоковольтная электротехника : учеб. пособие / М. Т. Пичугина. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. – 120 с.
3. Володин, П. Н. Разработка макромодели интенсивности отказов импульсного источника вторичного электропитания / П. Н. Володин // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 43–48.
4. Волохов, И. В. Интеллектуальный датчик вакуума для контроля герметичности аэрокосмических аппаратов / И. В. Волохов, Е. Н. Пятыхев, И. А. Солодимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2008. – Т. 1. – С. 483–485.
5. Жолдиева, Ш. Б. Анализ надежности работы системы терморегулирования космического аппарата / Ш. Б. Жолдиева, Д. С. Ергалиев, А. Д. Тулегулов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 233–234.
6. Баринов, И. Н. Полупроводниковые чувствительные элементы высокотемпературных датчиков абсолютного давления / И. Н. Баринов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 100–102.
7. Дерябин, Д. В. Повышение электропрочности и снижение тока утечки вакуумных коммутирующих устройств и вакуумных конденсаторов / Д. В. Дерябин, А. В. Шульгин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 357–358.
8. Буц, В. П. К вопросу эксплуатационной надежности вакуумных конденсаторов / В. П. Буц // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2008. – Т. 2. – С. 165–166.
9. Рыжов, А. А. Расчет напряженности электростатического поля на внутренней поверхности керамической оболочки вакуумного конденсатора / А. А. Рыжов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 201–202.
10. Буц, В. П. Улучшение температурной стабильности емкости вакуумных конденсаторов / В. П. Буц, А. А. Рыжов, Н. К. Юрков // Вопросы радиоэлектроники. Серия СОИУ. – 2012. – Вып. 1. – С. 176–183.
11. Рыжов, А. А. Расчет вакуумного конденсатора с электродами, изготовленными из материала с различными коэффициентами температурного расширения / В. П. Буц, А. А. Рыжов, Н. К. Юрков // Информационные и коммуникационные технологии в образовании, науке и производстве : тр. VI Международной науч.-практ. конф. : в 2 ч. – Протвино : Управление образования и науки, 2012. – Ч. 1. – С. 311–315.
12. Рыжов, А. А. Вакуумные конденсаторы с высокой температурной стабильностью / А. А. Рыжов, А. А. Ромашин, Н. К. Юрков // Вестник Самарского ГАУ им. С. П. Королева. – 2012. – № 7 (38). – С. 29–34.

Акимов Александр Александрович

генеральный директор,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, 440000, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: info@niemp.ru

Дерябин Денис Викторович

заместитель генерального директора,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, 440000, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: info@niemp.ru

Akimov Aleksandr Aleksandrovich

general director,
Research Institute
electronic and mechanical devices
(440000, 44 Karakozov street, Penza, Russia)

Derjabin Denis Viktorovich

deputy general director,
Research Institute
electronic and mechanical devices
(440000, 44 Karakozov street, Penza, Russia)

Буц Виктор Петрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Горячев Николай Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Разживина Галина Петровна

доцент,
кафедра инженерной экологии,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: office@pguas.ru

Buts Viktor Petrovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Goryachev Nikolay Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Razzhivina Galina Petrovna

associate professor,
sub-department of environmental engineering,
Penza State University of Architecture
and Construction
(440028, 28 German Titov street, Penza, Russia)

УДК 537.521**Структура и схемотехническая реализация модуля автоматической накачки азота /**

А. А. Акимов, А. В. Дерябин, В. П. Буц, Н. В. Горячев, Г. П. Разживина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 72–78. DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-9.