

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-4-46-52>

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ УСТАНОВОК РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ

© Александр Сергеевич Дмитриев, Алексей Денисович Кулешов, Николай Николаевич Потрахов, Юрий Николаевич Потрахов, Карина Константиновна Гук*

Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Россия, 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5 литера Ф; *e-mail: kzhamova@gmail.com

Статья поступила 27 сентября 2023 г. Поступила после доработки 11 декабря 2023 г. Принята к публикации 22 февраля 2024 г.

Высоковольтный источник питания наряду с рентгеновской трубкой — один из основных узлов рентгеновских аппаратов, широко применяемых для исследования структуры материалов, оценки внутреннего строения деталей узлов и механизмов, неразрушающего контроля технологических операций. При этом в аппаратах моноблочного типа рентгеновская трубка и питающее устройство находятся в одном общем корпусе — моноблоке, в кабельных рентгеновский излучатель с трубкой и питающее устройство соединяются между собой высоковольтным кабелем. В работе представлены результаты исследования по созданию высоковольтного стабилизированного источника питания рентгеновских трубок в составе аппарата кабельного типа. Приведены электрические схемы и конструкция источника на основе инверторного преобразователя напряжения, построенного на силовых биполярных транзисторах по схеме полного моста. Регулировка выходного напряжения и мощности источника осуществляется посредством ШИМ-модуляции выпрямленного сетевого напряжения, подаваемого на первичную обмотку высоковольтного трансформатора. Применение твердотельного компаунда повышенной теплопроводности позволило ограничиться принудительным воздушным охлаждением источника и разместить его конструкцию в габаритах стандарта Rack Mount (форм-фактор 4U). Опыт эксплуатации источника питания в условиях крупного промышленного предприятия показал, что по своим электрическим и массогабаритным параметрам источник может с успехом использоваться в рентгеновских установках для контроля структуры материалов.

Ключевые слова: высоковольтный стабилизированный источник питания; рентгеновская трубка.

HIGH-VOLTAGE POWER SUPPLY FOR X-RAY CONTROL OF THE STRUCTURE OF MATERIALS

© Alexander S. Dmitriev, Alexey D. Kuleshov, Nikolay N. Potrakhov, Yury N. Potrakhov, Karina K. Guk*

St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197022, Russia; *e-mail: kzhamova@gmail.com

Received September 27, 2023. Revised December 11, 2023. Accepted February 22, 2024.

A high-voltage power supply, as an X-ray tube, is one of the main components of X-ray machines widely used in studying the structure of materials, assessing the internal structure of components and mechanisms, and non-destructive testing of technological processes. In monoblock-type devices, the X-ray tube and power supply are located in a common enclosure, while in cable-type setups, the X-ray emitter with the tube and the power supply are connected by a high-voltage cable. We present the results of research in creating a high-voltage stabilized power supply for X-ray tubes as a part of a cable-type apparatus. Electrical circuits and the design of the power supply based on a full bridge voltage inverter built on power bipolar transistors are developed. Adjustment of the output voltage and power of the source is carried out through PWM modulation of the rectified mains voltage applied to the primary winding of the high-voltage transformer. The use of a solid-state compound with increased thermal conductivity allowed us to use forced air cooling of the source and place it within the dimensions of the Rack Mount standard (4U form factor). The experience of the power supply operation in conditions of a large industrial enterprise has shown that its electrical and dimensional parameters provide the possibility of successful use in X-ray installations intended for the structure control of materials.

Keywords: high-voltage stabilized power supply; X-ray tube.

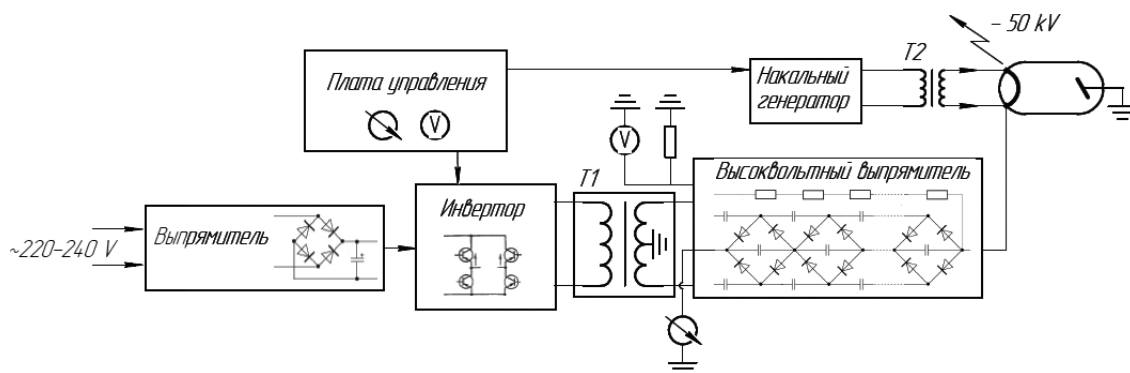


Рис. 1. Структурная схема ВИП

Fig. 1. HVPS structure diagram

Введение

Высоковольтный источник питания (ВИП) наряду с рентгеновской трубкой — основной узел рентгеновских аппаратов (РА), которые подразделяют на моноблочные и кабельные [1, 2]. В моноблочном РА рентгеновская трубка и питающее устройство располагают в одном общем корпусе — моноблоке, в кабельном аппарате рентгеновский излучатель с трубкой и питающее устройство соединены между собой высоковольтным кабелем. Пульт управления в обоих случаях может быть вынесен из моноблока или корпуса устройства. Управление работой РА в этом случае осуществляют по сигнальному кабелю или радиоканалу [3, 4].

В случае моноблочной схемы построения РА выводы рентгеновской трубки (катода и анода) непосредственно подключены к элементам электрической схемы ВИП, а трубка и ВИП располагаются в едином корпусе — моноблоке. При кабельной схеме рентгеновская трубка и ВИП — генераторное устройство — размещены в отдельных металлических корпусах. Корпус генераторного устройства и кожух трубки снабжены высоковольтными стаканами, а концы высоковольтного кабеля, используемого для подачи напряжения питания, — кабельными наконечниками. Пара стакан — наконечник составляет высоковольтное разъемное соединение. При подключении наконечники кабеля вставляют в соответствующие стаканы кожуха с трубкой (излучателя) и корпуса генераторного устройства. Соответственно, в состав аппарата кабельного типа входят рентгеновский излучатель, генераторное устройство, комплект высоковольтных кабелей.

Упрощенно можно считать, что в моноблочном аппарате присутствует только одно высоковольтное соединение, обеспеченное конструктивными элементами моноблока. В аппарате кабельного типа таких высоковольтных соединений два или четыре, в зависимости от электрической

схемы питания трубки (с одним заземленным электродом или с заземленной средней точкой). При этом добавляются сложные высоковольтные узлы — стаканы, наконечники и сам кабель.

Казалось бы, моноблочная схема построения позволяет обеспечить меньшие габариты и массу РА по сравнению с кабельной. Однако с увеличением напряжения на трубке и, соответственно, ее мощности (для просвечивания, например, крупных металлоконструкций) габариты и вес излучателя кабельного аппарата растут линейно, а моноблока моноблочного аппарата — почти в квадратичной зависимости [5]. Проведенный анализ показал, что при мощности от 1 кВт и выше рентгеновский излучатель кабельного РА обладает существенно меньшими габаритами и весом, чем моноблок моноблочного РА [6, 7].

Цель работы — разработка базовой конструкции стабилизированного ВИП рентгеновских трубок в составе кабельного РА.

Структурная схема ВИП, выпрямитель и инвертор

Упрощенная структурная схема ВИП кабельного РА приведена на рис. 1. Принцип работы схемы напоминает импульсный блок питания [8].

Для предварительной оценки выходных характеристик ВИП проводили моделирование основных узлов с использованием программы Spice (среда LTspice). Были составлены полные эквивалентные схемы силового инвертора, высоковольтного трансформатора и умножителя напряжения с соответствующими Spice-моделями используемой компонентной базы [9, 10]. Так, были оценены максимальная величина пульсаций выходного напряжения (0,12 %) и суммарная величина тепловых потерь всей конструкции (400 Вт).

Выпрямитель сетевого напряжения преобразует переменное напряжение электрической сети

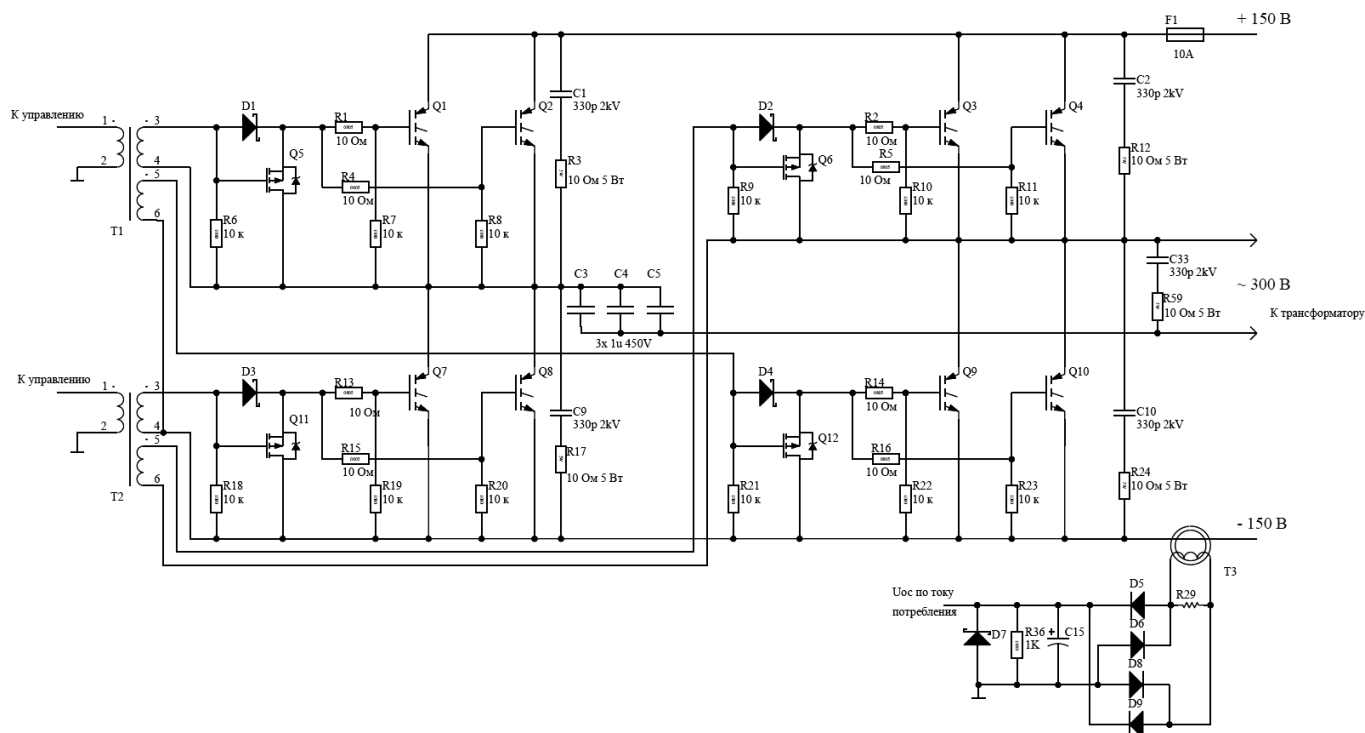


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема инвертора: $T1, T2$ — «развязывающие» (по управлению) трансформаторы; $T3$ — трансформатор тока; $Q1 - Q4, Q7 - Q10$ — БТИЗ-транзисторы мостового инвертора; $C3 - C5$ — емкостный фильтр

Fig. 2. Schematic diagram of the inverter: $T1, T2$ — “isolating” transformers for control; $T3$ — current transformer; $Q1 - Q4, Q7 - Q10$ — IGBT transistors of the bridge inverter; $C3 - C5$ — capacitive filter

(частота — 50 Гц) в постоянное для его дальнейшего преобразования посредством ШИМ-модуляции инвертором на заданной повышенной частоте. Такой способ модуляции выпрямленного сетевого напряжения позволяет отказаться от использования мощного управляемого низковольтного $DC-DC$ -преобразователя напряжения. Отметим, что ввиду высокой мощности преобразователя обязательное требование к выпрямителю — наличие активного корректора коэффициента мощности [11].

Принципиальная электрическая схема инвертора, выполненного по типовой схеме полного моста, представлена на рис. 2. В качестве силовых ключей использовали мощные биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ).

Заметим, что для повышения рабочих токов коммутации количество транзисторов удвоено путем их параллельного включения. В электрической схеме инвертора реализовано трансформаторное управление затворами БТИЗ с помощью трансформаторов $T1$ и $T2$, а также маломощных полевых транзисторов, диодов и «обязывающих» резисторов. Инвертор нагружен на первичную обмотку высоковольтного трансформатора, вторичная обмотка которого подключена к емкостному умножителю напряжения. Таким

образом, достигается полная гальваническая «развязка» низковольтной части электрической схемы ВИП, включая схемы управления и индикации, от ее высоковольтной части.

Управляющие БТИЗ-импульсы задаются генератором, построенным на основе ШИМ-контроллера TL594. Применение данной микросхемы дает возможность исключить протекание сквозных токов через БТИЗ. Регулировка выходной мощности осуществляется путем изменения коэффициента заполнения управляющих импульсов с заданной несущей частотой (45,5 кГц).

На рис. 3 представлены осциллограммы управляющих импульсов в зависимости от требуемой величины выходной мощности.

В выбранной схемотехнике ВИП для снижения коммутационных потерь, которое может обеспечиваться режимами ZVS и/или ZCS (включение ключа в нулях напряжения и выключение в нулях тока), резонансные методы не использовали, так как это внесло бы в электрическую схему дополнительные силовые компоненты в виде коммутирующих дросселей и конденсаторов с собственными тепловыми потерями, а также усложнило бы алгоритм частотного управления БТИЗ [12, 13].

Для демпфирования (подавления) паразитных высокочастотных всплесков напряжения на

БТИЗ, обусловленных индуктивностью рассеяния первичной обмотки силового высоковольтного трансформатора и собственными емкостями ключей, применяли диссипативные снабберные цепи [14]. Использовали простые цепочки, состоящие из сопротивлений и емкостей ($C1, R3; C2, R12; C9, R17; C10, R24$). С их помощью достигался режим «мягкой» коммутации БТИЗ.

Для контроля тока через БТИЗ без нарушения гальванической «развязки» цепи инвертора использовали измерительную схему с трансформатором тока, включенным в отрицательную шину питания транзисторного моста. Сформированный сигнал обратной связи по току питания инвертора подавался через буферный усилитель на АЦП микроконтроллера платы управления.

Высоковольтный трансформатор

Напряжение на емкостный умножитель поступало от высоковольтного трансформатора, конструктивная особенность которого заключалась, прежде всего, в специальном выполнении вторичной (высоковольтной) обмотки: секционирование, трапецеидальная намотка каждой секции, разделение секций изолирующими шайбами и дополнительной межслойной изоляцией в каждой секции. На практике величина высокого напряжения на вторичной обмотке высоковольтного трансформатора ВИП с выходным напряжением до 50 кВ выбиралась в пределах 2 – 8 кВ. Отметим, что дальнейшее повышение напряжения на этой обмотке приводит к усложнению конструкции трансформатора и значительному увеличению паразитной емкости CS .

В отличие от низковольтных в высоковольтных трансформаторах гораздо труднее обеспечить надежную изоляцию по поверхности (для исключения поверхностных пробоев («перекрытий»)) по сравнению с объемом (для исключения сквозного пробоя изоляции). Но такую задачу можно решить путем выбора типа изоляционного материала и его толщины.

При выборе сердечника трансформатора (габаритной мощности и его формы) руководствовались условием, в соответствии с которым габаритная мощность трансформатора должна превышать расчетную мощность не менее чем в 1,5 раза [15].

В итоге трансформатор был выполнен на ферритовом сердечнике U100/57/25 (материал сердечника — ЗС90). Его двухстержневая конструкция позволяла разделять первичную и вторичную обмотки на половины и располагать каждую пару половин на своем стержне. Высоковольтные выходы вторичной обмотки оказывались максимально удалены от витков низковольтной первичной обмотки. Суммарное

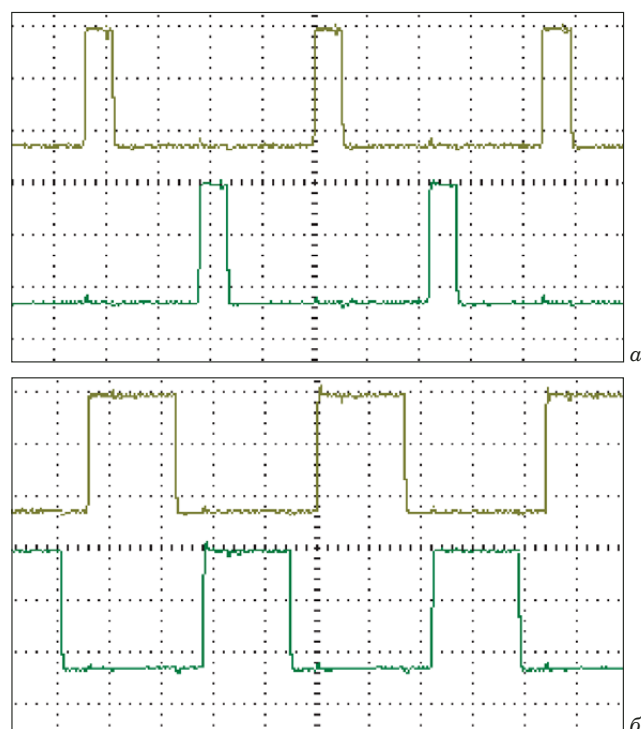


Рис. 3. Осциллограммы управляющих сигналов силового инвертора: *a, б* — мощность на нагрузке 400 (20 кВ, 20 мА) и 2000 Вт (50 кВ, 40 мА)

Fig. 3. Oscillograms of power inverter control signals: *a, b* — power at a load of 400 (20 kV, 20 mA) and 2000 W (50 kV, 40 mA)

количество витков первичной обмотки составляло 22, а вторичных — по 300, при этом вторичная обмотка подключалась к емкостному умножителю по схеме с общей точкой.

Высоковольтный выпрямитель

Высокое выходное напряжение ВИП формировалось высоковольтным выпрямителем, выполненным по схеме симметричного емкостного умножителя напряжения Кокрофта – Уолтона. Это обеспечивало меньшие пульсации напряжения на выходе источника по сравнению с несимметричной схемой умножения [16]. Заряд центральной цепи конденсаторов снижался исключительно за счет работы на нагрузку, а подзарядка проводилась дважды за полупериод от боковых цепей. К достоинству выбранной схемы, по сравнению с простой несимметричной, относится также отсутствие пульсаций, обусловленных паразитными емкостями.

Умножитель напряжения конструктивно был выполнен в виде моноблока, в котором располагались диоды и конденсаторы, стакан высоковольтного разъема и делитель напряжения, находящиеся в изолирующей среде. Делитель высокого напряжения, предназначенный для измерения по обратной связи высокого напряжения

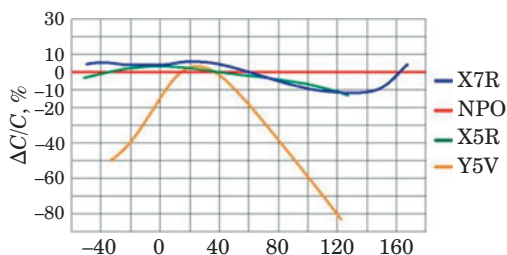


Рис. 4. Температурные зависимости емкости керамических конденсаторов с типами диэлектриков X7R, NPO, X5R, Y5V

Fig. 4. Temperature dependences of the capacitance of ceramic capacitors for dielectrics X7R, NPO, X5R, Y5V

на выходе ВИП, состоял из цепочки термостабильных высоковольтных резисторов высокопотенциального («верхнего») плеча и низковольтных резисторов «нижнего» плеча. Сигнал обратной связи с «нижнего» плеча подавался на усилитель обратной связи, находящийся на низкопотенциальной плате управления.

Чтобы обеспечить надежную работу ВИП, необходима была защита от электрического пробоя каждого элемента высоковольтного блока. Прежде всего, для ограничения импульсного тока (ISC) через диоды умножителя напряжения во время аварийной ситуации использовали токоограничительные или «балластные» резисторы. В зависимости от величины ISC диодного столба номинал «балластного» резистора подбирали таким образом, чтобы во время аварии импульсный ток через диоды составлял треть от номинального значения.

Особое значение имел выбор и остальных компонентов емкостного умножителя. Поскольку величина тока, отдаваемого в нагрузку, велика (до 40 мА), номиналы высоковольтных конденсаторов должны быть соответствующие. Применяли керамический конденсатор номиналом 10 нФ (20 кВ, тип диэлектрика — Y5V). Нужный номинал на каскад умножителя достигался параллельным включением емкостей. Тот же подход использовали для достижения максимально допустимого прямого (рабочего) тока через диоды.

Отметим, что с ростом тока подзарядки конденсаторов (прямом токе через диоды) растут тепловые потери, обусловленные прямым падением напряжения на диодах, что, в свою очередь, приводит к нагреву рабочей среды умножителя, включая конденсаторы. Строго говоря, тип диэлектрика выбранных конденсаторов малоприменим для использования в мощных схемах вследствие значительного изменения емкости с ростом рабочей температуры (рис. 4) [17]. Однако опытным путем удалось оптимизировать компоновку элементов умножителя и свести их нагрев к минимуму. Для изоляции элементов моно-

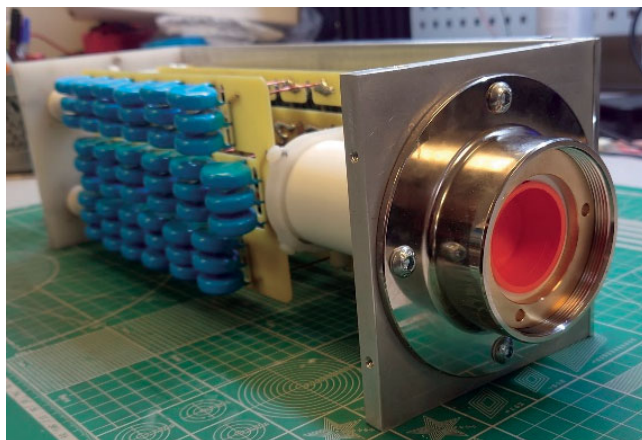


Рис. 5. Моноблок ВИП

Fig. 5. VIP monoblock

блока (рис. 5) использовали компаунд повышенной теплопроводности «Пентэлэст-727» [18].

Генератор питания накала катода, плата управления

Для питания накала катода подключаемых к ВИП рентгеновских трубок разработали специальный генератор переменного напряжения (накальный генератор), состоящий из маломощного катодного инвертора и высокопотенциального трансформатора. Входное постоянное напряжение питания катодного инвертора подавалось от отдельного источника на 24 В. Сам катодный инвертор был выполнен по более простой, по сравнению с силовым инвертором, полумостовой схеме на двух полевых транзисторах в качестве ключей. Первичная обмотка высокопотенциального трансформатора подключалась к выходу катодного инвертора, вторичная — непосредственно к контактам накала высоковольтного разъема.

Особенность конструкции трансформатора заключалась в наличии специальной высоковольтной изоляции вторичной обмотки, которая при работе ВИП находилась под напряжением до 50 кВ. Поэтому контроль величины тока накала катода осуществлялся измерительной схемой, гальванически «развязанной» от измеряемого участка накальной цепи. В этом случае также использовали схему с трансформатором тока.

Сигнал обратной связи по току накала и сигналы по анодному току и напряжению поступали на плату управления, построенную на базе микроконтроллера ATmega64. Управление ВИП и контроль выходных параметров осуществляли непосредственно с его лицевой панели и удаленно с помощью персонального компьютера посредством передачи данных через интерфейс последовательного порта RS-232.

ВИП «СтабИст-50»

Для питания аппарата «СтабИст-50» (рис. 6) используется однофазная цепь (переменное напряжение — 230 ~ 240 В, частота — 50 – 60 Гц, максимальная потребляемая мощность — 3 кВт). Максимальный рабочий режим аппарата: анодное напряжение — 50 кВ (отрицательной полярности), ток — 50 мА. Питание накала осуществляется переменным источником тока, позволяющим выставлять ток нити накала в пределах 0 – 10 А с максимальным падением напряжения 10 В. Частота переменного тока нити накала — 40 кГц. Номинальные габаритные размеры аппарата — 490 × 585 × 178 мм.

Опытный образец ВИП «СтабИст-50» успешно прошел апробацию на крупном промышленном предприятии при использовании его для питания рентгеновских излучателей в составе двух рентгеновских установок (в дифрактометре, предназначенном для анализа фазового состава и структуры материалов, и сепараторе — для обнаружения в потоке руды отдельных кристаллов алмаза двухэнергетичным рентгенолюминесцентным методом) [19, 20]. В обоих случаях аппарат показал высокую кратковременную и длительную стабильность установленного выходного напряжения для обеспечения требуемых аналитических характеристик установок.

Заключение

Таким образом, на основе оригинальной электрической схемы силового (низковольтного) инвертора и перспективных конструкторских и технологических решений разработан стабилизированный источник высокого напряжения для питания рентгеновских трубок. Источник использовался в условиях крупного промышленного предприятия в составе рентгеновских дифрактометра общего назначения и сепаратора алмазосодержащей породы. Опыт эксплуатации ВИП показал, что благодаря своим электрическим и массогабаритным параметрам [21] его можно эффективно применять в рентгеновских установках при исследованиях фазового состава и структуры материалов.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашению № 075-11-2023-006, идентификатор государственного контракта 000000S407523Q6V0002).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Рис. 6. ВИП «СтабИст-50»

Fig. 6. High-voltage power supply “StabIst-50”

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов С. А., Шукин Г. А. Рентгеновские трубки технического назначения. — Л.: Энергоатомиздат, 1989. — 200 с.
2. Радиационный неразрушающий контроль. Термины: справоч. пособ. — М.: Промышленная безопасность, 2003.
3. Соснин Ф. Р. Неразрушающий контроль. Справочник. Т. 1. — М.: Машиностроение, 2008. — 560 с.
4. Артемьев Б. В., Буклей А. А. Радиационный контроль: учеб. пособ. — М.: Спектр, 2012. — 192 с.
5. Клюева В. В. Рентгенотехника. Справочник. — М.: Машиностроение, 1992.
6. Потрахов Н. Н., Бессонов В. Б., Ободовский А. В. и др. Установки для рентгеновского контроля (обзор) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 10. С. 35 – 42.
7. Потрахов Н. Н., Гук К. К., Бессонов В. Б. Контроль промышленных изделий методом микрофокусной рентгенографии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 3. С. 31 – 37. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-3-31-37
8. Крутов А. В. Схема работы импульсного блока питания / Инновационные научные исследования. 2021. № 6-2(8). С. 42 – 49.
9. Components and technologies. LTSpice. <https://kit-e.ru/category/cad/ltpspice> (access 13.09.2023).
10. Шевкунова А. В. Исследование работы однофазного инвертора напряжения / Эксплуатация морского транспорта. 2023. № 2(107). С. 197 – 203.
11. Сурайкин А. И., Сурайкин А. А. Моделирование активного корректора коэффициента мощности в составе мощных импульсных преобразователей / Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 7. С. 95 – 97.
12. Blinov A., Ivakhno V., Zamaruev V., et al. Experimental Verification of DC/DC Converter with Full-Bridge Active Rectifier / The 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2012). — Montreal, Canada, 2012. P. 5161 – 5166.
13. Дунаев М. П., Довудов С. У. Сравнение энергоэффективности схем автономных инверторов напряжения с синусоидальной широтно-импульсной и частотно-импульсной модуляцией / Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 50 – 55. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-50-55
14. Ли П., Хердин М. Выбор, проектирование и расчет схемы снаббера / Силовая электроника. 2022. № 2(95). С. 8 – 11.
15. Горский А. Н., Русин Ю. С., Иванов Н. Р., Сергеева Л. А. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания. — М.: Радио и связь, 1988.

16. Ровдо А. А. Полупроводниковые диоды и схемы с диодами. — М.: Лайт, 2000. — 286 с.
17. Zednicek T. High CV MLCC DC/AC Bias Ageing Capacitance Loss Explained / 2nd PCNS Passive Components Networking Symposium. — Bucharest, Romania, 2019. P. 1 – 15.
18. Компаунд «Пентэлэст-727». Компания «Силиконовые Материалы». https://pentasever.ru/catalog/dvukhkomponentnye_kompaundy_i_germetiki/elektroizolyatsionnye_kompaundy_i_germetiki/kompaund_pentelast_727_marka_a (доступ 15.09.2023).
19. Буй Л., Емельянов Ю., Кабанов Д. и др. Настольный рентгеновский дифрактометр для анализа порошков / Технологии в электронной промышленности. 2021. № 5. С. 54 – 57.
20. Зырянов И. В., Макалин И. А. Развитие рентгенолюминесцентного метода обогащения алмазосодержащего сырья / Наука и техника в Якутии. 2015. № 1(28). С. 16 – 18.
21. High-voltage power supplies. Spellman High Voltage Electronics Corp. <https://www.spellmanhv.com/ru/high-voltage-power-supplies> (access 15.09.2023).
10. Shevkunova A. V. Study of the operation of a single-phase voltage inverter / *Éksp. Mor. Transp.* 2023. N 2(107). P. 197 – 203 [in Russian].
11. Suraykin A. I., Suraykin A. A. Modeling of an active power factor corrector as part of high-power pulse converters / *Nauch.-Tekhn. Vestn. Povolzh'ya.* 2023. N 7. P. 95 – 97 [in Russian].
12. Blinov A., Ivakhno V., Zamaruev V., et al. Experimental Verification of DC/DC Converter with Full-Bridge Active Rectifier / *The 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2012).* — Montreal, Canada, 2012. P. 5161 – 5166.
13. Dunaev M. P., Dovudov S. U. Comparison of energy efficiency of autonomous voltage inverter circuits with sinusoidal pulse-width and pulse-frequency modulation / *Élektrotekhn. Sist. Kompl.* 2021. N 4(53). P. 50 – 55 [in Russian]. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-50-55
14. Li P., Herdin M. Selection, design and calculation of the snubber circuit / *Sil. Elektronika.* 2022. N 2(95). P. 8 – 11 [in Russian].
15. Gorskiy A. N., Rusin Yu. S., Ivanov N. R., Sergeeva L. A. Calculation of electromagnetic elements of secondary power supplies. — Moscow: Radio i svyaz, 1988 [in Russian].
16. Rovdo A. A. Semiconductor diodes and circuits with diodes. — Moscow: Lait, 2000. — 286 p. [in Russian].
17. Zednicek T. High CV MLCC DC/AC Bias Ageing Capacitance Loss Explained / 2nd PCNS Passive Components Networking Symposium. — Bucharest, Romania, 2019. P. 1 – 15.
18. Compound Pentelast-727. Kompaniya “Silikonovy Materialy”. https://pentasever.ru/catalog/dvukhkomponentnye_kompaundy_i_germetiki/elektroizolyatsionnye_kompaundy_i_germetiki/kompaund_pentelast_727_marka_a (access 15.09.2023) [in Russian].
19. Buy L., Emelyanov Yu., Kabanov D., et al. Benchtop X-ray diffractometer for powder analysis / *Tekhnol. Élektron. Prom.* 2021. N 5. P. 54 – 57 [in Russian].
20. Zuryanov I. V., Makalin I. A. Development of an X-ray luminescence method for the enrichment of diamond-containing raw materials / *Nauka Tekhn. Yakutii.* 2015. N 1(28). P. 16 – 18 [in Russian].
21. High-voltage power supplies. Spellman High Voltage Electronics Corp. <https://www.spellmanhv.com/ru/high-voltage-power-supplies> (access 15.09.2023).

REFERENCES

1. Ivanov S. A., Shchukin G. A. X-ray tubes for technical purposes. — Leningrad: Énergoatomizdat, 1989. — 200 p. [in Russian].
2. Radiation non-destructive testing. Terms: reference manual. — Moscow: Promyshlennaya bezopasnost, 2003 [in Russian].
3. Sosnin F. R. Non-destructive testing: reference book. Vol. 1. — Moscow: Mashinostroenie, 2008. — 560 p. [in Russian].
4. Artemev B. V., Bukley A. A. Radiation monitoring: textbook. — Moscow: Spektr, 2012. — 192 p. [in Russian].
5. Klyueva V. V. X-ray technology: reference book. — Moscow: Mashinostroenie, 1992 [in Russian].
6. Potrakhov N. N., Bessonov V. B., Obodovsky A. V., et al. Installations for x-ray control (review) / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2019. Vol. 85. N 10. P. 35 – 42 [in Russian].
7. Potrakhov N. N., Guk K. K., Bessonov V. B. Inspection of industrial products using microfocus radiography / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2023. Vol. 89. N 3. P. 31 – 37 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-3-31-37
8. Krutov A. V. Scheme of operation of a switching power supply / *Innov. Nauch. Issl.* 2021. N 6 – 2(8). P. 42 – 49 [in Russian].
9. Components and technologies. LTspice. <https://kit-e.ru/category/cad/ltspice> (access 13.09.2023).