

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МАГНЕТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР СВЧ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО КОММУТАТОРА

© 2023 г. Е. Ю. Буркин^{а,*}, В. В. Свиридов^а, П. Ю. Чумерин^а

^а *Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30*

**e-mail: burkin@mail.ru*

Поступила в редакцию 24.06.2022 г.

После доработки 30.06.2022 г.

Принята к публикации 19.08.2022 г.

Описана импульсная магнетронная система, генерирующая высокоэнергетические СВЧ-импульсы с частотой 400 Гц и средней мощностью 0.5 кВт. Для формирования импульса тока магнетрона использована схема с 12-ю идентичными транзисторными модулями с рабочим напряжением 800 В, которые на интервале импульса подключаются последовательно к первичной обмотке высоковольтного импульсного трансформатора с коэффициентом трансформации, равным 3.5. Таким образом формируется импульс напряжения с амплитудой до 26 кВ, током 25 А с регулируемой длительностью 100–500 нс. Представлены экспериментальные данные работы системы на импульсный СВЧ-магнетрон и эквивалент нагрузки.

DOI: 10.31857/S0032816223010081, EDN: JSDDTTJ

ВВЕДЕНИЕ

При создании магнетронных модуляторов, помимо традиционных тиратронных коммутаторов с формирующими линиями, используются различные схемы на основе транзисторных ключей. Несмотря на более низкие по сравнению с тиратронами уровни коммутируемых напряжений и токов, полная управляемость таких ключей позволяет достаточно просто обеспечить требуемую длительность и форму выходного импульсного напряжения и исключить из схемы импульсного модулятора формирующую линию. Кроме того, расширенный ресурс и зачастую меньшая стоимость полупроводниковых высоковольтных коммутаторов открывает перспективы для их внедрения в широкий круг устройств.

С точки зрения структуры модуляторов магнетронного напряжения с использованием твердотельных коммутаторов и в первую очередь полупроводниковых транзисторов, можно выделить три группы.

Самая простая группа схем использует последовательно-параллельное соединение транзисторов для обеспечения требуемого коммутируемого напряжения и тока. Таким образом создается модуль высоковольтного, сильноточного транзисторного коммутатора, который является ядром модуляторной схемы [1, 2].

Вторая группа схем является в той или иной степени вариацией схемы генератора Маркса.

В этих схемах используются две группы транзисторов: отдельная — для накачки (заряда) накопительных конденсаторов и основная — для формирования выходного импульса [3, 4].

Последняя группа схем использует идею генератора Маркса, заключающуюся в коммутации ряда предварительно заряженных конденсаторов (емкостных накопителей) на нагрузку. При этом система заряда конденсаторов представляет собой полностью или частично независимые высоковольтные, как правило, идентичные блоки питания относительно небольшого (единицы киловольт) напряжения.

Все вышеупомянутые схемы также позволяют сформировать выходное напряжение с использованием импульсного трансформатора, что дает возможность снизить требования к изоляции вспомогательного питания и, в ряде случаев, сигнала управления формирователей импульсов силовых транзисторов всех секций импульсного модулятора [5, 6]. С другой стороны, возможность создания и использования схемы без трансформатора позволяет формировать импульсы напряжения относительно большой длительности (единицы миллисекунд и более), что более актуально для систем питания клистронов, используемых в ускорительной технике. Также отсутствие трансформатора в целом снижает вес и габариты устройства, несмотря на большее число блоков коммутаторов, но при этом требует использования допол-

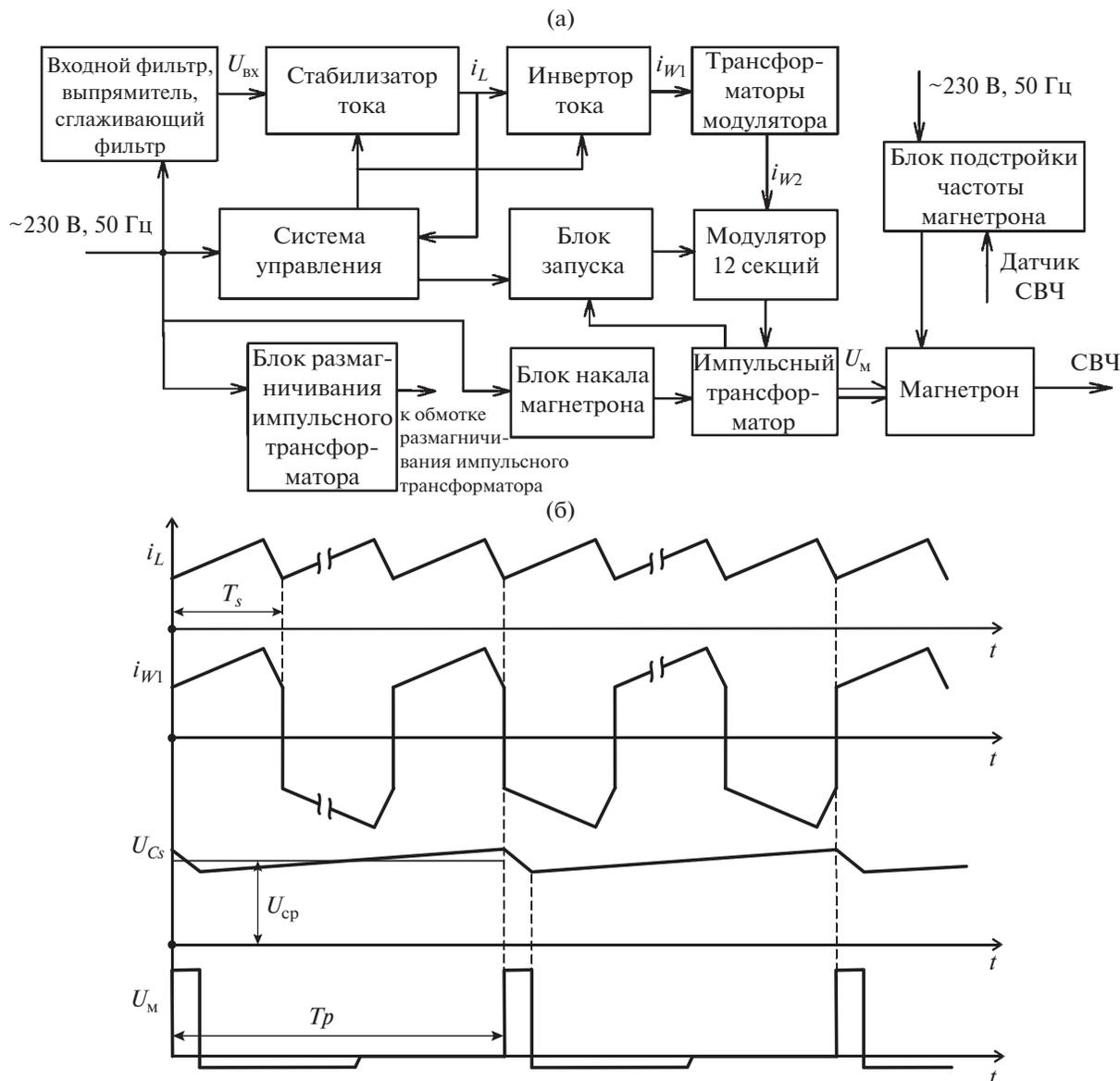


Рис. 1. Структурная схема СВЧ-генератора (а) и диаграмма его работы (б).

нительной схемы ограничения скорости нарастания тока, необходимой для защиты транзисторов высоковольтного коммутатора при пробое магнетрона.

Предлагаемая система электропитания генератора мощных СВЧ-импульсов относится к третьей группе преобразователей.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ГЕНЕРАТОРА

Структурная схема генератора и диаграммы работы в ключевых точках показаны на рис. 1. Общий вид инверторного блока и транзисторного модулятора приведен на рис. 2. В качестве генераторного прибора используется магнетрон

МИ-246А, имеющий следующие основные характеристики: фиксированная частота 8550–9650 МГц; выходная импульсная мощность 180–330 кВт; напряжение анода ≤ 26 кВ; ток анода импульсный ≤ 27.5 А; длительность импульса 0.4–1.5 мкс; скважность 1000–6000.

Электропитание всех составляющих частей генератора осуществляется от однофазной сети переменного тока ~230 В, 50 Гц. Для обеспечения автономной работы в течение 30 мин используется источник бесперебойного питания. Основные структурные компоненты формирования высоковольтного импульса магнетрона включают в себя инвертор тока, транзисторный модулятор, состоящий из двенадцати идентичных секций, и



Рис. 2. Инверторный (справа) и модуляторный (слева) блоки системы генерации мощных СВЧ-импульсов.

импульсный повышающий трансформатор. Инверторный узел обеспечивает основной канал подвода энергии к магнетрону за счет генерации переменного стабилизированного тока высокой частоты $i_{\text{м}}$ (рис. 1б), который поступает на первичные обмотки трансформаторов модулятора и далее, после выпрямителя, заряжает конденсаторную батарею соответствующей секции модулятора. Сетевое напряжение поступает через входной помехоподавляющий фильтр на однофазный выпрямитель и сглаживающий фильтр, которые формируют шину постоянного тока для импульсного стабилизатора тока, выходной ток которого i_L поступает на мостовой нерегулируемый инвертор тока, работающий с максимальным коэффициентом заполнения, что обеспечивает непрерывную передачу энергии для заряда конденсаторных батарей модулятора. Величина выходного напряжения на конденсаторной батарее U_C регулируется и стабилизируется путем соответствующего изменения уровня тока импульсного стабилизатора тока. Формирование импульса напряжения магнетрона U_m осуществляется блоком полупроводникового транзисторного модулятора с использованием выходного импульсного трансформатора. В момент формирования импульса происходит включение силовых транзисторов всех секций модулятора, что приводит к подключению параллельно первичной обмотке импульсного трансформатора последовательно соединенных конденсаторных батарей двенадцати секций модулятора. Тем самым создается амплитуда первичного напряжения импульсного трансформатора порядка ~ 7.5 кВ. Далее это напряжение повышается импульсным трансформатором до величины рабочего напряжения магнетрона (26 кВ). В результате формируется ток маг-

нетрона, который обеспечивает СВЧ-генерацию. Небольшая величина коэффициента трансформации импульсного трансформатора (3.5), с одной стороны, и относительно высокое напряжение на первичной обмотке, с другой стороны, позволяют обеспечить требуемый фронт нарастания тока, а также малые искажения формы импульса напряжения. Последнее необходимо для формирования “узкого” симметричного спектра СВЧ-импульса и в ряде случаев позволяет обходиться без дополнительной корректирующей цепи.

Импульс управления поступает синхронно на все секции модулятора от системы управления через блок запуска, который осуществляет формирование импульса тока, а также выключение модулятора в случае превышения током максимально допустимого значения. Сигнал, пропорциональный уровню тока магнетрона, поступает с трансформатора тока, расположенного в цепи первичной обмотки импульсного трансформатора. Помимо этого, система управления определяет длительность и частоту выходных импульсов, формирует управляющие импульсы силовых транзисторов инверторного блока, а также обеспечивает управление вспомогательными блоками: блоком сопряжения с компьютером, блоком поджига разрядника ВЧ-системы и блоком подстройки частоты магнетрона.

Для размагничивания импульсного трансформатора используется автономный источник тока, который через фильтр на пассивных элементах подключается к специальной размагничивающей обмотке. Также для работы магнетрона используются независимые блоки накала и подстройки частоты.

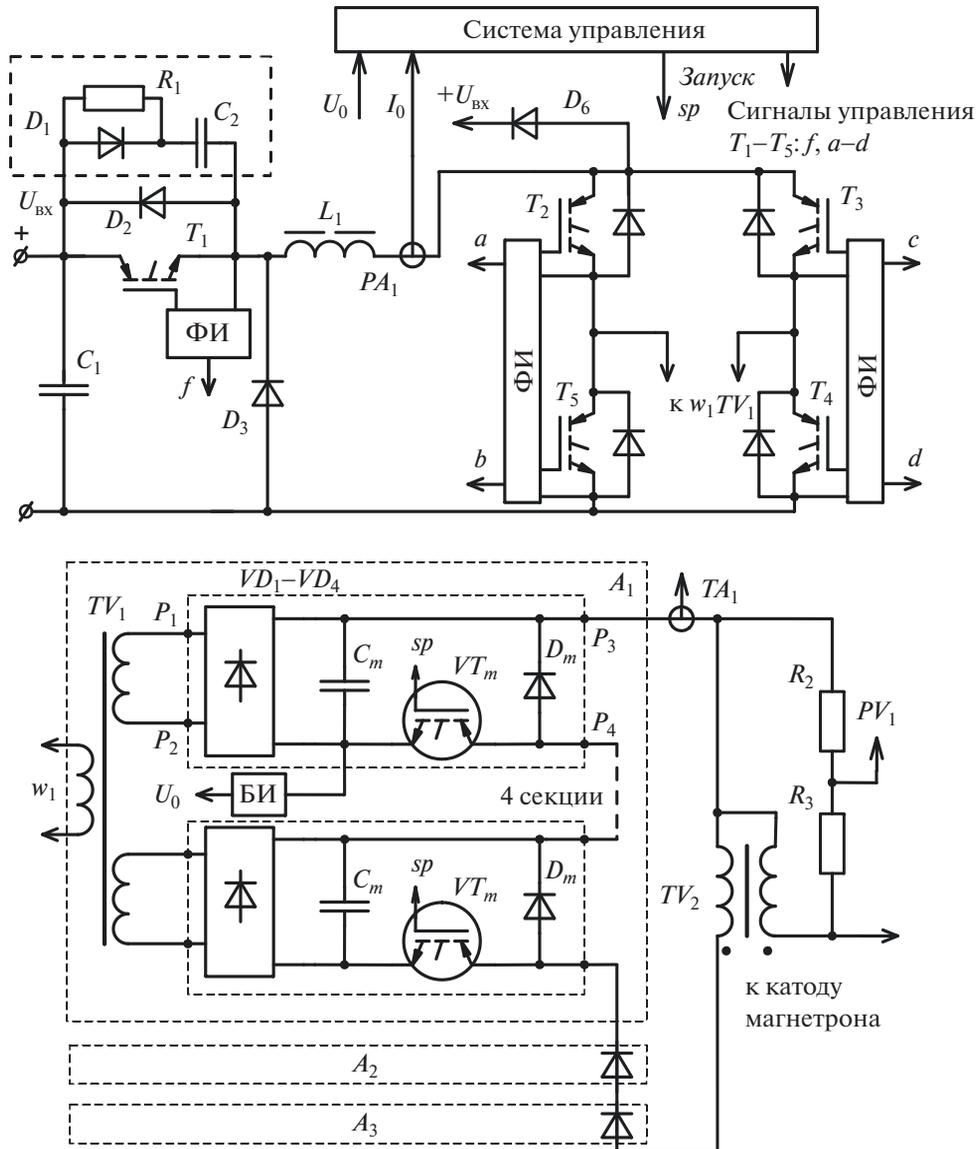


Рис. 3. Принципиальная схема СВЧ-генератора. БИ – блок измерения, ФИ – формирователь импульсов; T_1-T_5 – IRG4PH40UD; D_1 – HER308, D_2 – C4D10120H, D_3, D_6 – HFA16PB120; C_2 – K78-2-1000B-1.5 нФ; R_1 – SQP5-270 Ом; L_1 – сердечник A77438A7, $w = 95, 2.5$ мГн; PA_1 – датчик тока CSNF161; TV_1 – сердечник ПКК40-16, $w_1 = 120, w_{21} = w_{22} = 400$.

СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ГЕНЕРАТОРА

Инверторный блок

Принципиальная схема инверторного блока и модулятора выходного напряжения показана на рис. 3. Нестабилизированное входное постоянное напряжение $U_{вх}$ образуется из однофазной сети переменного напряжения с помощью схемы мостового двухполупериодного выпрямителя с последующей фильтрацией Г-образным LC-фильтром. Для ограничения пусковых токов в момент включения используется вспомогательная схема предварительного заряда фильтрового

конденсатора. Питание системы управления и других низковольтных вспомогательных систем осуществляется сетевым вспомогательным источником питания. Принцип работы этих блоков хорошо известен и на рисунке они не показаны.

Напряжение $U_{вх}$ с шины постоянного тока поступает на импульсный стабилизатор тока, выполненный на элементах T_1, D_3, L_1 по схеме понижающего преобразователя постоянного напряжения с фиксированной частотой сигнала управления. На рис. 1б показана диаграмма тока дросселя i_L и суммарного тока i_{w_1} первичных обмоток транс-

форматоров модулятора. Для защиты силового транзистора от перенапряжения, а также для уменьшения динамических потерь в момент выключения используется схема, выполненная на элементах D_1 , R_1 , C_2 . Ток с частотой пульсации 40 кГц поступает на вход мостового инвертора тока (транзисторы T_2 – T_3), работающего синхронно с импульсным стабилизатором тока на частоте 20 кГц. Таким образом, переменный ток практически прямоугольной формы с выхода инвертора поступает на параллельно соединенные первичные обмотки w_1 трех повышающих трансформаторов TV_1 и, далее, со вторичных обмоток – на выпрямители ячеек модуляторного блока, заряжая их входную конденсаторную батарею C_m и поддерживая на ней заданный средний уровень напряжения [6]. Для ограничения напряжения на транзисторах инвертора используется диод D_6 . Сигналы управления транзисторами инвертора представляют собой симметричные импульсы с коэффициентом заполнения 0.5. Регулирование и стабилизация выходного тока инвертора, который в основной своей части является током дросселя, осуществляются путем изменения коэффициента заполнения импульса управления силового транзистора T_1 стабилизатора тока. В свою очередь, стабилизация выходного напряжения происходит за счет изменения выходного тока инвертора соответствующим образом и организовано по подчиненному принципу. В качестве внутренней более быстродействующей переменной выступает ток дросселя с датчика тока стабилизатора (PA_1), а внешняя переменная представляет собой сигнал, пропорциональный выходному напряжению, который поступает с блока измерения БИ, расположенного в модуляторном блоке и подключенного к конденсаторной батарее первой заземленной секции модулятора выходного напряжения.

Модуляторный блок

Модулятор состоит из трех одинаковых узлов A_1 – A_3 . В свою очередь в каждый узел входит высоковольтный трансформатор TV_1 с четырьмя вторичными секционированными обмотками, подключенными к четырем идентичным секциям (в совокупности 12 штук), каждая из которых включает в себя выпрямитель, конденсаторную батарею C_m , силовой транзистор VT_m , обратный вентиль D_m , а также схему формирования импульсов. Электропитание всех секций осуществляется переменным током с частотой 20 кГц от вторичных обмоток силовых трансформаторов TV_1 . В процессе формирования импульса все секции включаются последовательно, формируя импульс напряжения на первичной обмотке импульсного высоковольтного трансформатора TV_2 с уровнем

напряжения порядка 7–8 кВ в зависимости от рабочего выходного напряжения. Накал магнетрона осуществляется через вторичную обмотку выходного трансформатора, выполненную двойным проводом. Для контроля и защиты модуляторного блока в схему введены трансформатор тока TA_1 и делитель напряжения PV_1 , сигналы с которых поступают на измерительный блок и, далее, на систему управления. При работе генератора возможен пробой магнетрона. В этом случае происходит достаточно резкое нарастание тока магнетрона и модулятора. Скорость нарастания тока определяется величиной индуктивности рассеяния импульсного трансформатора. В случае превышения током максимального значения происходит выключение генератора на время паузы, составляющее 100 мс. По истечении этого времени происходит автоматический запуск генератора с плавным выводом напряжения на магнетроне до заданного значения. Ко всем секциям модулятора подключены изолированные кабели, обеспечивающие передачу вспомогательного питания ячеек, а также прохождение сигнала управления от основного управляющего устройства к секциям.

Принципиальная схема одной ячейки модулятора показана на рис. 4. Сигнал управления поступает на микросхему драйвера DA_1 через трансформатор тока TA_1 , который нагружен на резистор R_5 . Все ячейки имеют общий первичный виток трансформаторов тока для обеспечения синхронной работы. Для снижения дисперсии управляющих импульсов первичный ток формируется от дополнительного источника повышенного напряжения (~500 В) через балластный резистор и вспомогательный транзисторный ключ. Усиленный сигнал с выхода драйвера DA_1 поступает через резистор R_4 на затворы транзисторов VT_1 , VT_2 , включенных параллельно для увеличения токовой нагрузки, особенно во время аварийных процессов (короткого замыкания магнетрона).

Для защиты транзисторных ключей от перенапряжения в каждой секции модулятора предусмотрена пассивная защитная цепь, выполненная на ограничителях напряжения VD_8 – VD_{10} .

Управление преобразователем осуществляется в цифровом виде на основе сигнального процессора TMS320F2808. В качестве сигналов обратной связи, на основании которых реализуется алгоритм регулятора, выступают ток дросселя входного стабилизатора тока и выходное напряжение емкостного накопителя. Блок подстройки частоты магнетрона выполнен на аналогичном процессоре и работает как в ручном, так и автоматическом режимах подстройки частоты магнетрона. Для автоматического режима реализован алгоритм поиска максимума сигнала обратной связи, поступающего с СВЧ-детектора. Регулировка частоты магнетрона осуществляется при помощи

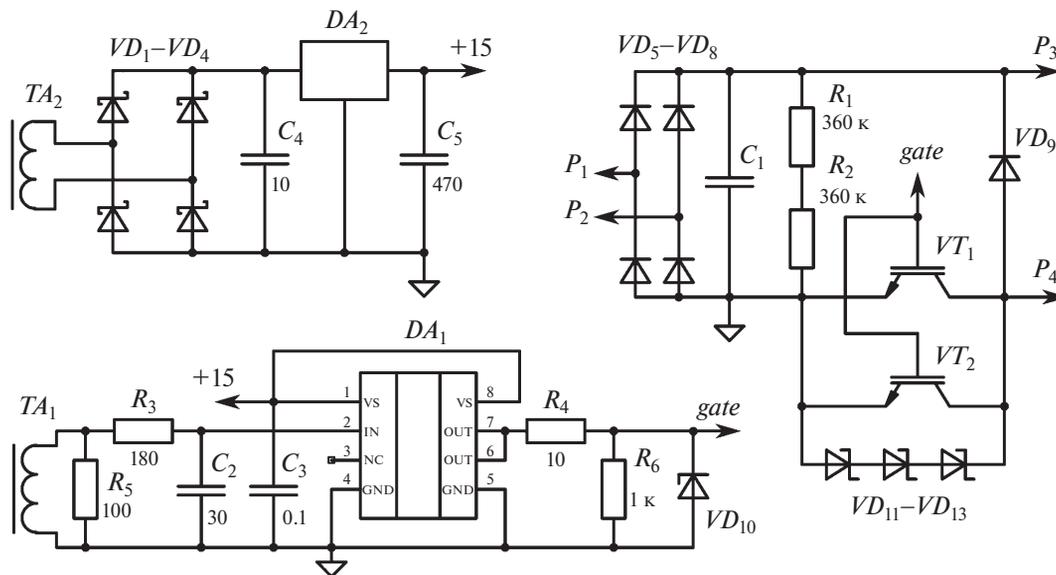


Рис. 4. Принципиальная схема ячейки модулятора. DA_1 – MIC4422, DA_2 – LM7815; VT_1 , VT_2 – IRG4PH40UD и VD_9 – HFA16PB120, расположенные на радиаторе; VD_1 – VD_4 – SS16, VD_5 – VD_8 – HFA08PB120, VD_1 – VD_{13} – 1.5KE300CA; C_1 – B32774D, 5 мкФ (3 параллельно), 800 В; TA_1 , TA_2 – ферритовый сердечник R22.1-13.7-6.35 T38, $w = 40$.

шагового двигателя. Все сигналы поступают с соответствующих датчиков, обеспечивающих их изоляцию, фильтрацию и согласование с аналого-цифровым преобразователем управляющего контроллера.

Для дистанционного управления магнетронным источником питания разработана программа rmag25, которая обеспечивает дублирование всех функций управления. Интерфейсные сигналы передаются с помощью оптоволоконных линий передачи на расстояние 200 м, что позволяет изолировать пульт управления от воздействия СВЧ-излучения.

КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ИСПЫТАНИЙ

Система электропитания магнетрона размещена в двух блоках. В первом из них, представляющем собой стандартный 19-дюймовый шкаф высотой 10U, размещены инверторный блок и источник бесперебойного питания, который обеспечивает автономную работу генератора в течение 30 мин. В инверторном блоке располагаются блоки накала и подстройки частоты магнетрона, а также блок размагничивания импульсного трансформатора. Во втором блоке расположены магнетрон с шаговым двигателем системы подстройки частоты, высоковольтный импульсный трансформатор, транзисторный модулятор и высокочастотное оборудование передатчика. Габаритные размеры блока без учета антенны состав-

ляют $910 \times 424 \times 424$ мм. Диаметр антенны 600 мм. Внешний вид внутреннего расположения элементов второго блока показан на рис. 5. Модулятор состоит из 12-ти идентичных изолированных модулей с естественным охлаждением. На отдельной печатной плате располагаются элементы силовой части: транзисторы и обратный клапан, закрепленные на радиаторе, входной мостовой выпрямитель и батарея конденсаторов. Также на плате находятся элементы управления и защиты силовых транзисторов. Каждые четыре модуля подключены к вторичным обмоткам своих трансформаторов, первичные обмотки которых соединены параллельно. Передача вспомогательного питания осуществляется от маломощного высокочастотного инвертора через разделительную одновитковую обмотку, изолированную с помощью тефлоновой трубки диаметром 4 мм. Сигнал управления передается на ячейку с помощью трансформатора тока. За модулятором, в непосредственной близости от магнетрона, расположен импульсный трансформатор тороидальной конструкции. Над магнетроном закреплен шаговый двигатель системы подстройки частоты. Модуляторный и инверторный блоки соединены между собой силовым и информационным кабелями. Максимальное расстояние между блоками составляет 3 м. Общее управление генератором осуществляется дистанционно от внешнего компьютера по волоконно-оптической линии связи на расстоянии до 200 м.

Испытания СВЧ-генератора проводились при работе его на магнетрон с подключенной стан-

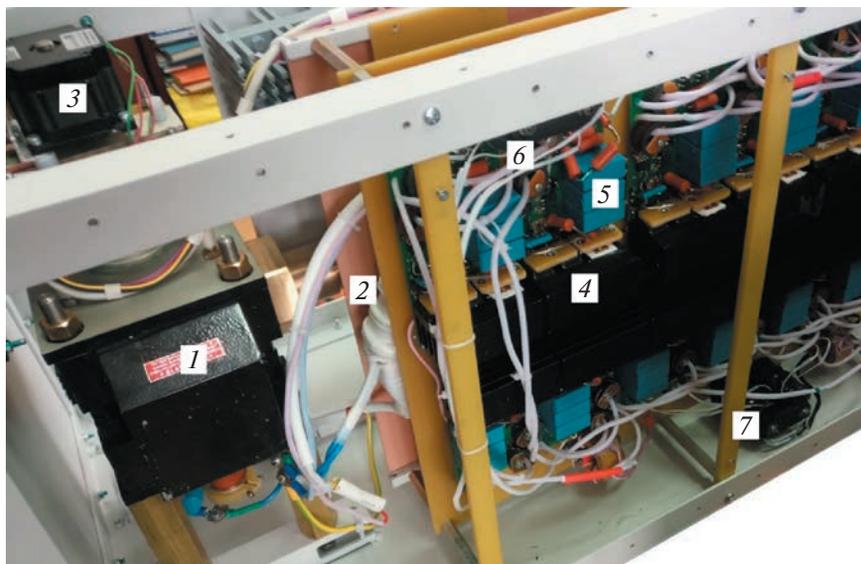


Рис. 5. Модуляторный блок. 1 – магнетрон; 2 – силовой повышающий трансформатор (магнитопровод 5П, 5БДСР ОЛ180/110/20, $w_1 = 8$, $w_2 = 28$, тефлоновая изоляция); 3 – шаговый двигатель системы подстройки частоты; 4 – транзисторы модулятора VT_1 , VT_2 и обратный диод VD_7 , расположенные на радиаторе; 5 – конденсаторная батарея; 6 – трансформатор тока для передачи сигнала управления; 7 – высоковольтные трансформаторы питания секций модулятора.

дартной волноводной нагрузкой. В качестве средств измерения использовались осциллографы Tectronix TDS2024, Agilent DSO91204A и высоковольтный осциллографический пробник АКТАКОМ АСА-6039.

На рис. 6 приведена осциллограмма тока и напряжения магнетрона, на рис. 7 – осциллограмма СВЧ-импульса на выходе магнетрона. Как можно видеть из осциллограмм, время нарастания напря-

жения составляет ~ 0.2 мкс, время спада ~ 0.5 мкс, спад плоской вершины $< 1\%$. У соответствующего СВЧ-импульса наблюдается незначительная девиация амплитуды в первой половине, что связано с пульсацией вершины токового импульса и отсутствием корректирующих цепей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана малогабаритная система по генерированию мощных СВЧ-импульсов с частотой следования до 400 Гц и максимальной импульсной мощностью 0.3 МВт. Блоки модулятора и импульсный трансформатор работают при есте-

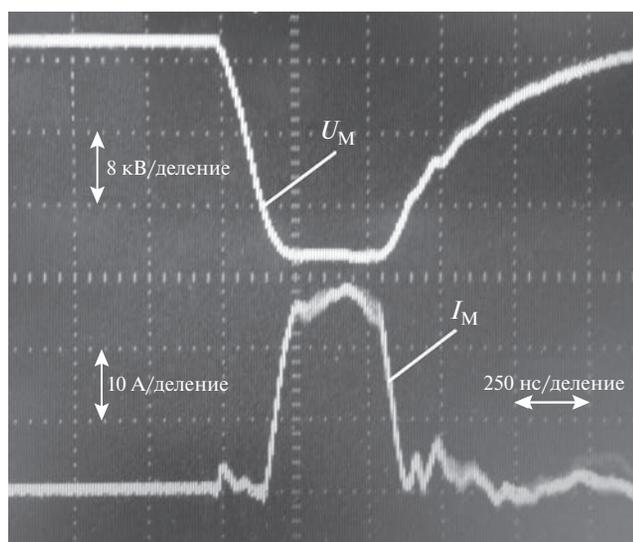


Рис. 6. Осциллограмма анодного напряжения и тока магнетрона.

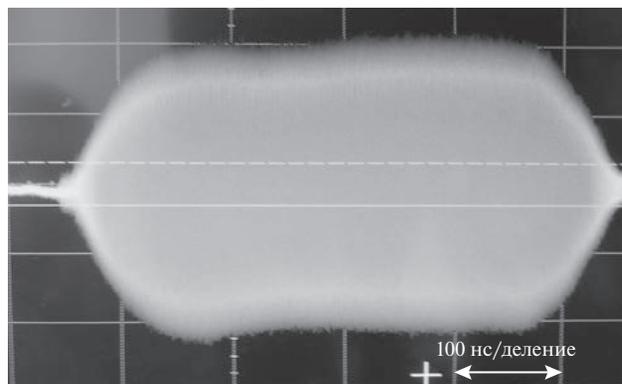


Рис. 7. Осциллограмма СВЧ-импульса на выходе магнетрона при работе на согласованную нагрузку.

ственном охлаждении, а блок инвертора – при принудительном воздушном охлаждении. Питание всей системы передатчика осуществляется от стабилизированного бесперебойного источника переменного напряжения со встроенной аккумуляторной батареей, который дает возможность работать автономно в течение 30 мин. Полученные технические результаты могут быть применены при создании мощных СВЧ-генераторов на основе импульсных магнетронов и использоваться в различных областях техники, где требуется генерация высокоэнергетических СВЧ-импульсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fink D.A., Torti R., Reinhardt N., Gaudreau M.P.J., Mansfield F.* // IEEE Trans. Magn. 2009. V. 45. Iss. 1. P. 282.
<https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2008604>
2. *Jong-Hyun Kim, Byung-Duk Min, Shenderay S.V., Geun-Hie Rim* // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. 2007. V. 14. Iss. 4. P. 921.
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2007.4286526>
3. *Heuijin Lim, Dong Hyeok Jeong, Manwoo Lee, Sung Chae Ro* // IEEE Trans. on Plasma Science. 2017. V. 45. Iss. 10. P. 2734.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2749504>
4. *Xia Wang, Qinghua Huang, Lin Xiong, Le Xu, Qiang Chen, Qing Xiong* // IEEE Trans. on Plasma Science. 2018. V. 46. Iss. 6. P. 2072.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2837021>
5. *Визирь В.А., Иванов С.В., Ковальчук Б.М., Манылов В.И., Шубкин Н.Г., Червяков В.В., Юрьев В.В., Бутаков Л.Д., Толмачев В.И.* // ПТЭ. 2004. № 4. С. 53.
6. *Буркин Е.Ю., Свиридов В.В., Чумерин П.Ю.* // ПТЭ. 2021. № 3. С. 34.
<https://doi.org/10.31857/S0032816221030174>