

## МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЛЯТИВИСТСКОГО МАГНЕТРОНА

И.И. Винтизенко

Томский политехнический университет

E-mail: vintizenko@tpu.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований релятивистских магнетронных СВЧ-генераторов, направленные на увеличение эффективности и повышение стабильности генерируемых СВЧ-импульсов. Для этих целей существенной модификации подвергнуты основные элементы магнетрона: анодный блок, устройство вывода СВЧ-излучения, антенная система, катодный узел.

**Ключевые слова:**

Релятивистский магнетронный СВЧ-генератор, анодный блок, внешний канал связи.

**Key words:**

Relativistic microwave magnetron, anode block, external coupling channel.

**Введение**

Использование сильноточных электронных ускорителей для питания различных СВЧ-генераторов открыло новые перспективы перед этими приборами. Такие достоинства приборов со скрещенными полями, как частотная и фазовая стабильность генерируемого излучения, низкий уровень побочных колебаний и гармоник, высокий к.п.д., небольшие весогабаритные показатели и стоимость, стали основой для проведения интенсивных исследований релятивистских магнетронных генераторов (РМГ) [1]. Первые эксперименты позволили получить мощность от сотен мегаватт до нескольких гигаватт при к.п.д. 10...30 %. В отличие от генераторов О-типа в РМГ взаимодействие сильноточного релятивистского электронного пучка с высокочастотными полями происходит непосредственно в диоде, т. е. в области создания электронного пучка. В этом случае снимаются ограничения, связанные с обеспечением высокой энергии электронов при малом скоростном разбросе и с освоением больших токов. В настоящее время исследования развиваются по пути создания стабильных эффективных источников СВЧ, работающих в импульсно-периодическом режиме [2].

Колебательная система релятивистского магнетронного генератора, как и его классического аналога, является распределенной электродинамической структурой и отличается многомодовостью. В импульсном режиме вследствие нестационарности питающих полей и плазменных процессов в прикатодной области наблюдаются модовая и спектральная нестабильности СВЧ-излучения. Актуальным также является вывод из прибора мощности сверхвысокого уровня, транспортировка и пространственное формирование излучения. На решение указанных проблем были нацелены исследования, результаты которых представлены ниже.

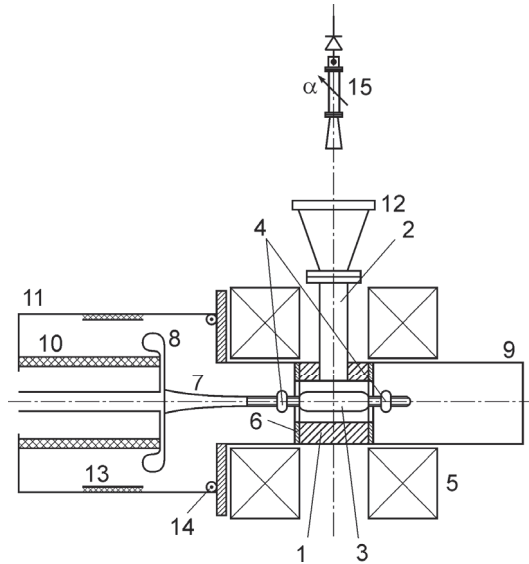
**Анодный блок релятивистских магнетронных генераторов**

Одним из путей увеличения эффективности релятивистских магнетронных СВЧ-генераторов яв-

ляется увеличение числа резонаторов. Возбуждение рабочего  $\pi$ -вида колебаний в приборах с увеличенным числом резонаторов происходит при больших синхронных магнитных полях; что и приводит к увеличению электронного к.п.д. прибора. Однако использование систем с увеличенным числом резонаторов резко усиливает конкуренцию видов колебаний. По результатам расчетов разделение видов колебаний  $\pi$  и ближайшего к нему  $2\pi/3$  по величине фазовой скорости для 6-резонаторного анодного блока составляет  $\beta_{\pi}/\beta_{2\pi/3} \approx 0,69$ , по отношению к его  $(-1)$  гармонике  $-\beta_{\pi}/\beta_{2\pi/3}^1 \approx 1,38$ . Разделение видов колебаний  $\pi$  и ближайшего к нему  $3\pi/4$  для 8-резонаторного анодного блока примерно на треть меньше  $\beta_{\pi}/\beta_{3\pi/4} \approx 0,76$  и  $\beta_{\pi}/\beta_{3\pi/4}^1 \approx 1,26$ . Из расчета также следует, что величина замедления рабочего вида колебаний у 8-резонаторного анодного блока в сравнении с 6-резонаторным примерно на 26 % больше, что позволяет прогнозировать более высокую эффективность его работы.

Анодный блок исследуемого РМГ имеет 8 резонаторов лопаточного типа; вывод мощности выполнен в виде одной или двух узких щелей в торцах двух противоположных резонаторов и плавных волноводных переходов к стандартному сечению  $72 \times 34$  мм. Размеры анодного блока составляли внутренний диаметр 43 мм, внешний диаметр 86 мм, длина анодного блока 72 мм. На катод магнетрона подается импульсное напряжение 300...400 кВ от линейного индукционного ускорителя (ЛИУ) 04/6 [3]; постоянное магнитное поле создается парой Гельмгольца и может изменяться в широких пределах 0,2...0,55 Т (рис. 1). Диаметр высоковольтного фланца ускорителя и расстояние до анодного блока изначально выбирались по результатам расчетов хода силовых линий магнитной системы так, чтобы линии, выходящие из пространства взаимодействия РМГ «замыкались» на поверхность высоковольтного фланца. Тем самым уменьшаются потери электронов из пространства взаимодействия. Для ограничения утечки тока с противоположной стороны анодного блока использована труба дрейфа 9 с внутренним диаметром

184 мм. Чем больше диаметр трубы дрейфа, тем меньше предельный ток транспортировки в ней. Однако внешний диаметр трубы ограничен внутренним диаметром магнитной системы. Чрезмерное увеличение диаметра приводит к неоправданному увеличению объема замагничивания и, соответственно, к росту энергозатрат на создание магнитного поля.



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 – анодный блок РМГ; 2 – волноводный вывод СВЧ-мощности; 3 – катод; 4 – концевые экраны; 5 – магнитная система; 6 – торцевые крышки анодного блока; 7 – катододержатель; 8 – высоковольтный фланец; 9 – труба дрейфа; 10 – изолятор ЛИУ; 11 – вакуумная камера ЛИУ; 12 – рупорная антенна с вакуумным окном; 13 – емкостной делитель напряжения; 14 – пояс Роговского; 15 – детектор СВЧ-сигнала с приемной антенной и аттенуатором

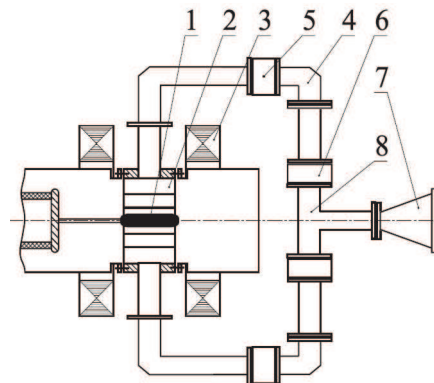
Результаты предварительных экспериментов показали, что 6-резонаторный РМГ с одним выводом мощности, имеющий равные с 8-резонаторным анодным блоком размеры, демонстрирует более высокую эффективность (~20 %) при максимальной выходной мощности 300 МВт (параметры импульса питания: катод-анодное напряжение 340 кВ, ток 4,3 кА). При том же питании РМГ с 8-резонаторным анодным блоком и одним выводом мощности имеет выходную мощность ~250 МВт. Измерения показали, что излучение 8-резонаторного РМГ характеризуется широким спектром (~150 МГц) и наличием двух максимумов, связанных с возбуждением двух видов колебаний, имеющих близкие частоты. Одновременное существование двух видов колебаний и конкуренция между ними приводят к снижению эффективности работы РМГ и расширению спектра колебаний.

Решение проблемы конкуренции видов колебаний и достижение более высокой эффективности оказывается возможным путем введения в резонансную систему внешних управляющих связей [4]. В релятивистском магнетроне внешняя связь может быть реализована путём объединения волноводных выводов мощности из различных резо-

наторов. В этом случае взаимодействие колебательных компонент резонансной системы с физической точки зрения аналогично процессам когерентного взаимодействия в системах взаимносинхронизированных автогенераторов и при соответствующем характере взаимной связи может усилить «внутренний» – электронный – механизм устойчивости и тем самым обеспечить более высокую стабильность рабочего вида колебаний и подавление конкурирующих видов.

#### Внешний канал связи РМГ

Схема модифицированного РМГ показана на рис. 2. Внешний канал связи – 4 подключается к двум противоположным резонаторам анодного блока. Вывод СВЧ-мощности осуществляется через волноводный Н-тройник – 8, нагруженный пирамидальной антенной – 7. Длина канала связи с помощью набора волноводных вставок – 5 могла изменяться в широких пределах.



**Рис. 2.** Релятивистский магнетрон с волноводным каналом связи. 1 – катод; 2 – анодный блок; 3 – магнитная система; 4 – канал связи; 5, 6 – волноводные вставки; 7 – антенна

Для магнетрона с числом резонаторов  $N$ , удовлетворяющих условию:  $N/2$  – четное число (8-резонаторный анодный блок), колебания противоположных резонаторов для  $\pi$ -вида по отношению к выходным волноводам противофазны. Для  $3\pi/4$ -вида колебания указанных резонаторов, наоборот, возбуждают выходные волноводы в фазе. Следовательно, сигналы с выходов магнетрона для  $\pi$ -вида суммируются в антисимметричной схеме, когда общая нагрузка (тройник) смещена относительно оси электрической симметрии канала на четверть длины волны, и вычитаются в симметричной (на рис. 2 изображена симметричная схема). Для  $3\pi/4$ -вида, наоборот, сигналы вычитаются в общей нагрузке антисимметричной схемы и суммируются в симметричной. Эти соображения позволяют в процессе эксперимента однозначно идентифицировать режим генерации магнетрона на указанных видах колебаний. Симметричная конфигурация канала связи реализуется при включении одинаковых вставок – 6 по обеим сторонам тройника – 8. Когда одна из вставок – 6 имеет длину на  $\lambda_g/2$  большую, чем противоположная ей, получаем

антисимметричную схему ( $\lambda_b$  – длина волны в волноводе). Следует заметить, что внешним каналом можно связать не только противоположные резонаторы, но и любые другие пары или их комбинации.

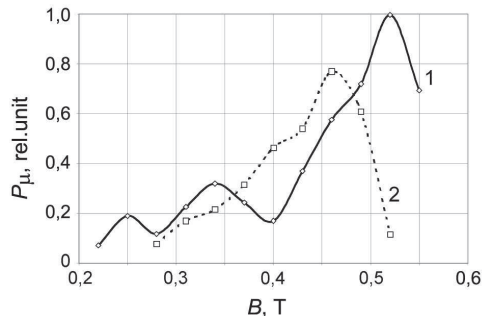


Рис. 3. Зависимость мощности 8-резонаторного РМГ от величины индукции магнитного поля с внешним каналом связи при антисимметричном включении (1) и симметричном включении (2) 3-дБ Н-тройника

Восьмирезонаторный РМГ исследовался как в симметричной, так и в антисимметричной схемах [5]. В процессе исследования с некоторым шагом изменялась длина канала связи резонаторов и на каждом шаге производились измерения уровня мощности и спектра излучения. Несмотря на трудоемкость, эти эксперименты являются необходимым этапом, так как позволяют определить длину каналов связи с оптимальным взаимодействием колебаний резонаторов, идентифицировать возбуждаемый вид, например, для настройки системы с распределенным выводом излучения.

Исследование антисимметричной схемы позволило найти такие значения длины канала, при которых генерация происходила только на  $\pi$ -виде с выходной мощностью до 500 МВт. При оптимальной длине канала связи достигаются наилучшие выходные характеристики РМГ. В этом случае полная длина канала связи (~1450 мм) пропорциональна  $(n\lambda_b + \lambda_b/2)$ , где  $\lambda_b = 13,6$  см – длина волны в волноводе,  $n \sim 10$ . Спектр колебаний в этой области одночастотный с полосой по уровню –3 дБ порядка 70 МГц. За пределами указанной области происходит расширение спектральной полосы излучения до 100 МГц и более, появляются дополнительные частотные максимумы, и снижается выходная мощность импульсов (до 340 МВт).

Сравнивая полученные результаты с результатами экспериментов с магнетроном с одним выводом мощности и с магнетроном с несвязанными между собой двумя выводами мощности, можно заключить, что введение дополнительного канала взаимодействия между резонаторами колебательной системы магнетрона оказывает существенное влияние на характеристики процесса генерации. Это влияние, очевидно, зависит от фазовых свойств канала связи. При оптимальной длине канала он оказывает стабилизирующее воздействие на процесс генерации.

Аналогичным образом исследовалась симметричная схема, и были определены длины канала

связи, при которых магнетрон работал только на  $3\pi/4$ -виде. На рис. 3 приведены зависимости выходной мощности от магнитного поля для симметричной и антисимметричной конфигураций канала связи резонаторов РМГ. В каждом из вариантов длина канала отдельно подбиралась с помощью вставок – 5 (рис. 2) по критерию максимального уровня выходной мощности и стабильности спектра излучения. Важно подчеркнуть, что внешний канал связи практически устраняет конкуренцию указанных видов, обеспечивая их раздельное существование в каждой из схем в широком интервале значений магнитного поля. Ширина спектров излучения для обоих видов на уровне –3 дБ не превышает 70 МГц в широком интервале значений магнитного поля. При оптимальной длине канала связи наблюдается также стабилизация уровня генерируемой в импульсах мощности.

Таким образом, введение связи между резонаторами магнетрона приводит к взаимодействию СВЧ-полей в резонаторах и взаимному выравниваю амплитуд и фаз высокочастотного поля в соответствующих резонаторах анодного блока. Это способствует стабилизации рабочего вида, для которого колебания, прошедшие канал связи, синфазны с колебаниями в резонаторах, и подавлению остальных видов.

#### Устройство вывода СВЧ-излучения

Распределенный вывод СВЧ-излучения РМГ позволяет формировать направленное излучение, снять ограничения на уровень выводимой мощности, обеспечить компактность излучающей системы. Такой вывод реализуется либо с помощью системы излучателей, либо с помощью щелевой решетки излучателей, введенной в волноводный канал связи резонаторов.

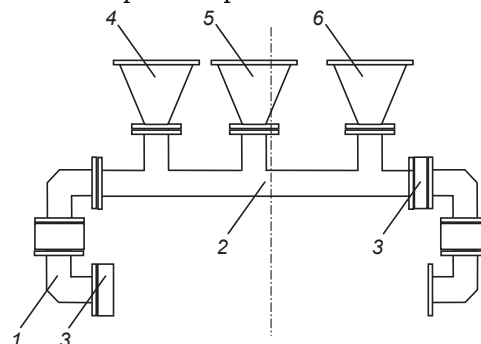


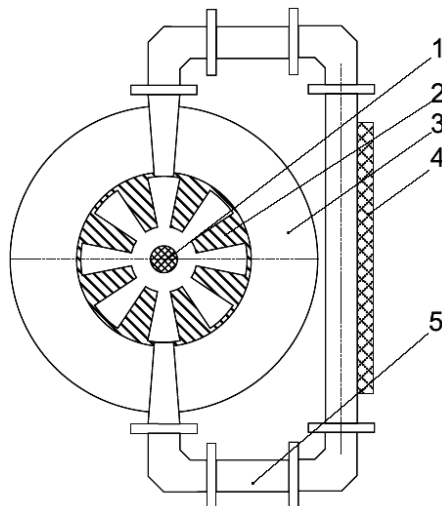
Рис. 4. Канал связи резонаторов магнетрона с тремя излучателями: 1 – волноводные Н-повороты; 2 – Н-тройник; 3 – волноводные вставки; 4, 5, 6 – антенны

Волноводный канал построен с использованием симметрично-несимметричных схем [6]. Конструкция канала связи 6-резонаторного РМГ для трех нагрузок приведена на рис. 4 [7]. Центральная нагрузка смещена относительно оси электрической симметрии канала связи на  $\lambda_b/4$ . Поскольку для рабочего  $\pi$ -вида колебания резонаторов на входах цепи синфазны, будет происходить их вычитание в нагрузке – 5. Если расположить бли-

жайшие нагрузки – 4, 6 на расстоянии  $\lambda_g/4$  от центральной, а остальные – на расстоянии кратном  $\lambda_g/2$  друг от друга, то реализуется «параллельное» соединение нагрузок левой и правой групп. Для равноамплитудного распределения колебаний по нагрузкам необходима одинаковость их проводимостей. Синфазное распределение реализуется, если расстояние между нагрузками в группах кратно  $\lambda_g$ , а одна из нагрузок дополнительно смещена относительно центральной на  $\lambda_g/2$ . Центральная нагрузка играет важную роль в селективности колебаний. Расчет резонансной системы модифицированного магнетрона показывает, что вносимые со стороны этой нагрузки в противофазных режимах потери значительно снижают нагруженную добротность, что обеспечивает быстрое затухание нерабочих видов колебаний.

В эксперименте длина канала связи выбрана исходя из результатов исследований с одним излучателем [4] и составляла  $\sim 17\lambda_g$  для рабочего  $\pi$ -вида колебаний. Из-за больших геометрических размеров антенн правая и левая нагрузки размещены друг от друга и расположены на расстоянии  $5\lambda_g/4$  и  $7\lambda_g/4$  относительно центральной.

При объединении выводов магнетрона каналом связи, уровень мощности и энергии с выхода центрального излучателя не превышает 25 МВт и 1,5 Дж, соответственно, что позволяет сделать заключение о существовании в системе  $\pi$ -вида, колебания которого в центральной нагрузке вычитаются. Результаты спектральных измерений с одного из боковых излучателей показывают, что ширина спектра импульса не превышает 70 МГц по уровню –3 дБ. Уровни мощности боковых излучателей отличаются не более чем на 10 % и составляют  $\sim 200$  МВт при энергии  $\sim 5$  Дж, что указывает на равноамплитудное распределение колебаний в нагрузках.



**Рис. 5.** Схема эксперимента с антенной решеткой. 1 – катод; 2 – анодный блок; 3 – магнитная система; 4 – антенная решетка; 5 – волноводные вставки

Стабильность фазового распределения колебаний на системе рупорных излучателей подтвер-

ждается специально проведенным экспериментом по измерению пространственного распределения СВЧ-излучения. Глубокие минимумы (–13 дБ) на диаграмме направленности указывают на присутствие в системе колебательного режима с устойчивым амплитудно-фазовым профилем. Таким образом, экспериментальные результаты показывают, что объединение резонаторов РМГ внешним каналом связи с общими нагрузками-излучателями позволяет реализовать распределенный вывод мощности с заданным амплитудно-фазовым профилем колебаний.

Канал связи резонаторов в виде волноводно-щелевой решетки был исследован для формирования направленного излучения. Для проведения экспериментов была изготовлена линейная волноводно-щелевая решетка с четырьмя переменными щелями [8]. Схема эксперимента показана на рис. 5. Продольные щели прорезаются в широкой стенке волновода на расстоянии  $\lambda_g/2$  попеременно по разные стороны относительно средней линии волновода. Синфазное возбуждение щелей, расположенных на расстоянии  $\lambda_g/2$ , обеспечивается противоположными по направлению поперечными токами, что эквивалентно дополнительному сдвигу по фазе на  $180^\circ$ . Такая система щелей при их синфазном возбуждении фокусирует излучение в плоскости, проходящей через продольную ось волновода, и в направлении, нормальном широкой стенке волновода. Щели закрыты диэлектрическим окном из органического стекла с вакуумным уплотнением.

В экспериментах на ускорителе волноводно-щелевая решетка устанавливалась между двумя выводами релятивистского магнетрона. Диаграмма направленности излучения решетки измерялась двумя детекторами, один из которых перемещался в вертикальной плоскости, а другой находился в направлении нормали к апертуре решетки и регистрировал опорный уровень сигнала. Сравнение измеренной диаграммы с расчетной однозначно доказывает существование  $\pi$ -вида колебаний. Стабильность рабочего вида подтверждается также результатами спектральных измерений, ширина спектра на уровне –3 дБ  $\sim 70$  МГц, что существенно уже спектра РМГ с несвязанными резонаторами.

Таким образом, введение внешней связи между резонаторами релятивистского магнетрона создает дополнительный и эффективный инструмент воздействия на колебательные процессы в релятивистском магнетроне. При соответствующей (оптимальной) настройке канала сильное внешнее взаимодействие выделенных колебательных подсистем – резонаторов обеспечивает более глубокую стабилизацию первичных процессов в генераторе, связанных с формированием электронного потока в поле электромагнитных колебаний. Благодаря внешней связи реализуется достаточно сильный селективный механизм удержания заданных фазовых соотношений в системе, следствием чего яв-

ляется повышение модовой и спектральной стабильности излучения. В результате удается обеспечить работу магнетрона на сложную нагрузку в виде интегрированной в канал связи системы излучателей и реализовать эффективный отбор мощности и пространственное формирование излучения. Определенное при «холодных» измерениях значение ослабления СВЧ-сигнала между решеткой и детектором позволило оценить уровень генерируемой РМГ СВЧ-мощности, составивший ~260 МВт.

#### Катодный узел РМГ

Для классических магнетронов известен способ увеличения их эффективности, заключающийся в использовании экранов, устанавливаемых на краях катодов вне пространства взаимодействия. Концевые экраны имеют наружный диаметр, который превышает диаметр катода, а иногда превышает и диаметр анода, что препятствует утечке электронов из пространства взаимодействия под действием сил пространственного заряда.

Для релятивистских магнетронов концевые экраны не применялись из-за опасения образования взрывной электронной эмиссии на выступающих относительно поверхности катода поверхностях. Образование плазмы и ее дрейф в продольном магнитном поле с характерной для взрывной электронной эмиссии скоростью порядка  $10^7$  см/с могут привести к замыканию плазмой промежутка концевой экран–торец анодного блока и закорачиванию источника питания. Следует добавить, что катоды РМГ связаны с источником питания только с одной стороны (рис. 1) в отличие от классических магнетронов, имеющих, как правило, симметричное питание катода. Поэтому в РМГ кроме потерь за счет сил пространственного заряда имеется дополнительный фактор потерь тока из пространства взаимодействия под действием азимутального магнитного поля, возникающего из-за протекающего по катоду тока.

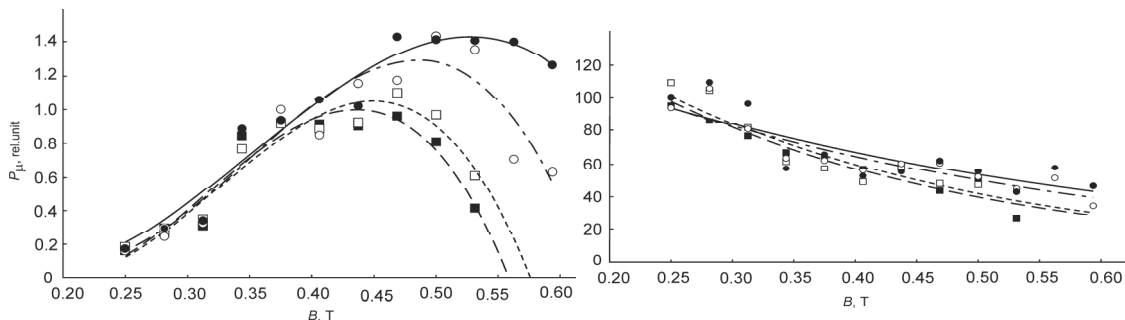
Концевые экраны [9] были изготовлены из дюралюминия в виде шайб с внешним диаметром 24 мм, толщиной 10 мм и радиусом скругления цилиндрической поверхности 5 мм. Экраны могли перемещаться относительно краев катода, для это-

го на поверхности катододержателя была выполнена резьба, а со стороны трубы дрейфа катододержатель выступал за пределы анодного блока на 70 мм.

В экспериментах сравнивались выходные импульсы РМГ при использовании катода без концевых экранов, с одним экраном со стороны высоковольтного фланца, с одним экраном со стороны трубы дрейфа и с двумя экранами. Расстояние между концевыми экранами диаметром 24 мм и катодом составляло по 12 мм с каждой стороны (до торцевых крышек анодного блока – по 7 мм).

На рис. 6 представлены зависимости мощности и длительности СВЧ-импульсов от величины индукции магнитного поля, снятые при равном зарядном напряжении первичного источника питания ЛИУ. Как видно из рис. 6, а, к заметному увеличению мощности СВЧ-импульса приводит экран, установленный со стороны трубы дрейфа. Это позволяет заключить, что основные утечки тока из пространства взаимодействия РМГ происходят в трубу дрейфа. Напомню, что выше уже сообщалось о принятых мерах по уменьшению потерь на поверхность высоковольтного фланца. Приведенные зависимости показывают, что в случае применения концевых экранов катода расширяется область синхронных магнитных полей, при которых регистрируется максимальный уровень СВЧ. Анализ осциллограмм показал, что при использовании экранов наблюдается увеличение выходного напряжения ЛИУ в сравнении с катодом без экранов за счет уменьшения потерь тока. В свою очередь это требует увеличения синхронного магнитного поля и сопровождается заметным увеличением мощности. На рис. 6, б также показаны зависимости длительности импульсов СВЧ от величины индукции магнитного поля. Обращает внимание примерное равенство длительности СВЧ-импульсов при наличии и отсутствии экранов на катоде, несмотря на существенное отличие в уровнях мощности выходных импульсов.

Таким образом, в результате исследований релятивистского магнетронного генератора с катодными концевыми экранами установлено, что применение экранов увеличивает мощность излучения на 40...50 % при сохранении длительности импуль-



**Рис. 6.** Зависимости мощности (слева) и длительности (справа) СВЧ-импульса РМГ от величины индукции магнитного поля (■ — катод без экранов; □ — катод с экраном со стороны высоковольтного фланца; ○ — катод с экраном со стороны трубы дрейфа; ● — катод с двумя экранами)

са СВЧ; большее влияние оказывает экран, расположенный со стороны трубы дрейфа; увеличение параметров импульса питания приводит к пропорциональному росту мощности СВЧ-импульсов.

#### Заключение

Основные результаты работы по модификации элементов РМГ сводятся к следующему. Применение внешнего канала связи допускает использование РМГ с увеличенным числом резонаторов анодного блока, обладающих более высокой эффективностью. В этом случае можно обеспечить стабилизацию, распределенный вывод мощности и формирование направленного СВЧ-излучения. Разработан и испытан вывод излучения релятивистского

магнетрона через систему излучателей и волноводно-щелевую решетку. Получено пространственное распределение излучения с устойчивой диаграммой направленности, подтверждающее высокую стабильность амплитудно-фазовых соотношений в магнетронном генераторе. Применение концевых экранов существенно увеличивает выходные характеристики РМГ.

В результате исследований создан эффективный и высокостабильный источник мощного СВЧ-излучения (500 МВт), работающий в импульсно-периодическом режиме с частотой следования до 200 Гц.

*Исследования выполнены в рамках контракта по гос. заданию «Наука».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bekefi G., Orzechovski T. Giant microwave bursts emitted from a field emission relativistic electron beam magnetron // Phys. Rev. Lett. – 1976. – V. 37. – № 6. – P. 379–382.
2. Винтизенко И.И., Новиков С.С. Релятивистские магнетронные СВЧ-генераторы. – Томск: Изд-во НТЛ, 2009. – 432 с.
3. Винтизенко И.И. Линейные индукционные ускорители для релятивистских СВЧ-приборов. – М.: Изд-во Физматлит, 2012. – 407 с.
4. Винтизенко И.И., Гусельников В.И., Заревич А.И., Новиков С.С. Влияние внешней связи резонаторов релятивистского магнетрона на стабильность колебаний // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29. – Вып. 7. – С. 64–70.
5. Винтизенко И.И., Заревич А.И., Новиков С.С. Спектральные характеристики релятивистского магнетрона со связанными резонаторами // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32. – Вып. 23. – С. 40–47.
6. Новиков С.С., Усюкевич А.А. Синхронные режимы системы автогенераторов, связанных через канал большой длины // Изв. ВУЗов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 9/2. – С. 241–243.
7. Винтизенко И.И., Новиков С.С., Заревич А.И. Релятивистский магнетрон с распределенным выводом СВЧ излучения // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – Вып. 9. – С. 63–68.
8. Винтизенко И.И., Новиков С.С. Релятивистский магнетрон с каналом связи резонаторов в виде волноводно-щелевой решетки // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – Вып. 23. – С. 88–95.
9. Винтизенко И.И., Мащенко А.И., Митюшкина В.Ю. Катод с концевыми экранами для релятивистского магнетрона // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – Вып. 21. – С. 56–62.