

## ИМПУЛЬСНЫЙ МАГНЕТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО КОММУТАТОРА

© 2021 г. Е. Ю. Буркин<sup>а,\*</sup>, В. В. Свиридов<sup>а</sup>, П. Ю. Чумерин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

\*e-mail: burkin@mail.ru

Поступила в редакцию 05.12.2020 г.

После доработки 24.12.2020 г.

Принята к публикации 25.12.2020 г.

Описана импульсная магнетронная система, генерирующая высокоэнергетические с.в.ч.-импульсы частотой 100 Гц и средней мощностью 5 кВт. Для формирования импульса тока магнетрона использована схема с 16 идентичными транзисторными блоками с рабочим напряжением 800 В, которые на интервале импульса подключаются последовательно к первичной обмотке высоковольтного импульсного трансформатора с коэффициентом трансформации, равным 5. Таким образом, формируется импульс напряжения с амплитудой до 65 кВ, током 140 А и регулируемой длительностью 1–6 мкс. Представлены экспериментальные данные работы системы на импульсный с.в.ч.-магнетрон и эквивалент нагрузки.

DOI: 10.31857/S0032816221030174

### ВВЕДЕНИЕ

Импульсные магнетроны широко используются в качестве генераторов мощных с.в.ч.-импульсов в радиолокации, медицине и в ускорительной технике. Традиционный подход к формированию выходной последовательности высоковольтных питающих импульсов состоит в использовании коммутатора, который от входного постоянного напряжения обеспечивает заданные параметры выходного импульса (крутизну нарастания напряжения, его вершину и длительность). В качестве коммутаторов могут выступать как газоразрядные и вакуумные приборы, так и полупроводниковые транзисторы, а также тиристоры. При использовании газоразрядных коммутаторов и тиристоров характеристики выходного импульса определяются дополнительной формирующей линией.

Системы на основе полупроводниковых транзисторных коммутаторов позволяют исключить формирующую линию, а коррекцию импульса осуществить вспомогательными, относительно маломощными цепями. Помимо этого, такие системы обладают следующими положительными особенностями:

– возможностью контролировать и изменять в процессе работы большинство параметров выходного импульса — длительность, амплитуду, частоту, а при определенных условиях влиять на характер нарастания выходного тока и формировать его нелинейные временные зависимости,

тем самым влиять на спектр выходного с.в.ч.-импульса;

– обеспечивать повышенную частоту работы (сотни герц—единицы килогерц);

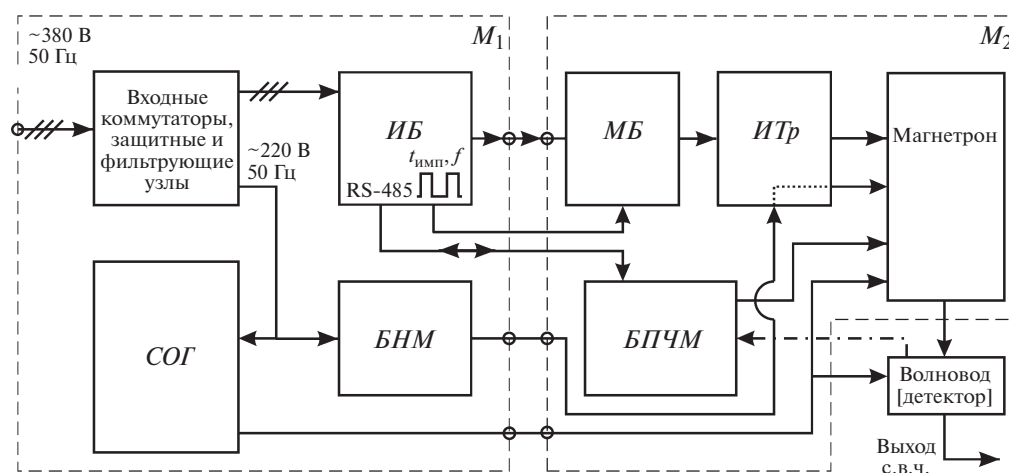
– повышенным временным ресурсом работы полупроводниковых приборов по сравнению с газоразрядными и вакуумными приборами;

– возможностью оптимизировать входную конденсаторную батарею, работая с разными уровнями напряжения на ней;

– возможностью относительно просто реализовать параллельную работу генераторов для обеспечения заданной выходной мощности.

Можно выделить три варианта построения таких генераторов в зависимости от места транзисторного коммутатора в общей структуре и от уровня коммутируемого им напряжения.

1. Коммутатор расположен на входе генератора и коммутирует относительно низкое напряжение (до 5–6 кВ, типично 500–1000 В). В этом случае выходное напряжение обеспечивается за счет импульсного высоковольтного трансформатора с большим коэффициентом трансформации, что ведет к повышенным требованиям к качеству его изготовления. Также это обстоятельство ведет к значительным уровням коммутируемого первичного тока, что может затруднить создание такого генератора на большие мощности из-за влияния коммутационных помех [1].



**Рис. 1.** Основные структурные компоненты генератора с.в.ч. *ИБ* – инверторный блок, *МБ* – модуляторный блок, *ИТр* – импульсный трансформатор, *СОГ* – система охлаждения и газонаполнения генератора, *БНМ* – блок накала магнетрона, *БПЧМ* – блок подстройки частоты магнетрона.

2. Коммутатор расположен в промежутке между выходным высоковольтным трансформатором и входным преобразователем, обеспечивающим повышение входного напряжения до уровня 10–30 кВ. В этом случае существенно снижаются требования к конструкции высоковольтного трансформатора и к ключам генератора с точки зрения их токовой нагрузки. Однако требуется реализация последовательной работы ключевых элементов транзисторного коммутатора, а также использование входного высоковольтного источника питания.

3. Коммутатор расположен на выходе генератора и коммутирует полное выходное напряжение. В этом случае появляется возможность исключить выходной трансформатор, но увеличивается количество элементов транзисторного коммутатора. При этом возрастают требования к изоляции цепей управления. Последнее обстоятельство ведет к увеличению времени распространения сигнала управления, что негативно сказывается на синхронности включения элементов транзисторного коммутатора. Также при отсутствии высоковольтного импульсного трансформатора необходимо решить задачу разработки высокопотенциальной цепи накала магнетрона.

Предлагаемый генератор мощных с.в.ч.-импульсов относится ко второму типу.

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ГЕНЕРАТОРА

Структурная схема приведена на рис. 1. Инверторный блок (*ИБ*) установлен в стойку  $M_1$ , а модуляторный блок (*МБ*) совместно с магнетроном в стойку  $M_2$ . В качестве магнетрона используется МИ-456, основные характеристики которого следующие: фиксированная частота 2851–2861 МГц,

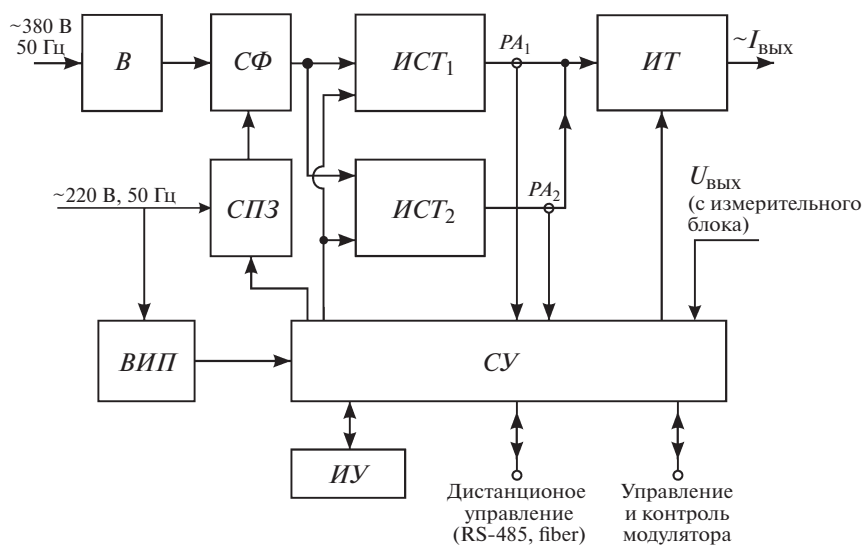
выходная импульсная мощность не менее 5 МВт, напряжение анода 5–65 кВ, импульсный ток анода не более 150 А, длительность импульса 3–6 мкс, скважность не менее 1000.

Импульсное электропитание магнетрона осуществляется модуляторным блоком *МБ* через высоковольтный импульсный трансформатор (*ИТр*). Амплитуда напряжения регулируется и стабилизируется инверторным блоком, который включает в себя импульсный двухканальный стабилизатор тока и нерегулируемый мостовой инвертор. Инверторный блок обеспечивает основной канал подвода энергии к магнетрону, формирует управление и диагностику генератора, определяет длительность и частоту выходных импульсов, а также обеспечивает управление вспомогательными блоками: блоком накала магнетрона (*БНМ*) и блоком подстройки частоты магнетрона (*БПЧМ*). Последний обеспечивает согласование с волноводной или резонаторной системой, используя сигнал с выходного детектора мощности в качестве сигнала обратной связи. Общее электропитание блоков осуществляется от сети переменного тока через входные коммутационные и фильтрующие цепи. Магнетронная система и преобразовательные блоки охлаждаются узлом *СОГ*, куда входят система водяного охлаждения магнетрона и система принудительного воздушного охлаждения электронных блоков.

## СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ГЕНЕРАТОРА

### *Инверторный блок*

Структурная схема инверторного блока представлена на рис. 2. Для питания используется трехфазная цепь переменного тока, состоящая из мостового выпрямителя (*В*) и выходного сглажи-



**Рис. 2.** Структурная схема инверторного блока. *B* – выпрямитель, *СФ* – сглаживающий фильтр, *ИСТ* – импульсный стабилизатор тока, *ИТ* – инвертор тока, *СПЗ* – схема предварительного заряда, *ВИП* – вспомогательный источник питания, *СУ* – система управления, *ИУ* – индикаторное устройство.

вающего фильтра (*СФ*). На выходе *СФ* формируется нестабилизированное постоянное напряжение с уровнем пульсации, обеспечивающим устойчивую работу стабилизатора тока. Для ограничения пусковых токов в момент включения используется вспомогательная схема предварительного заряда фильтрового конденсатора.

Питание системы управления (*СУ*) и других низковольтных вспомогательных систем осуществляется сетевым вспомогательным источником питания (*ВИП*). Напряжение с шины постоянного тока поступает на двухфазный импульсный стабилизатор тока (*ИСТ*<sub>1</sub>, *ИСТ*<sub>2</sub>), выполненный по схеме понижающего преобразователя постоянного напряжения с фиксированным фазовым сдвигом сигналов управления [3]. Суммарный ток с удвоенной частотой пульсации поступает на мостовой инвертор тока (*ИТ*), работающий синхронно с импульсными стабилизаторами тока на той же частоте. Переменный ток практически прямоугольной формы с выхода инвертора поступает на трансформаторы и далее на выпрямители ячеек модуляторного блока, заряжая выходную конденсаторную батарею и поддерживая на ней заданный средний уровень напряжения [2, 4].

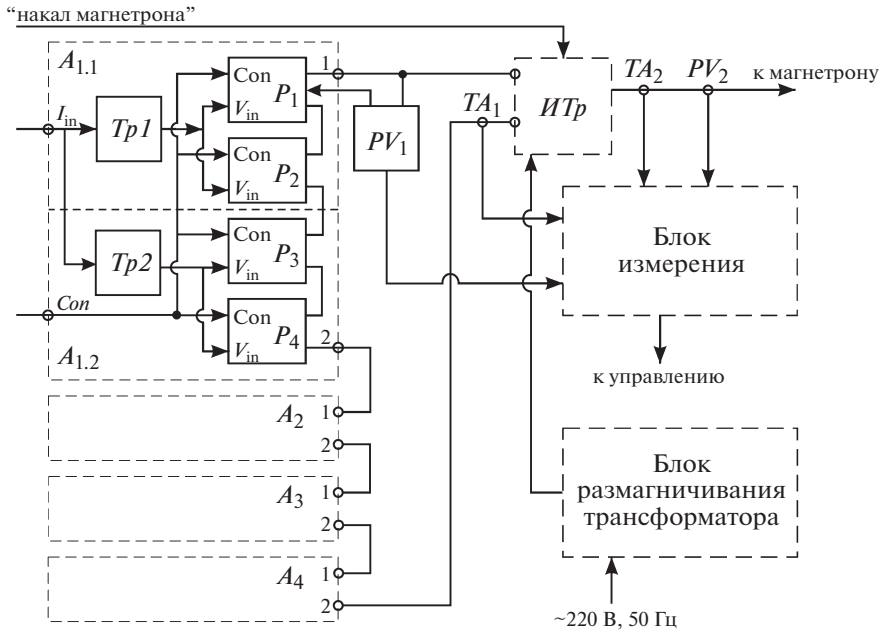
В процессе заряда, который составляет практически все время работы генератора, все ячейки модулятора отключены от нагрузки и друг от друга. На интервале формирования импульса происходит синхронное включение силовых транзисторных ключей. Конденсаторные батареи ячеек включаются последовательно, и суммарное напряжение прикладывается к первичной обмотке импульсного трансформатора. Управление организовано по подчиненному принципу. Внутрен-

ние переменные обратной связи по току берутся с датчиков тока стабилизатора (*РА*<sub>1</sub>, *РА*<sub>2</sub>, рис. 2), а внешняя переменная, обеспечивающая стабилизацию выходного напряжения на заданном уровне, поступает с блока измерения, расположенного в модуляторном блоке.

#### Модуляторный блок

Структурная схема модуляторного блока представлена на рис. 3. Основа модулятора – узел идентичных блоков ячеек (*P*<sub>1</sub>–*P*<sub>16</sub>), содержащих конденсаторную батарею, транзисторный модуль и систему формирования импульсов и защиты транзисторных ключей. Электропитание всех ячеек осуществляется переменным током частотой 20 кГц (*I*<sub>in</sub>) от вторичных обмоток силовых трансформаторов (*Тр*<sub>1</sub>, *Тр*<sub>2</sub>). Один трансформатор обеспечивает заряд конденсаторных батарей для двух ячеек.

Принципиальная схема узла *A*<sub>1,1</sub>(*A*<sub>1,2</sub>), содержащего две ячейки модулятора, приведена на рис. 4. В процессе формирования импульса все ячейки включаются последовательно, формируя импульс напряжения на первичной обмотке импульсного высоковольтного трансформатора (*ИТр*) с уровнем напряжения порядка 10–14 кВ в зависимости от рабочего выходного напряжения. Поскольку накал магнетрона находится под потенциалом, его электропитание осуществляется через вспомогательную обмотку *ИТр*. Для контроля и защиты модуляторного блока (рис. 3) в схему введены трансформаторы тока (*ТА*<sub>1</sub>, *ТА*<sub>2</sub>) и делители напряжения (*PV*<sub>1</sub>, *PV*<sub>2</sub>), сигналы с которых поступают на измерительный блок и обеспечивают за-



**Рис. 3.** Структурная схема модуляторного блока.  $Tp1, Tp2$  – повышающие трансформаторы, обеспечивающие заряд конденсаторных батарей ячеек модулятора  $P_1-P_{16}$ ;  $PV_1, PV_2$  – делители напряжения,  $TA_1, TA_2$  – трансформаторы тока.

щитные и регулировочные функции. На все ячейки модулятора поступает изолированный шлейф ( $Con$ ), обеспечивающий передачу вспомогательного питания ячеек, а также прохождение сигнала управления от основного управляющего устройства к ячейкам. Сигналы питания и управления передаются с помощью изолирующих трансформаторов.

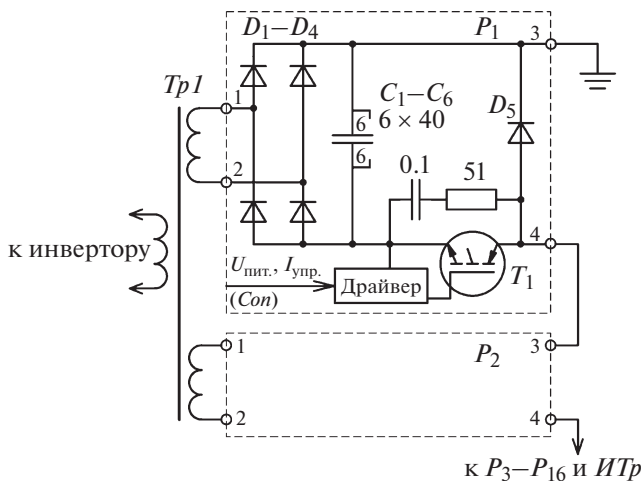
Для обеспечения работы импульсного трансформатора по полному циклу петли гистерезиса

используется вспомогательный блок размагничивания, представляющий собой сетевой стабилизатор тока, выход которого изолирован с помощью специального фильтрующего устройства.

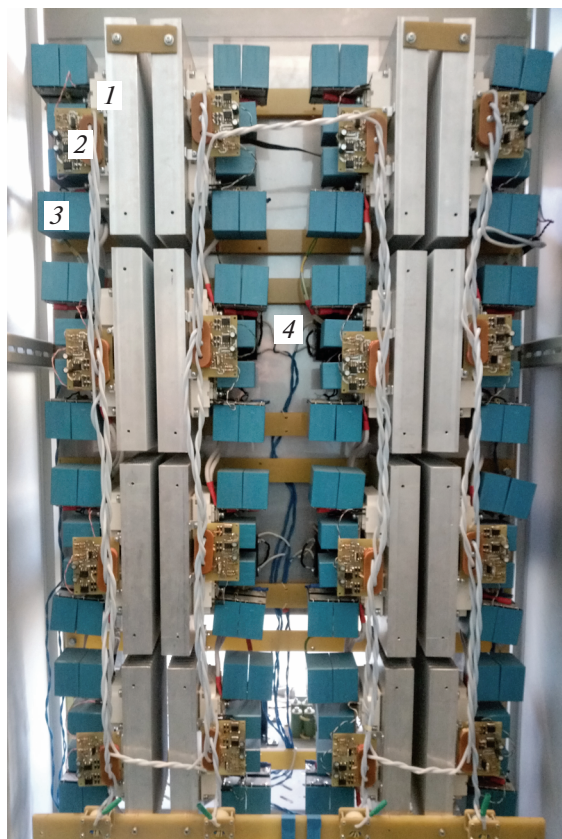
Для защиты транзисторных ключей в каждой ячейке модулятора предусмотрены пассивные защитные цепи, обеспечивающие защиту силовых ключей от перенапряжения. Также сигнал с трансформатора тока обеспечивает защиту в целом модулятора от перегрузки по току.

На рис. 5 показан внешний вид модуляторного блока. Конструктивно он состоит из 16 идентичных изолированных ячеек с естественным охлаждением. Транзисторные модули  $T_1, D_5$  ( $2 \times SCM400GB12T4$ ), конденсаторная батарея  $C_1-C_6$  ( $240 \mu\text{Ф}$ ), выпрямитель  $D_1-D_4$  и трансформаторы  $Tp1, Tp2$  зарядного преобразователя располагаются на радиаторе, формирователь импульса управления силовыми транзисторами представляет собой отдельную плату, на которой расположены трансформаторы питания и управления, а также микросхемы стабилизатора напряжения и драйвера управления силовыми транзисторами, работающими в ключевом режиме с напряжением на затворе, равным 15 В на интервале формирования импульса, и  $\sim 0$  В на интервале паузы.

Управление преобразователем реализовано 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  $PA_1, PA_2$  (рис. 2) и выходное

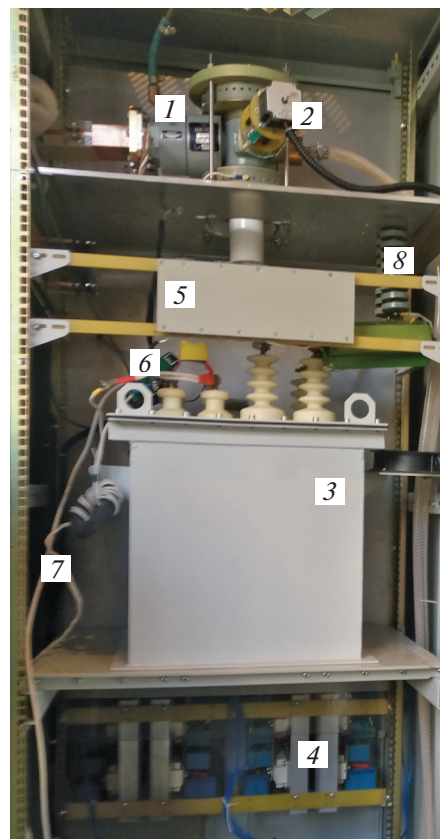


**Рис. 4.** Принципиальная схема узла модулятора  $A_{1,1}$  ( $A_{1,2}$ ).  $T_1 + D_5$  –  $SCM400GB12T4$  (один из двух модулей, работающих параллельно);  $D_1-D_4$  –  $VBE17-12NO7$ .



**Рис. 5.** Модуляторный блок. 1 – транзисторный модуль SCM400GB12T4, расположенный на радиаторе; 2 – плата драйвера управления; 3 – конденсаторная батарея 240 мкФ; 4 – высоковольтные трансформаторы питания ячеек.

напряжение с конденсаторной батареи низкопотенциальной ячейки. Блок подстройки частоты магнетрона выполнен на аналогичном процессоре и позволяет при необходимости реализовать автоматическую подстройку частоты магнетрона. Реализован алгоритм поиска максимума сигнала обратной связи, поступающего с детектора с.в.ч. Сигнал с детектора в виде короткого ( $\sim 300$  нс) импульса поступает на пиковый детектор. Значение напряжения пикового детектора оцифровывается аналого-цифровым преобразователем процессора, фильтруется, и полученная величина служит основой для алгоритма поиска экстремума. Осуществляется циклическое изменение частоты магнетрона с одновременным вычислением производной и соответствующей установкой направления вращения регулятора частоты. Регулировка частоты магнетрона осуществляется при помощи шагового двигателя. Все сигналы поступают с соответствующих датчиков, обеспечивающих их изоляцию, фильтрацию и согласование с аналого-цифровым преобразователем управляющего контроллера.



**Рис. 6.** Стойка генератора с.в.ч. 1 – магнетрон; 2 – шаговый двигатель системы автоподстройки частоты; 3 – высоковольтный импульсный трансформатор; 4 – модуляторный блок (расположен за экраном с обратной стороны стойки); 5 – измерительный делитель выходного напряжения; 6 – измерительный трансформатор тока; 7 – провода подвода накала магнетрона; 8 – компенсирующая выходная цепь.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

При испытаниях магнетрон был нагружен на согласованную, водоохлаждаемую нагрузку с сечением волновода  $72 \times 34$  мм, диапазоном рабочих частот  $2856 \pm 50$  МГц и импульсной рабочей мощностью до 5 МВт. Конструктивно система электропитания магнетрона размещена в двух стандартных стойках. В первой из них располагается инверторный блок, а также блоки накала, запуска и размагничивания трансформатора. Габариты стойки –  $1200 \times 600 \times 800$  мм. Во второй стойке располагаются магнетрон, высоковольтный импульсный трансформатор и модуляторный блок. Ее внешний вид с их расположением внутри показан на рис. 6. Габариты стойки –  $2000 \times 800 \times 800$  мм. Вывод с.в.ч.-энергии осуществляется через окно в боковой крышке с помощью волновода.

На рис. 7 приведена осциллограмма тока магнетрона. Время нарастания составляет  $\sim 0.65$  мкс, время спада  $\sim 0.3$  мкс, спад плоской вершины  $\sim 3\%$ .

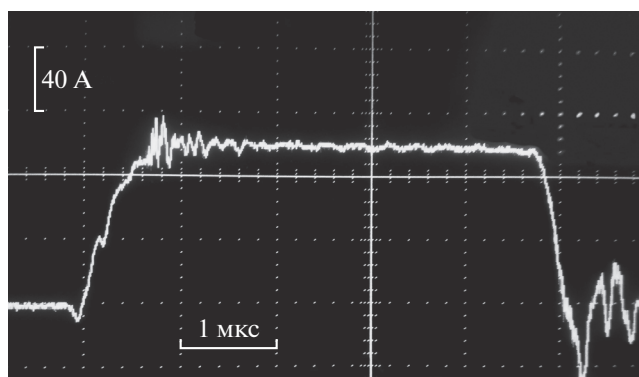


Рис. 7. Осциллограмма анодного тока магнетрона.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан импульсный магнетронный генератор мощных с.в.ч.-импульсов с частотой следования 100 Гц и максимальной мощностью 5 МВт. Магнетронная система и импульсный трансформатор ее питания работают при естественном охлаждении, а остальные блоки при принудительном воздушном охлаждении, что открывает пер-

спективу по достаточно простому с технической точки зрения уменьшению массы и габаритов генератора мощных с.в.ч.-последовательностей и созданию компактных и мобильных устройств.

Полученные результаты могут быть применены при создании мощных генераторов с.в.ч. на основе импульсных магнетронов и клистронов и использоваться в различных областях импульсной техники.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Визирь В.А., Иванов С.В., Ковальчук Б.М., Маньков В.И., Шубкин Н.Г., Червяков В.В., Юрьев В.В., Бутаков Л.Д., Толмачев В.И. // ПТЭ. 2004. № 4. С. 53.
2. Канаев Г.Г., Кухта В.Р., Лопатин В.В., Нашилевский А.В., Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Умура К. // ПТЭ. 2010. № 1. С. 105.
3. Варюхин А.Н., Гордин М.В., Захарченко В.С., Маланчев В.Е., Малашин М.В., Мошкунев С.И., Небогаткин С.В., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. // Изв. РАН. Энергетика. 2019. № 6. С. 121. <https://doi.org/10.1134/s0002331019060128>
4. Буркин Е.Ю., Кожемяк О.А. // ПТЭ. 2016. № 2. С. 91. <https://doi.org/10.7868/S003281621601033X>