

Высоковольтные источники питания серии «СтабИст»

А. С. Дмитриев, А. Д. Кулешов, Н. Н. Потрахов[✉], Ю. Н. Потрахов, К. К. Гук

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ nnpotrahov@etu.ru

Аннотация. В настоящее время рентгеновские аппараты нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Они используются для исследования структуры материалов, оценки внутреннего строения деталей узлов и механизмов, а также для неразрушающего контроля различных технологических операций. Одним из ключевых компонентов рентгеновских аппаратов – это высоковольтный источник питания в сочетании с рентгеновской трубкой. Существует две конструктивные схемы их построения: моноблочная и кабельная. Моноблочный аппарат характеризуется размещением рентгеновской трубки и высоковольтного источника питания в одном корпусе. В кабельном аппарате рентгеновская трубка соединяется с источником питания при помощи высоковольтного кабеля. Каждая из схем обладает своими преимуществами и недостатками. Ее выбор зависит от требований к конструкции аппарата.

Цель работы. Разработка стабилизированного высоковольтного источника питания для рентгеновских трубок в составе кабельного аппарата.

Материалы и методы. При проектировании применялись программы моделирования процессов, протекающих в электронных схемах, использующие SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) алгоритм. Основой источника стал инверторный преобразователь напряжения, построенный на силовых биполярных транзисторах по схеме полного моста с изолированным затвором. Этот подход позволил упростить силовую часть электрической схемы источника, повысив его эффективность в целом. В качестве высоковольтной изоляции был использован твердотельный компаунд с повышенной теплопроводностью, что позволило ограничиться принудительным воздушным охлаждением и разместить его конструкцию в габаритах стандарта Rack Mount.

Результаты. Результатом работы стал стабилизированный высоковольтный источник питания на напряжение 50 кВ мощностью 2 кВт и общим весом 27 кг.

Вывод. В связи с уходом западных производителей с российского рынка высоковольтных источников питания открываются широкие перспективы использования отечественных разработок как при создании новых образцов, так и эксплуатируемых рентгеновских аппаратов. Опыт эксплуатации показал, что разработанный высоковольтный источник питания по своим электрическим и массогабаритным параметрам не уступает лучшим зарубежным аналогам.

Ключевые слова: рентгеновская трубка, высоковольтный стабилизированный источник питания, кабельный рентгеновский аппарат

Для цитирования: Высоковольтные источники питания серии «СтабИст» / А. С. Дмитриев, А. Д. Кулешов, Н. Н. Потрахов, Ю. Н. Потрахов, К. К. Гук // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 2. С. 26–34. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-26-34.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Работа выполнена в рамках гос. контракта 0000005407523Q6V0002 по Соглашению с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации № 075-11-2023-006 от 09.02.2023.

High-Voltage Power Supplies of the «Stablst» Series

A. S. Dmitriev, A. D. Kuleshov, N. N. Potrakhov✉, Yu. N. Potrakhov, K. K. Guk

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ nnpotrakhov@etu.ru

Abstract. Currently, X-ray machines are widely used in various industries. They are used to study the structure of materials, evaluate the internal structure of parts of components and mechanisms, as well as for non-destructive testing of various technological operations. One of the key components of X-ray machines is the high-voltage power supply in combination with the X-ray tube. There are two design schemes for their construction: monoblock and cable. A monoblock device is characterized by placing an X-ray tube and a high-voltage power source in one housing. In a cable machine, the X-ray tube is connected to a power source using a high-voltage cable. Each of the schemes has its own advantages and disadvantages. Its choice depends on the requirements for the design of the device.

Purpose of the work: Development of a stabilized high-voltage power source for X-ray tubes as part of a cable apparatus.

Materials and methods: During the design, programs were used to simulate processes occurring in electronic circuits using the SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) algorithm. The basis of the source was an inverter voltage converter, built on power bipolar transistors according to a full bridge circuit with an insulated gate. This approach made it possible to simplify the power part of the electrical circuit of the source, increasing its overall efficiency. A solid-state compound with increased thermal conductivity was used as high-voltage insulation, which made it possible to limit it to forced air cooling and place its structure within the dimensions of the Rack Mount standard.

Results: The result of the work was a stabilized high-voltage power supply with a voltage of 50 kV, a power of 2 kW, and a total weight of 27 kg.

Conclusion: In connection with the departure of Western manufacturers from the Russian market of high-voltage power supplies, broad prospects are opening up for the use of domestic developments both in the creation of new models and in operating X-ray devices. Operating experience has shown that the developed high-voltage power supply is not inferior to the best foreign analogues in its electrical and weight-size parameters.

Keywords: X-ray tube, high-voltage stabilized power supply, cable X-ray machine

For citation: High-Voltage Power Supplies of the «Stablst» Series / A. S. Dmitriev, A. D. Kuleshov, N. N. Potrakhov, Yu. N. Potrakhov, K. K. Guk // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 2. P. 26–34. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-26-34.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Financing: The work was completed within the framework of the state contract 000000S407523Q6V0002 under the Agreement with the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-11-2023-006 dated 09/02/2023.

Введение. В состав любого современного рентгеновского аппарата (РА) входят рентгеновская трубка и высоковольтный источник питания (ВИП) [1]. При этом в зависимости от способа подачи напряжения на трубку различают две схемы построения рентгеновских аппаратов. В том случае, когда трубка непосредственно подключается к выходным каскадам высоковольтного источника напряжения и размещается моноблоком в одном корпусе с ним, РА относится к классу моноблочных. Когда напряжение питания на трубку подает-

ся по высоковольтному кабелю, РА относится к классу кабельных. Соответственно, высоковольтный источник напряжения и рентгеновская трубка имеют собственные корпуса, при этом корпус трубки называется кожухом [2].

Каждая из схем построения рентгеновских аппаратов обладает своими преимуществами и своими недостатками, поэтому окончательный выбор определяется требованиями к его конструкции: электрическим, рентгенооптическим, массогабаритным, а также эксплуатационными.

Практика конструирования показывает, что по сравнению с моноблоком моноблочного РА излучатель кабельного РА при мощности 1...3 кВт обладает меньшими габаритами и весом [3], [4]. Поэтому в настоящее время при решении задач промышленного контроля и диагностики более востребованы кабельные рентгеновские аппараты. Соответственно целью проекта, реализуемого на кафедре ЭПУ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» стала разработка стабилизированного высоковольтного источника питания для рентгеновских трубок в составе кабельного аппарата.

Структурная схема высоковольтного источника питания. Основу источника составляет инверторный преобразователь напряжения. Для построения преобразователя напряжения выбрана схема полного моста. В качестве силовых ключей моста используются биполярные транзисторы. Для регулировки выходного напряжения и, соответственно, мощности ВИП применен ШИМ-модулятор. Нагрузкой для преобразователя напряжения служит первичная обмотка высоковольтного трансформатора. Такой подход упрощает силовую (низковольтную) часть электрической схемы источника, исключив из нее дополнительные преобразователи, и, соответственно, позволяет повысить КПД источника в целом. Применение твердотельного компаунда, обладающего повышенной теплопроводностью, для изоляции высоковольтных цепей, позволило отказаться от традиционной для мощных ВИП водяной системы охлаждения и заменить ее более компактной системой принудительного воздушного охлаждения. Меньшие размеры этой системы, в свою очередь, позволили разместить ВИП в корпусе стандарта Rack Mount (форм-фактор 4U) [5]. Масса источника составляет 27 кг.

Логика построения принципиальной электрической схемы ВИП кабельного РА соответствует

традиционному подходу к разработке подобных устройств, которое в данном случае представляет собой импульсный источник питания [6].

Упрощенная структурная схема источника представлена на рис. 1.

В ходе разработки было выполнено предварительное моделирование основных узлов ВИП в SPICE-среде LTspice. На основе SPICE-моделей, использованной компонентной базы ВИП, были спроектированы и проанализированы полные эквивалентные схемы инверторного преобразователя напряжения, высоковольтного трансформатора и умножителя напряжения. Результаты анализа показали, что максимальная пульсация выходного напряжения ВИП составляет 0.5–1 %, суммарные тепловые потери – 400 Вт.

Инвертор. На рис. 2 представлена его принципиальная электрическая схема. Биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ), используемые в качестве силовых ключей, в свою очередь, включены по схеме полного моста. Количество их удвоено посредством параллельного включения с целью увеличения рабочих токов коммутации. Для управления ключами используются полевые транзисторы, сигналы от которых через специальные трансформаторы T_1 и T_2 подаются на затворы БТИЗ. Нагрузкой для выходного каскада инвертора служит первичная обмотка высоковольтного трансформатора (рис. 1). Вторичная обмотка этого трансформатора подключена к входному каскаду емкостного умножителя напряжения. Конструкция обмоток трансформатора обеспечивает полную гальваническую «развязку» высоковольтной части ВИП от низковольтной, включая цепи управления и индикации режимов работы ВИП [7]. На рис. 2 приняты обозначения: T_1 , T_2 – управляющие трансформаторы,

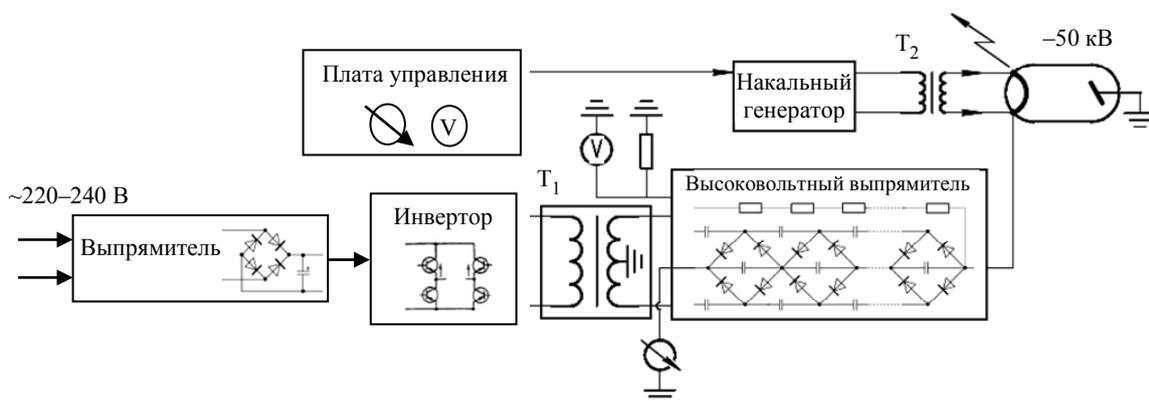


Рис. 1. Структурная схема ВИП
Fig. 1. VIP block diagram

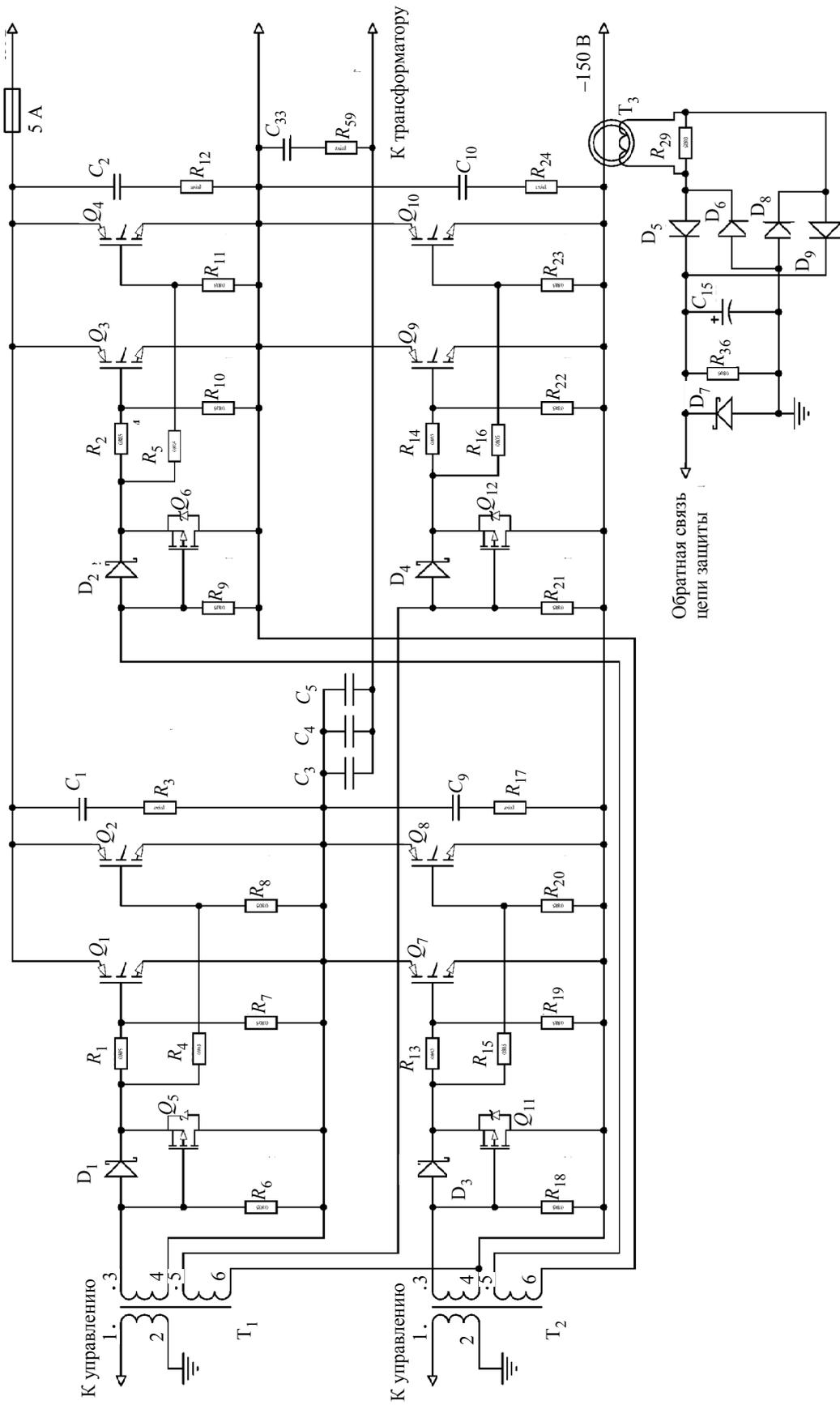


Рис. 2. Электрическая схема инвертора
 Fig. 2. Schematic diagram of the inverter

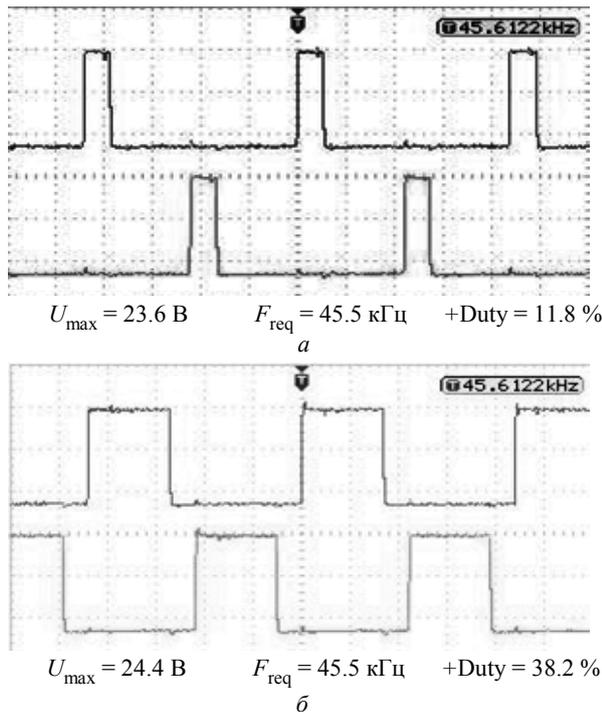


Рис. 3. Изменение коэффициента заполнения управляющих сигналов: а – мощность на нагрузке 400 Вт (20 кВ, 20 мА); б – мощность на нагрузке 2000 Вт (50 кВ, 40 мА); U_{\max} – максимальный размах ШИМ сигнала на затворах БТИЗ; F_{req} – частота ШИМ сигнала на затворах БТИЗ, +Duty – скважность ШИМ сигнала на затворах БТИЗ

Fig. 3. Oscillograms of inverter control signals: а – power at a load of 400 W (20 kV, 20 mA); б – power at a load of 2000 W (50 kV, 40 mA); U_{\max} – maximum swing of the PWM signal on the IGBT gates, F_{req} – frequency of the PWM signal on the IGBT gates, +Duty – duty cycle of the PWM signal on the IGBT gates

T_3 – трансформатор тока, Q_1-Q_4 , Q_7-Q_{10} – БТИЗ (IGBT) силовые ключи, Q_5 , Q_6 , Q_{11} , Q_{12} – ключи-

драйверы для БТИЗ, C_1-C_4 – снабберные конденсаторы, C_5-C_9 – фильтрующие конденсаторы.

Для генерации сигналов, управляющих БТИЗ, используется специальный генератор. В основе генератора лежит ШИМ-контроллер, реализованный на микросхеме TL594, которая позволяет исключить протекание сквозных токов в мостовой схеме и обезопасить БТИЗ от «пробоя». Несущая частота управляющих сигналов составляет 45.5 кГц. Коэффициент их заполнения может изменяться с целью регулировки выходной мощности инвертора.

Осциллограммы управляющих сигналов представлены на рис. 3.

Контроль выходных характеристик. Для контроля выходных характеристик источника проводились измерения с помощью дозиметра Riganha 657. На рис. 4 приведены результаты измерений анодного напряжения и мощности дозы рентгеновского излучения при длительном включении в качестве нагрузки рентгеновской трубки БСВ-29 с молибденовым анодом.

Согласно рис. 4, пульсации анодного напряжения не превышают 150 В, что составляет 0.5 % при рабочем режиме рентгеновской трубки: 35 кВ, 30 мА.

ВИП позволяет получить для питания анодной цепи рентгеновской трубки максимальное напряжение отрицательной полярности 50 кВ при максимальном токе нагрузки до 50 мА и для питания накальной цепи – напряжение 10 В при регулируемом от 0 до 10 мА токе.

Основные параметры ВИП сведены в табл. 1.

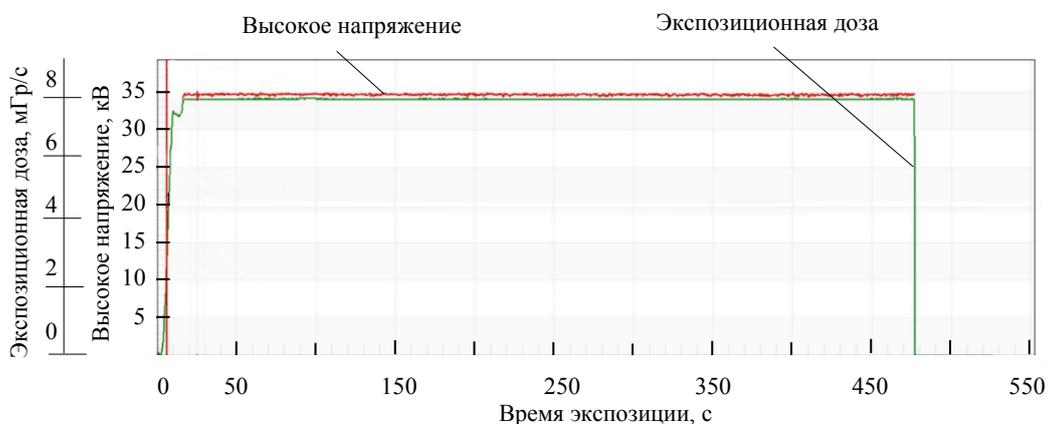


Рис. 4. График измерения анодного напряжения на рентгеновской трубке БСВ-29 и мощности дозы рентгеновского излучения при длительном включении
Fig. 4. Graph of measurement of anode voltage on the BSV-29 X-ray tube and the dose rate of X-ray radiation during long-term switching on

Табл. 1. Основные параметры ВИП «СтабИст-50»

Tab. 1. Main parameters of VIP «StabIst-50»

| Наименование параметра | Значение |
|---|-----------------|
| Напряжение питания, В/Гц | 220/50 |
| Потребляемая мощность, кВт | 3 |
| Максимальное выходное напряжение, кВ | 50 |
| Полярность | Отрицательная |
| Максимальный ток, мА | 50 |
| Максимальная выходная мощность в длительном режиме, кВт | 2 |
| Максимальное напряжение накала рентгеновской трубки, В | 10 |
| Максимальный ток накала рентгеновской трубки, А | 10 |
| Номинальные габаритные размеры (Ш×Г×В мм), не более | 490 × 585 × 178 |
| Вес, не более, кг | 30 |



Рис. 5. Высоковольтный источник питания «СтабИст-50»

Fig. 5. High-voltage power supply «StabIst-50»

Внешний вид ВИП «СтабИст-50» представлен на рис. 5.

Результаты и обсуждения. Апробация опытного образца ВИП проводилась на крупном научно-производственном предприятии Санкт-Петербурга АО «ИЦ «Буревестник». Данное предприятие выступило заказчиком разработки ВИП с целью реализации принятой по собственной инициативе программы импортозамещения. На первом этапе апробации ВИП был установлен в дифрактометре общего назначения и использовался для анализа фазового состава, структурного состояния и кристаллографической ориентации широкого круга материалов, а также объектов различной формы и размера [8]. На втором этапе ВИП был установлен в сепараторе алмазосодержащей породы и использовался для обнаружения в потоке руды отдельных кристаллов алмаза двухэнергетичным рентгенолюминесцентным методом [9]. Заявленные кратковременная и длительная

стабильность величины выходного напряжения ВИП обеспечили высокие аналитические характеристики как дифрактометра, так и сепаратора.

Развитие проекта. В настоящее время на основе полученных перспективных схемотехнических конструкторских и технологических решений ведутся исследования по созданию двуполярного (с заземленной средней точкой) высоковольтного источника питания для сильноточного кабельного рентгеновского аппарата (СКРА) с максимальным суммарным рабочим напряжением 300 кВ и мощностью 3 кВт. Основные параметры разрабатываемого СКРА представлены в табл. 2.

Табл. 2. Основные параметры СКРА

Tab. 2. Main parameters of SCRA

| Наименование параметра | Значение |
|---|----------|
| Минимальное анодное напряжение, не более, кВ | 30 |
| Максимальное анодное напряжение, не менее, кВ | 300 |
| Минимальный шаг регулировки анодного напряжения, не более, кВ | 1 |
| Погрешность установки анодного напряжения, не более, % | 1 |
| Пульсация анодного напряжения, не более, % | 0.5 |
| Минимальный анодный ток, не более, мА | 1 |
| Максимальный анодный ток, не менее, мА | 20 |
| Минимальный шаг регулировки анодного тока, не более, мА | 0.1 |
| Погрешность установки анодного тока, не более, % | 0.5 |
| Пульсация анодного тока, не более, % | 0.1 |
| Размер фокусного пятна, не более, мм | 3 |
| Максимальная мощность, кВт | 3 |



Рис. 6. Колонна умножителя СКРА на напряжение 150 кВ

положительной полярности
Fig. 6. SKRA multiplier column for voltage 150 kV positive polarity



Рис. 7. Излучатель СКРА на основе отечественной металлостеклянной рентгеновской трубки 1.5БПК14-300 с дуополярным питанием и заземленной средней точкой
Fig. 7. The SKRA emitter is based on a domestic metal-glass X-ray tube 1.5BPK14-300 with bipolar power supply and a grounded midpoint

Для проекта важна разработка высоковольтного выпрямителя, обеспечивающего минимальные пульсации напряжения на выходе ВИП. С этой целью вместо традиционной несимметричной схемы умножения используется симметричный емкостной умножитель по схеме Кокрофта–Уолтона. В этой схеме отсутствуют также пульсации, обусловленные конструктивными паразитными емкостями отдельных каскадов умножителя [10].

На рис. 6 представлена конструкция одной из двух 11-каскадных колон умножителя напряжения на 150 кВ, в данном случае положительной полярности.

Конструктивные элементы умножителя выпрямления: диоды, конденсаторы, резисторы, делители напряжения, а также стакан высоковольтного разъема – расположены в одном герметичном корпусе. Внутренний объем корпуса для обеспечения изоляции от возможных электрических пробоев заполнен трансформаторным маслом.

Измерение и контроль выходного напряжения ВИП осуществляются с помощью специального делителя напряжения. В состав делителя входят последовательно включенные термостабилизированные резисторы. Цепочка высоковольтных резисторов подключена к выходному каскаду умножителя напряжения ВИП и составляет «верхнее» плечо делителя. Цепочка низковольтных резисторов, соответственно, составляет «нижнее» плечо делителя. Сигнал от него, пропорциональный выходному напряжению подается на усилитель обратной связи платы управления ВИП.

Положительное и отрицательное напряжение до 150 кВ с помощью двух кабелей подается на излучатель СКРА, который выполнен на основе отечественной металлостеклянной рентгеновской трубки 1.5БПК14-300. На рис. 7 представлен его внешний вид.

Электрическая схема включения трубки – дуополярная с заземленной средней точкой.

Заключение. В связи с уходом западных производителей с российского рынка высоковольтных источников питания открываются широкие перспективы использования отечественных разработок как при создании новых образцов, так и при ремонте и обслуживании импортных рентгеновских аппаратов. Опыт эксплуатации разработанного ВИП показал, что по своим электрическим и массогабаритным параметрам он не уступает лучшим зарубежным аналогам.

В перспективе планируется создание целой серии СКРА, способных заменить уже эксплуатируемые в нашей стране зарубежные образцы.

Список литературы

1. Иванов С. А., Шукин Г. А. Рентгеновские трубки технического назначения. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 200 с.
2. Высоковольтный источник питания для установок рентгеновского контроля структуры материалов / А. С. Дмитриев, А. Д. Кулешов, Н. Н. Потрахов, Ю. Н. Потрахов, К. К. Гук // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024. Т. 90, № 4. С. 46–52.
3. Исследование возможности применения рентгенографии для контроля технического состояния высоковольтных маломасляных выключателей /

- Л. А. Дарьян, Е. П. Грабчак, Р. М. Образцов, П. В. Голубев, Н. Л. Аграпонова, Г. З. Мирзабекян, В. В. Жуков // Электротехника. 2020. № 8. С. 36–41.
4. Установки для рентгеновского контроля (обзор) / Н. Н. Потрахов, В. Б. Бессонов, А. В. Ободовский, А. Ю. Грязнов, В. В. Клонов, А. И. Мазуров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85, № 10. С. 35–42.
5. Керамообразующие силиконовые компаунды / В. М. Копылов, А. Ю. Федоров, А. В. Царева, Е. И. Костылева // Каучук и резина. 2014. № 1. С. 44–47.

6. Крутов А. В. Схема работы импульсного блока питания // Инновационные научные исследования. 2021. № 6–2(8). С. 42–49.

7. Володин В. Моделирование сложных электромагнитных компонентов при помощи Spice-симулятора LTspice/SwCAD III // Компоненты и технологии. 2008. № 4(81). С. 175–182.

8. Настольный рентгеновский дифрактометр для анализа порошков / Л. Буй, Ю. Емельянов, Д. Каба-

нов, С. Магонов, Д. Макаров, С. Маковский, Ю. Целков // Технологии в электронной промышленности. 2021. № 5. С. 54–57.

9. Зырянов И. В., Макалин И. А. Развитие рентгенолюминесцентного метода обогащения алмазосодержащего сырья // Наука и техника в Якутии. 2015. № 1 (28). С. 16–18.

10. Ровдо А. А. Полупроводниковые диоды и схемы с диодами. М.: Лайт Лтд, 2000. 286 с.

Информация об авторах

Дмитриев Александр Сергеевич – инженер кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: as_dmit@mail.ru

Кулешов Алексей Денисович – инженер кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: kvraastry2@gmail.com

Потрахов Николай Николаевич – д-р техн. наук, зав. каф. электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: nnpotrahov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8806-0603>

Потрахов Юрий Николаевич – канд. техн. наук, ассистент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: yus87@yandex.ru

Гук Карина Константиновна – канд. техн. наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: kkguk@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4968-7857>

Вклад авторов:

Дмитриев А. С. – разработка электрической схемы источника питания.

Кулешов А. Д. – разработка конструкции источника питания.

Потрахов Н. Н. – общее руководство, выводы и рекомендации по конструкции.

Потрахов Ю. Н. – методология проведения экспериментальных исследований источников питания.

Гук К. К. – обработка результатов испытаний источника питания.

References

1. Ivanov S. A., Shhukin G. A. Rentgenovskie trubki tehničeskogo naznachenija. L.: Jenergoatomizdat, 1989. 200 s. (In Russ.).

2. Vysokovol'tnyj istočnik pitanija dlja ustanovok rentgenovskogo kontrolja struktury materialov / A. S. Dmitriev, A. D. Kuleshov, N. N. Potrahov, Ju. N. Potrahov, K. K. Guk // Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 2024. T. 90, № 4. S. 46–52. (In Russ.).

3. Issledovanie vozmožnosti primenenija rentgenografii dlja kontrolja tehničeskogo sostojanija vysokovol'tnyh malomasljanых vyključatelej / L. A. Dar'jan, E. P. Grabčak, R. M. Obrazcov, P. V. Golubev, N. L. Agraponova, G. Z. Mirzabekjan, V. V. Zhukov // Jelektrotehnika. 2020. № 8. S. 36–41. (In Russ.).

4. Ustanovki dlja rentgenovskogo kontrolja (obzor) / N. N. Potrahov, V. B. Bessonov, A. V. Obodovskij, A. Ju. Grjaznov, V. V. Klonov, A. I. Mazurov // Zavodskaja labor-

atorija. Diagnostika materialov. 2019. T. 85, № 10. S. 35–42. (In Russ.).

5. Keramoobrazujushhie silikonovye kompaundy / V. M. Kopylov, A. Ju. Fedorov, A. V. Careva, E. I. Kostyleva // Kačuch i rezina. 2014. № 1. S. 44–47. (In Russ.).

6. Krutov A. V. Shema raboty impul'snogo bloka pitanija // Innovacionnye nauchnye issledovanija. 2021. № 6–2(8). S. 42–49. (In Russ.).

7. Volodin V. Modelirovanie složnyh jelektromagnitnyh komponentov pri pomoshhi SPICE-simuljatora LTspice / SwCAD III // Komponenty i tehnologii. 2008. № 4(81). S. 175–182. (In Russ.).

8. Nastol'nyj rentgenovskij difraktometr dlja analiza poroshkov / L. Buj, Ju. Emel'janov, D. Kabanov, S. Magonov, D. Makarov, S. Makovskij, Ju. Celkov // Tehnologii v jelektronnoj promyšlennosti. 2021. № 5. S. 54–57. (In Russ.).

9. Zyrjanov I. V., Makalin I. A. Razvitie rentgenoljuminiscentnogo metoda obogashhenijaalmazosoderzhashhego syr'ja // Nauka i tehnika v Jakutii. 2015. № 1 (28). S. 16–18. (In Russ.).

10. Rovdo A. A. Poluprovodnikovye diody i shemy s diodami. M.: Lajt Ltd, 2000. 286 s. (In Russ.).

Information about the authors

Aleksandr S. Dmitriev – engineer of the Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: as_dmit@mail.ru

Aleksey D. Kuleshov – engineer of the Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: kvraastr2@gmail.com

Nikolay N. Potrakhov – Dr Sci. (Eng.), Head of the Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: nnpotrakhov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8806-0603>

Yuriy N. Potrakhov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: yus87@yandex.ru

Karina K. Guk – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: kkguk@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4968-7857>

Author contribution statement:

Dmitriev A. S. – development of the electrical circuit of the power supply.

Kuleshov A. D. – development of the design of the power supply.

Potrakhov N. N. – general guidance, conclusions and recommendations on the design.

Potrakhov Yu. N. – methodology for conducting experimental studies of power supplies.

Guk K. K. – processing of the test source test results.

Статья поступила в редакцию 01.10.2024; принята к публикации после рецензирования 24.12.2024; опубликована онлайн 28.02.2025.

Submitted 01.10.2024; accepted 24.12.2024; published online 28.02.2025.
