

09;12

## Релятивистские магнетронные СВЧ генераторы с внешней связью резонаторов

© И.И. Винтизенко,<sup>1</sup> С.С. Новиков<sup>2</sup><sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики Томского политехнического университета, 634050 Томск, Россия

e-mail: vintizenko@tpu.ru

<sup>2</sup> Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 22 марта 2010 г.)

Обсуждаются результаты экспериментальных исследований колебательных процессов в импульсных релятивистских магнетронных сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторах с внешней связью резонаторов. Основной целью экспериментов являлось: изучение влияния параметров канала связи резонаторов на энергетические и спектральные характеристики СВЧ излучения; анализ возможностей стабилизации режимов генерации магнетрона и распределенного вывода мощности из резонансной системы.

### Введение

Релятивистские магнетронные генераторы (РМГ), как и их классические аналоги, относятся к приборам резонансного типа с кратковременным взаимодействием электронного потока с электромагнитным полем. Резонансная система магнетрона является распределенной электродинамической структурой и отличается многомодовостью. Модовая нестабильность особенно сильно проявляется при возмущениях электрических режимов прибора, при работе на несогласованные нагрузки и т. п. Еще одним существенным фактором нестабильности РМГ является нестационарность взрывоэмиссионного плазменного слоя в прикатодной области. Радиальное расширение катодной плазмы нарушает условие синхронизма и вызывает значительный дрейф частоты в течение импульса генерации.

Для разделения видов колебаний по частотам и стабилизации основного рабочего вида колебаний в классических магнетронах используются методы, основанные на введении в резонансные системы генераторов дополнительных элементов в виде связок или высокодобротных резонаторов. Для релятивистских короткоимпульсных приборов эти приемы не являются эффективными. Так, аноды РМГ обычно имеют большую длину, и высокочастотные поля, изменяющиеся вдоль оси прибора по гиперболическому закону, быстро ослабевают. В результате влияние связок, располагаемых на торцах анодного блока, ослабляется. Применение высокодобротных резонаторов в импульсном режиме ограничено их инерционностью. Дополнительный резонатор, кроме того, делает частотный спектр резонансной системы более насыщенным. Так как питающее напряжение в импульсном режиме изменяется в широких пределах, то условия возбуждения могут выполняться для разных видов колебаний [1]. Наконец, высокий уровень генерируемой мощности может привести к пробоям в связках и в узлах соединений с дополнительными резонаторами.

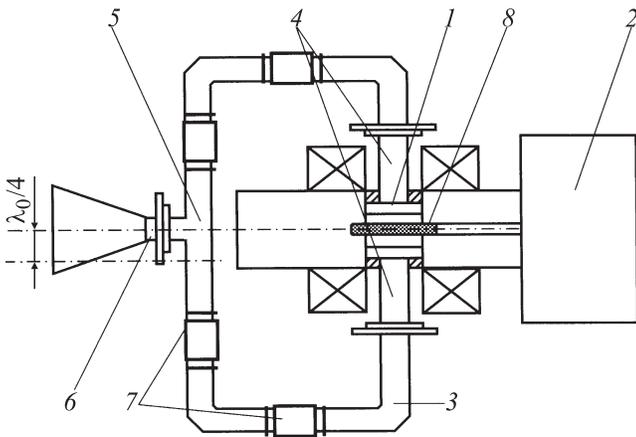
Эффективное решение проблемы стабилизации может дать введение в резонансную схему магнетрона таких связей, которые обеспечивали бы прямое воздействие на устойчивость автоколебаний с заданной фазировкой. Многорезонаторный РМГ вследствие локального характера энергетического обмена между электронным потоком и электромагнитным полем резонаторов оказывается весьма „удобным“ для такой модификации. Действительно, так как со стороны резонаторов система регенерирована и для конкретного вида колебаний обладает выраженными резонансными свойствами, ее можно рассматривать как совокупность локальных генерирующих элементов — подсистем, взаимосвязанных через электронный поток. Введение между подсистемами внешней связи дает формальное основание при решении проблемы стабильности воспользоваться моделью взаимосвязанных синхронизированных автогенераторов [2,3]. В рамках этой модели, используя феноменологическое описание магнетронной структуры, удастся проанализировать влияние параметров внешней связи подсистем на показатели устойчивости, являющиеся характеристиками локальных движений возмущения когерентной системы [4].

Теоретические оценки указывают на то, что при сильной благоприятной связи можно ожидать значительного усиления внутреннего (электронного) механизма удержания амплитудно-фазовых соотношений, характерных для рабочего режима, и подавления — для конкурирующих режимов. Кроме того, включение в канал связи резонаторов общей нагрузки или системы нагрузок-излучателей позволяет весьма просто реализовать распределенный вывод энергии колебаний из резонансной полости РМГ. Это дает возможность одновременно решать еще одну важную техническую проблему, связанную с эффективным отбором колебательной мощности, транспортировкой и пространственным формированием сверхмощного сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения.

В настоящей статье обсуждаются результаты экспериментальных исследований колебательных процессов в РМГ с внешней связью резонаторов. Основной целью экспериментов являлось: изучение влияния параметров канала связи резонаторов на энергетические и спектральные характеристики СВЧ излучения; анализ возможностей стабилизации режимов генерации магнетрона и распределенного вывода мощности из резонансной системы. Исследовались цилиндрические РМГ прямой геометрии с 6- и 8-резонаторными анодными блоками, имеющие выходы мощности из противоположных резонаторов с различными вариантами волноводного канала связи резонаторов.

## 1. Свойства РМГ с внешней связью резонаторов

Модифицированная схема релятивистского магнетрона [5,6] представлена на рис. 1. Электрическое поле между анодным блоком 1 и катодом 8 создавалось линейным индукционным ускорителем ЛИУ 04/6 [7] со следующими параметрами: напряжение 300–400 кВ, ток 3–4 кА и длительность импульса напряжения 180 нс. Противоположные резонаторы анодного блока 1 имеют два волноводных вывода мощности 4 и соединены волноводным каналом 3 через тройник 5. К выходному плечу тройника подключена излучающая антенна 6, являющаяся для резонаторов общей нагрузкой. Если длина канала связи с помощью вставок 7 подобрана так, что сигналы на его входе и выходе синфазны с колебаниями резонаторов, то следует ожидать стабилизации данного вида колебаний и подавления других видов. Наличие канала связи за счет симметрирования полей в пространстве взаимодействия должно также приводить к улучшению механизма энергообмена электронов с СВЧ полем. Наконец, введение в канал свя-



**Рис. 1.** Схема РМГ с внешней связью резонаторов: 1 — анодный блок, 2 — линейный индукционный ускоритель, 3 — канал связи, 4 — волноводные выходы мощности, 5 — тройник, 6 — антенна, 7 — волноводные вставки, 8 — катод.

зи общей нагрузки-излучателя позволяет суммировать в ней колебания резонаторов и тем самым обеспечить более эффективный вывод энергии при одновременном повышении стабильности работы РМГ.

В зависимости от вида колебаний, числа резонаторов магнетрона, а также от электрической симметрии канала связи просматривается серия разнообразных конструктивных вариантов. Так, для магнетрона, работающего на  $\pi$ -виде, с числом резонаторов, удовлетворяющих условию  $N/2$  — нечетное число (например, 6-резонаторный анодный блок), колебания противоположных резонаторов при отсчете по азимуту противофазны, а по отношению к выходным волноводам — синфазны. Длина канала связи в этом случае должна быть близка к  $q\lambda_0$  (здесь  $q$  — положительное целое число,  $\lambda_0$  — рабочая длина волны в волноводе). Если при этом тройниковое разветвление является синфазным (волноводный  $H$ -тройник), а канал — симметричным, то значения мощности СВЧ колебаний, излучаемой резонаторами на  $\pi$ -виде, будут суммироваться в общей нагрузке-излучателе. В случае возбуждения противофазных колебаний ( $2\pi/3$ -вид) мощности будут вычитаться. При использовании противофазного тройникового соединения ( $E$ -тройник) для вывода мощности  $\pi$ -вида плоскость включения тройника должна быть смещена относительно оси симметрии на  $\lambda_0/4$ .

Для магнетрона с числом резонаторов  $N/2$  — четное число (8-резонаторный анодный блок) колебания противоположных резонаторов  $\pi$ -вида при отсчете по азимуту синфазны, а по отношению к выходным волноводам — противофазны. Длина канала связи здесь должна быть близка к  $(2q - 1)\lambda_0/2$ . Для вывода мощности канал связи должен быть антисимметричным, что при синфазном тройнике реализуется путем его смещения на  $\lambda_0/4$ . В случае возбуждения синфазных колебаний ( $3\pi/4$ -вид) мощности вычитаются.

Канал связи может содержать систему нагрузок-излучателей. В этом случае, чтобы одновременно обеспечить стабилизацию рабочего вида колебаний и заданную пространственную фазировку, необходимо задать вполне определенный порядок размещения излучателей вдоль канала. При выводе СВЧ энергии через щелевые излучатели, в зависимости от расположения щелей на широкой или узкой стенке волновода, также возникают варианты конфигураций канала связи. Наконец, внешним каналом можно связать не только противоположные резонаторы, но и любые другие пары или их комбинации.

Выводы мощности из анодного блока РМГ выполнены в виде узких щелей в торцах двух противоположных резонаторов и плавных волноводных переходов к стандартному сечению  $72 \times 34$  мм. Магнетроны с 6 и 8 резонаторами имеют следующие одинаковые размеры анодного блока: внутренний диаметр — 43 мм, внешний диаметр — 86 мм, длина анодного блока 72 мм. Рабочим видом колебаний магнетронов является  $\pi$ -вид; волноводные выходы мощности возбуждаются при этом

в фазе для 6-резонаторного анодного блока и в противофазе — для 8-резонаторного. Канал внешней связи резонаторов магнетрона выполнен из отрезков стандартного прямоугольного волновода и, в соответствии с рис. 1, включает волноводные  $H$ -повороты, 3 дВ-волноводный  $H$ -тройник, отрезки волноводов, набор вставок. К выходу  $H$ -тройника подключалась пирамидальная антенна, обеспечивающая вывод СВЧ колебаний из системы, и оборудование для измерения параметров СВЧ излучения. Набор вставок позволял изменять полную длину канала связи дискретно с шагом 10 мм, что составляет примерно  $\lambda_0/15$ . Использовались также симметрирующие вставки, имеющие одинаковую длину  $\sim 0.25\lambda_0$ . В том случае, когда они располагались с обеих сторон  $H$ -тройника, реализовывалась симметричная конфигурация канала связи; при этом тройник находился на оси электрической симметрии волноводного канала. Когда обе симметрирующие вставки включались в одном плече канала, и тройник смещался относительно оси электрической симметрии канала связи на  $0.25\lambda_0$ , реализовывалась антисимметричная схема.

## 2. Шестирезонаторный РМГ с несвязанными резонаторами

Характеристики магнетрона без внешней связи резонаторов являются опорными и позволяют выявить в последующих экспериментах признаки влияния внешней связи. В этом случае выводы мощности двух противоположных резонаторов подключаются к отдельным рупорным антеннам через измерительный тракт. На предварительном этапе для выбора энергетически оптимального режима магнетрона проведены измерения параметров СВЧ излучения при изменении индукции магнитного поля в диапазоне 0.34–0.54 Т. Максимум мощности СВЧ излучения из каждого вывода приходится на интервал магнитного поля 0.48–0.52 Т и составляет в среднем 180 МВт при энергии в импульсе (из каждого вывода)  $\sim 7.5$  Дж; КПД магнетрона при оптимальном магнитном поле достигает  $\sim 20\%$ . Работа магнетрона характеризуется значительным разбросом амплитуд (до  $\pm 20\%$ ) и формы импульсов. Это отчетливо видно при регистрации непрерывной серии 500 импульсов (рис. 2).

Спектральные характеристики магнетрона измерены при индукции магнитного поля 0.5 Т в четырех временных сечениях импульса: на переднем фронте ( $\Delta t \approx 5$ –20 нс), в точке максимальной мощности ( $\Delta t \approx 20$ –35 нс), и в двух точках на заднем фронте импульса ( $\Delta t \approx 40$ –55 нс и  $\approx 60$ –75 нс). Представленные на рис. 3 спектры получены при использовании узкополосного перестраиваемого фильтра по методике, описанной в работе [8]. Как видно, спектр излучения претерпевает в течение импульса значительные изменения. В точке максимальной мощности (рис. 3, *b*) он напоминает спектр на переднем фронте (рис. 3, *a*) и

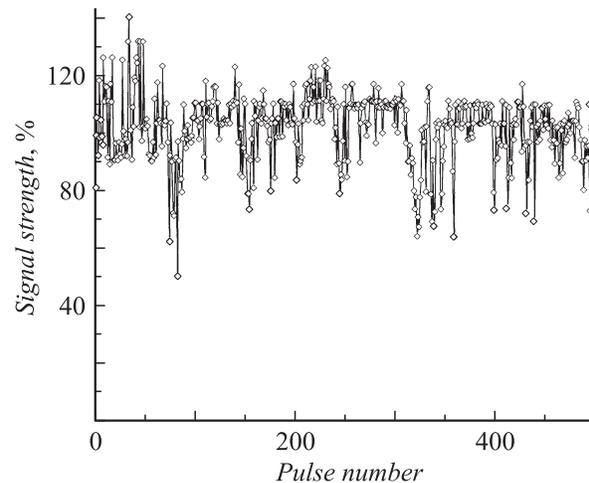


Рис. 2. Динамика амплитуды импульсов СВЧ излучения РМГ с несвязанными выводами в непрерывной серии импульсов.

характеризуется отсутствием четко выраженных частотных составляющих; ширина спектров по уровню  $-3$  дВ достигает 80–100 МГц с центром в районе 2780 МГц. Формирование спектра происходит только во второй половине импульса: при  $\Delta t \approx 40$ –50 нс (рис. 3, *c*) в нем можно выделить три достаточно хорошо выраженных максимума, отстоящих друг от друга примерно на 70 МГц. Частота центрального максимума, превосходящего остальные два на 5 дБ, составляет 2740 МГц; его ширина около 40 МГц. Этим спектральным составляющим соответствуют различные виды колебаний магнетрона. Малая амплитуда СВЧ сигнала на этом временном участке, а также отмеченная нестабильность амплитуды и формы импульсов, по-видимому, обусловлены конкуренцией видов колебаний. В конечной стадии импульса, при  $\Delta t \approx 60$ –75 нс (рис. 3, *d*), в спектре практически утрачиваются регулярные составляющие и значительно усиливается зашумленность. В экспериментах фиксируется смещение частоты в течение импульса. Девиация частоты объясняется развитием катодной плазмы, приводящей к изменению резонансных свойств колебательной системы магнетрона, а также к изменению напряженности электрического поля между катодом и анодом.

## 3. Шестирезонаторный РМГ с симметричным и антисимметричным каналами связи

РМГ с 6-резонаторным анодным блоком с симметричной конфигурацией канала связи был исследован наиболее подробно. При возбуждении колебаний  $\lambda$ -вида канал связи возбуждается в фазе и мощности резонаторов суммируются в общем плече  $H$ -тройника. В предварительном эксперименте [8] длина канала  $L$

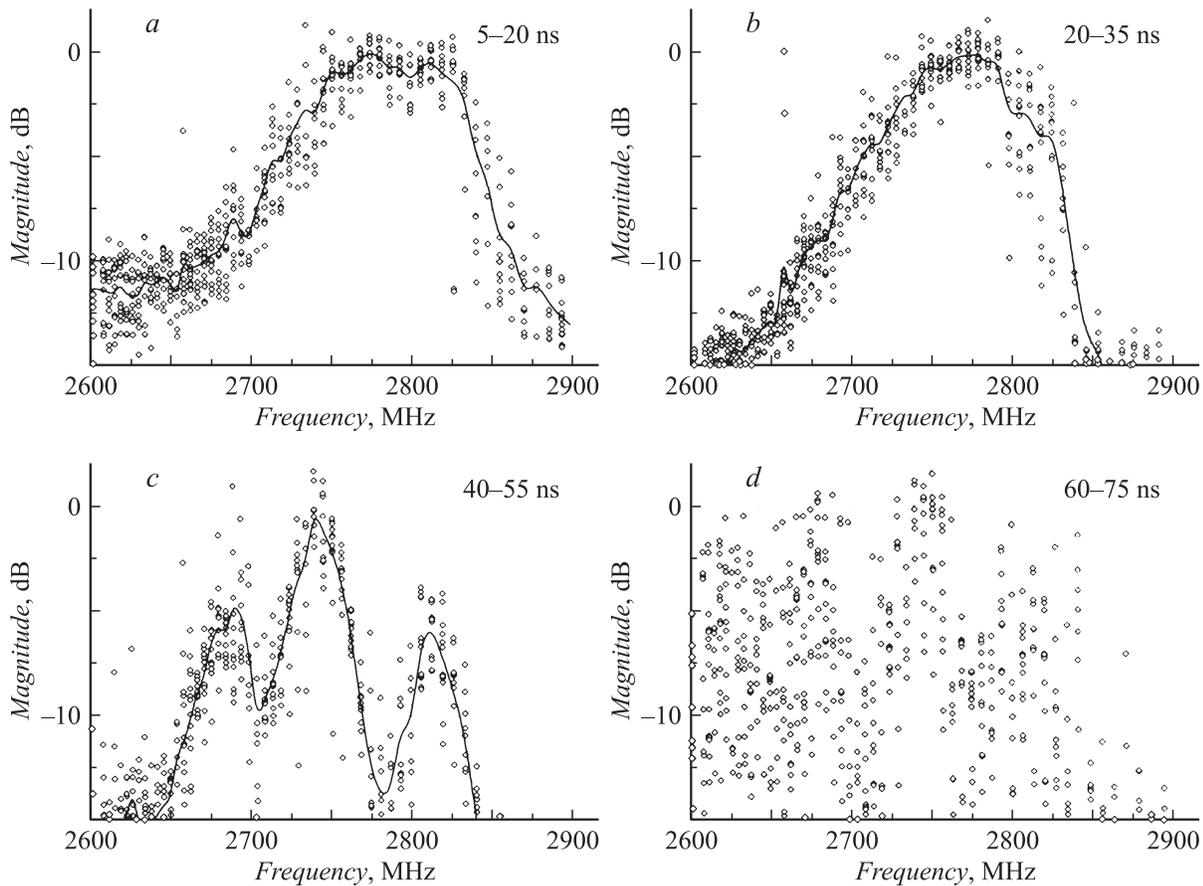


Рис. 3. Спектры излучения РМГ с несвязанными резонаторами в различных временных сечениях импульса.

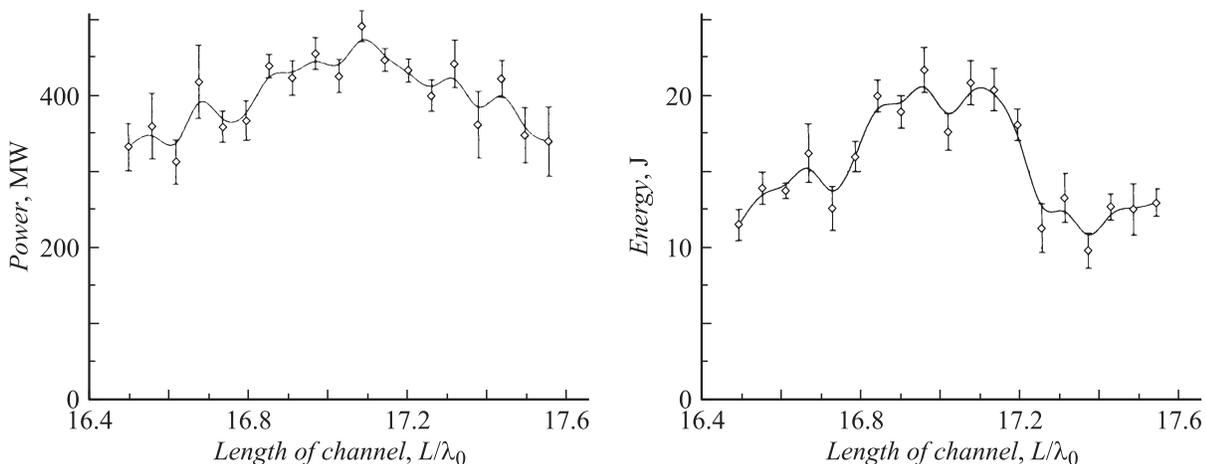
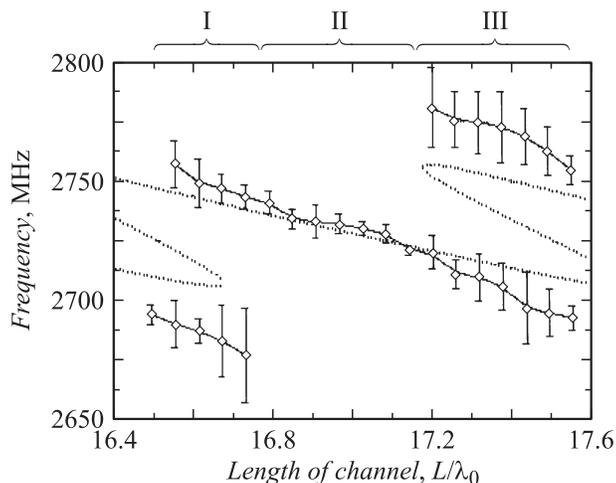


Рис. 4. Изменение мощности (а) и энергии (б) СВЧ излучения РМГ в зависимости от длины канала связи.

дискретно, с шагом  $25 \text{ mm}$ , увеличивалась на  $2.5\lambda_0$ . На каждом шаге выполнялись измерения спектральных и энергетических параметров излучения. Было обнаружено циклическое изменение измеряемых параметров. После этого более подробные измерения были проведены в области  $16.5\text{--}17.7\lambda_0$ . При этом длина канала изменялась с меньшим шагом ( $10 \text{ mm}$ ) и на каждом шаге выполнялась полная процедура измерений.

Спектральные исследования, как и в случае магнетрона с несвязанными выводами, проведены при индукции магнитного поля  $0.5 \text{ T}$ .

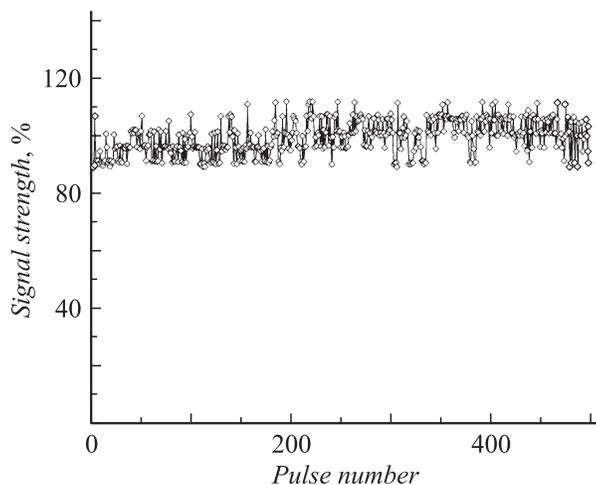
Мощность импульсов СВЧ излучения магнетрона в общей нагрузке изменялась от  $300$  до  $475 \text{ MW}$  (рис. 4, а), а средняя энергия — от  $11$  до  $20 \text{ J}$  (рис. 4, б). Спектральные измерения позволили определить как смещение положения частотного максимума (рис. 5), так



**Рис. 5.** Изменение положения частотного максимума в зависимости от длины канала связи.

и изменение ширины спектра излучения. Было обнаружено, что на определенных участках исследуемого интервала длины канала связи в спектре появляется второй частотный максимум.

По результатам измерений можно условно выделить три области настройки длины канала — они отмечены на рис. 5. В области II ( $16.8-17.2\lambda_0$ ) настройка близка к оптимальной. РМГ работает здесь с высокой эффективностью: уровень мощности достигает  $400-450\text{ MW}$ , а энергия в импульсе —  $20\text{ J}$  (вместо  $180\text{ MW}$  и  $7.5\text{ J}$  из каждого вывода магнетона с несвязанными выводами). Спектр колебаний в этой области является одночастотным и отличается наиболее узкой полосой: по уровню  $-3\text{ dB}$  — порядка  $30-40\text{ MHz}$ . За пределами указанной области (в областях I и III) происходит резкое расширение полосы излучения до  $150\text{ MHz}$  (по



**Рис. 6.** Динамика амплитуды импульсов СВЧ излучения РМГ со связанными резонаторами в области оптимальной настройки в непрерывной серии импульсов.

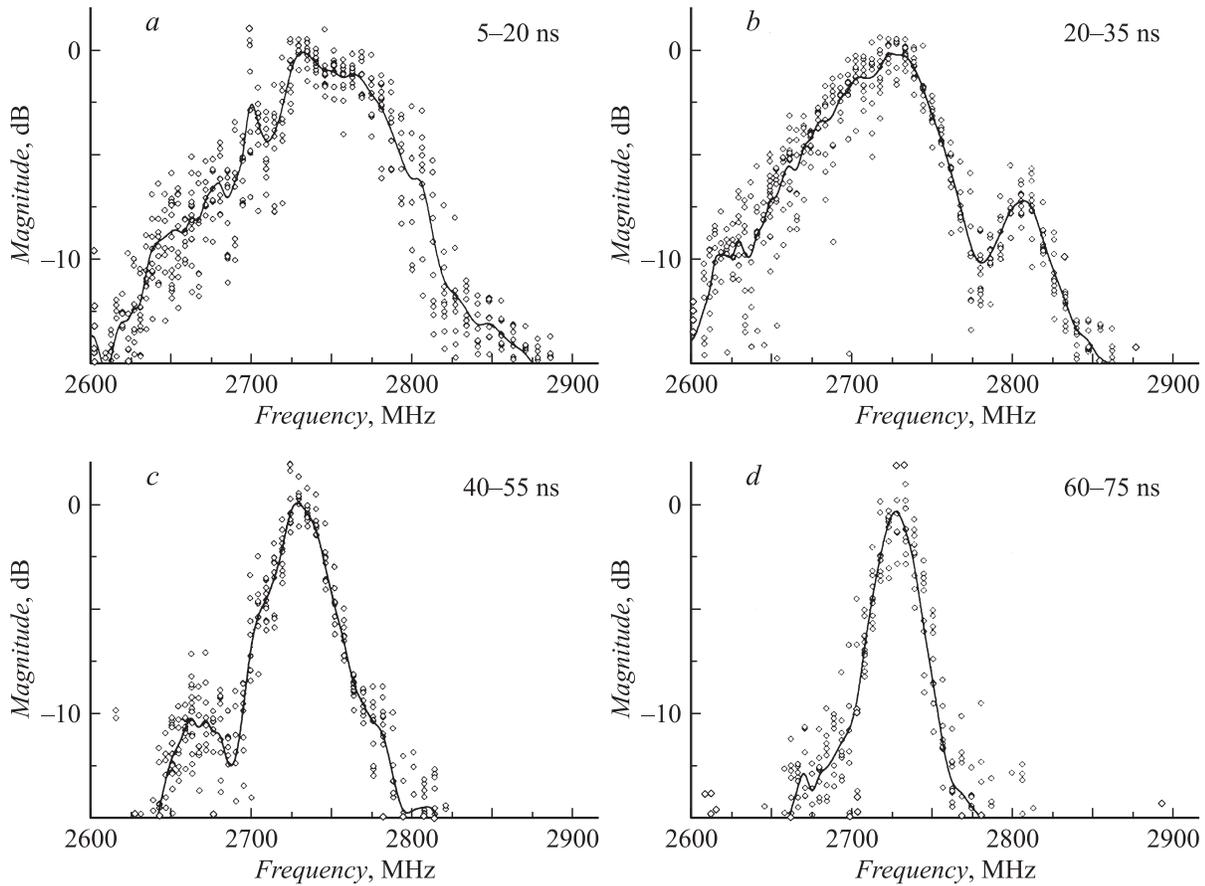
уровню  $-3\text{ dB}$ ), появляются дополнительные частотные максимумы и снижаются энергетические характеристики импульсов: до  $350\text{ MW}$  и  $11\text{ J}$  (см. рис. 4). Характерно, что центры областей располагаются на расстоянии примерно  $85\text{ mm}$  друг от друга, что составляет  $0.5$  длины волны в волноводе. Процесс генерации отличается более высоким постоянством формы импульсного сигнала и мощности излучения от импульса к импульсу. Нестабильность амплитуды в непрерывной серии из  $500$  импульсов (рис. 6) не превышает  $\pm 5\%$ , что значительно меньше, чем в случае магнетрона с несвязанными выводами (см. рис. 2).

Спектральные характеристики излучения магнетрона измерены для индукции магнитного поля  $0.5\text{ T}$  также в четырех временных сечениях импульса. Спектр на переднем фронте импульса (рис. 7, *a*) напоминает аналогичный спектр магнетрона с несвязанными выводами (рис. 3, *a*), однако его ширина по уровню  $-3\text{ dB}$  несколько меньше — порядка  $65\text{ MHz}$ . В спектре четко выделяется максимум, частота которого близка к  $2730\text{ MHz}$ . Спектр импульса в точке максимальной мощности (рис. 7, *b*) уже заметно отличается. К середине пологого участка импульса в районе  $\Delta t \approx 40-55\text{ ns}$  (рис. 7, *c*) спектр, сохраняя свое положение, становится более узкополосным. Ширина спектра по уровню  $-3\text{ dB}$  составляет  $25-30\text{ MHz}$ . Форма спектра излучения и положение максимума остаются неизменными вплоть до самого конца импульса (рис. 7, *d*). Наличие на краях спектра неоднородностей на уровне  $-10\text{ dB}$  и ниже обусловлено биениями, возникающими при отстройке полосового фильтра.

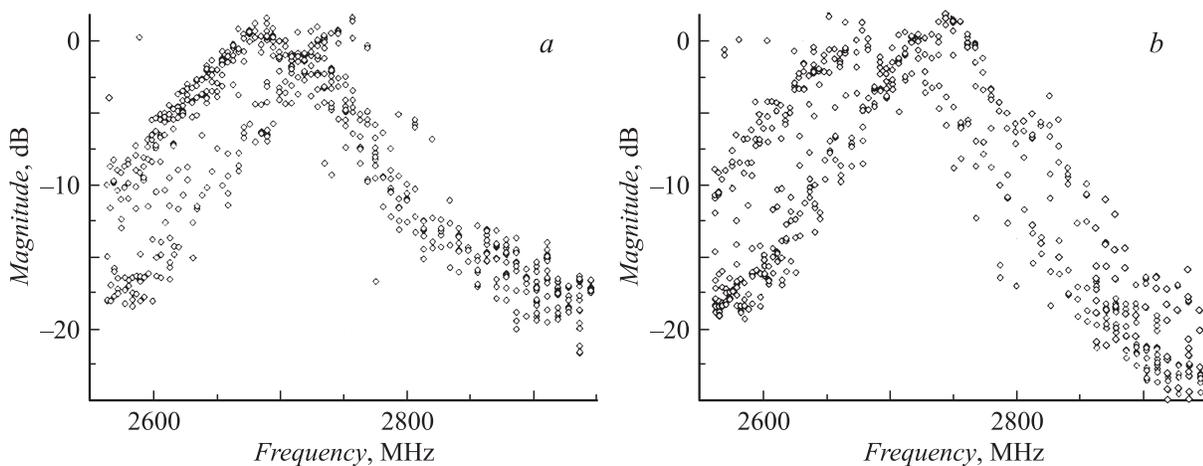
Работа магнетрона в области длин канала связи I и III (неоптимальные настройки) характеризуется низкими энергетическими характеристиками. Максимальные уровни мощности и энергии здесь ниже и не превышают  $340\text{ MW}$  и  $13\text{ J}$ , их длительность по уровню  $-3$  и  $-10\text{ dB}$  уменьшилась и составляет  $\sim 30$  и  $\sim 65\text{ ns}$  соответственно. Стабильность импульсов ниже: средний разброс мощности в непрерывной серии достигает  $\pm 30\%$ .

Наибольшие изменения претерпели спектральные характеристики излучения. На рис. 8 приведены спектры, измеренные на каналах длиной  $L = 16.6\lambda_0$  (рис. 8, *a*) и  $16.7\lambda_0$  (рис. 8, *b*). На диаграммах четко видны два спектральных максимума. Ширина каждого из них  $\sim 60\text{ MHz}$ , расстояние между ними порядка  $70\text{ MHz}$ . Анализ спектра показал, что „раздвоение“ спектра начинает происходить только к середине импульса после максимума мощности. Далее разделение спектра усиливается и ближе к концу импульса становится наиболее контрастным. Характерно, что разница частот между спектральными максимумами остается постоянной на всем протяжении импульса, т. е.  $\sim 70\text{ MHz}$ .

Значения частоты максимумов, в отличие от случая с несвязанными выводами, практически неизменны. Это подчеркивает воздействие канала связи на процесс генерации, приводящее к сильному затягиванию частоты СВЧ колебаний магнетрона. Вместе с тем импульсы из



**Рис. 7.** Спектры излучения РМГ со связанными резонаторами при оптимальной настройке в различных временных сечениях импульса, указанных на рис. *a–d*.



**Рис. 8.** Спектры излучения РМГ в области неоптимальной длины канала связи  $L$ : *a* —  $16.6\lambda_0$ , *b* —  $16.7\lambda_0$ .

непрерывной серии, формирующие часть спектра с одним максимумом, имеют заметное отличие по форме от импульсов, формирующих спектр с другим максимумом. Другими словами, от импульса к импульсу происходит случайное возбуждение магнетрона на одной из частот, а наблюдаемое „раздвоение“ спектра в действительности

является результатом наложения двух спектрограмм, каждая из которых имеет один максимум. Таким образом, в магнетронном генераторе при указанных настройках имеет место частотная неустойчивость: основной  $\pi$ -вид колебаний расщепляется на два конкурирующих подтипа.

Возникновение подтипов основного вида колебаний, а также затягивание частоты излучения объясняется рассогласованием общей нагрузки [9]. На экспериментальной диаграмме рис. 5 пунктиром показана рассчитанная по эквивалентной схеме магнетрона зависимость частоты  $\pi$ -вида колебаний для случая недогруженного канала связи. (Рассогласование общей нагрузки соответствует коэффициенту стоячей волны  $K_{SW} = 2$ , что близко к характеристике реального волноводного тройника. Несовпадение частот подтипов можно объяснить упрощенным видом расчетной модели магнетрона).

В антисимметричной схеме при работе 6-резонаторного РМГ на  $\pi$ -виде колебания его резонаторов вычитаются в общем плече Н-тройника, а в случае возбуждения  $2\pi/3$ -вида — суммируются. Экспериментальное исследование данной схемы проведено для тех же режимов питания РМГ и для значений длины канала, близких к оптимальным (область II на рис. 5). Выходная мощность СВЧ импульсов не превышает 20 MW, а их энергия — 1 J, что значительно ниже мощности и энергии импульсов магнетрона с симметричным каналом связи. Поведение спектральных характеристик здесь аналогично их поведению для магнетрона с симметричным каналом связи. Таким образом, низкий уровень мощности является следствием глубокого вычитания колебаний резонаторов в нагрузке-излучателе. Это однозначно указывает на существование и единственность в системе рабочего  $\pi$ -вида колебаний.

Расчеты, выполненные при проектировании анодного блока магнетрона, показали, что при заданной напряженности электрического поля условия возбуждения  $\pi$ -вида колебаний выполняются в области магнитных полей 0.3–0.53 T. За пределами этой области условия возбуждения выполняются для колебаний других видов: вида  $2\pi/3$  (0.25–0.3 T) и его –1-й гармоники (0.53–0.56 T). На границе интервалов модовой стабильности (0.3 и 0.53 T) можно ожидать возбуждения колебаний обоих видов. Действительно, при проведении измерений энергетических характеристик магнетрона в области магнитных полей, близких к 0.53 T, периодически регистрировались уровни мощности, на порядок и более превосходящие уровень 20 MW. Эти уровни были соотнесены с колебаниями вида  $2\pi/3$ , что позволило сформулировать идею очередного эксперимента [3].

В ходе эксперимента при значении индукции магнитного поля 0.53 T при каждой длине канала связи, во всем диапазоне ее изменения выполнялось 50 выстрелов установки. Для каждого импульса определялась мощность излучения и рассчитывалось относительное число реализаций каждого вида колебаний.

На рис. 9 показано изменение относительного числа реализаций видов колебаний  $\pi$  и  $2\pi/3$  ( $N_\pi$  и  $N_{2\pi/3}$  соответственно) в сериях из  $N_\Sigma = 50$  импульсов в зависимости от длины канала. Было обнаружено, что в области значений длины канала связи 16.8–17.2 $\lambda_0$ , вероятность возбуждения колебаний  $\pi$ -вида достигает 87%, а вероятность возбуждения  $2\pi/3$ -вида колебаний — 13%.

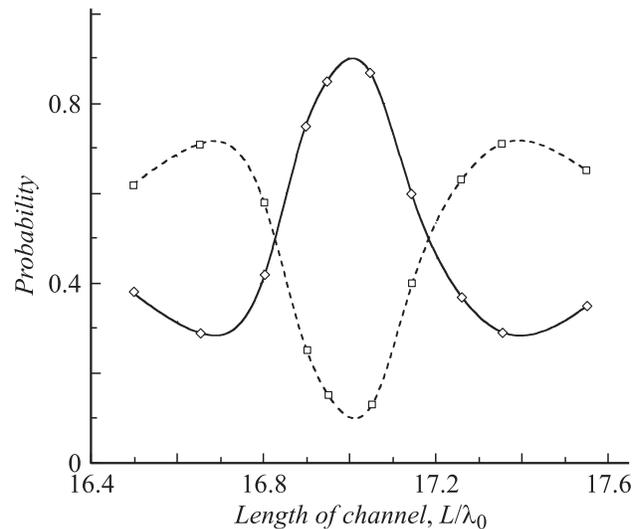


Рис. 9. Зависимости относительного числа реализаций видов колебаний  $\pi$  (— $\diamond$ —) и  $2\pi/3$  (— $\square$ —) от длины канала связи  $L$ .

За пределами данной области вероятность возбуждения колебаний  $\pi$ -вида резко снижается, так что при длине канала связи 16.7 $\lambda_0$  и 17.3 $\lambda_0$ , которые принадлежат области неоптимального взаимодействия (области I и III на рис. 5), уже преобладают колебания вида  $2\pi/3$ : вероятность их возбуждения достигает 70%.

Последние результаты наглядно показывают, что изменение электрической длины канала связи позволяет получить как „усиление“, так и „ослабление“ конкурирующих видов колебаний. При неоптимальной связи взаимодействие колебаний резонаторов приводит к подавлению основного —  $\pi$ -вида колебаний магнетрона. Это, в частности, способствует расширению зоны генерации вида колебаний  $2\pi/3$  в сторону меньших магнитных полей. Таким образом, внешнее взаимодействие оказывает достаточно сильное селективное действие на существование колебаний различных видов, что находится в соответствии с прогнозами, полученными теоретическим путем.

#### 4. Восьмирезонаторный РМГ со связанными резонаторами

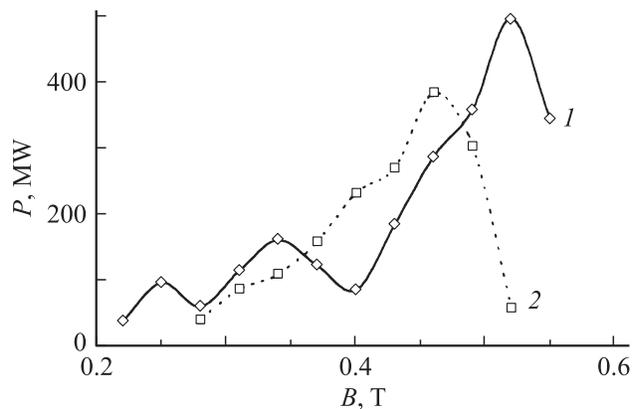
Релятивистский магнетрон с восьмирезонаторным анодным блоком может обеспечить более высокую эффективность работы. Возбуждение рабочего  $\pi$ -вида колебаний в этом магнетроне происходит при больших синхронных магнитных полях; при этом радиус циклотронного вращения электронов уменьшается, что и должно приводить к увеличению электронного КПД прибора. Однако использование систем с увеличенным числом резонаторов усиливает конкуренцию видов колебаний. По результатам расчетов разделение видов колебаний по величине фазовой скорости для 6-резонаторного анодного блока составляет  $\beta_\pi/\beta_{2\pi/3} \approx 0.69$ , по отноше-

нию к его  $-1$ -й гармонике —  $\beta_{\pi}/\beta_{2\pi/3}^{(-1)} \approx 1.38$ , тогда как разделение видов колебаний для 8-резонаторного анодного блока примерно на треть меньше и составляет  $\beta_{\pi}/\beta_{3\pi/4} \approx 0.76$  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. Анодный блок магнетрона имеет, как уже отмечалось, одинаковые с 6-резонаторным прибором геометрические размеры (радиусы катода и анода, внутренний радиус резонаторов). Это обеспечивало одинаковую нагрузку источника питания, что позволяло корректно провести сравнение результатов экспериментов.

Результаты предварительных экспериментов показали, что 6-резонаторный РМГ с одним выводом мощности демонстрирует более высокую эффективность ( $\sim 20\%$ ) при максимальной выходной мощности 300 MW (параметры импульса питания: катод-анодное напряжение 340 kV, ток 4.3 kA). При том же питании РМГ с 8-резонаторным анодным блоком и одним выводом мощности имеет выходную мощность  $\sim 250$  MW. Измерения показали, что излучение 8-резонаторного РМГ характеризуется широким спектром ( $\sim 150$  MHz) и наличием двух максимумов, связанных с возбуждением двух видов колебаний, имеющих близкие значения частоты. На переднем фронте импульса большую амплитуду имеет вид колебаний с меньшей длиной волны (более высокочастотный); затем в течение импульса амплитуды сигналов, соответствующих двум видам колебаний выравниваются, и к концу импульса большую амплитуду приобретает уже вид колебаний с большей длиной волны. Было сделано предположение, что на фронте превалирует  $\pi$ -вид колебаний, а к концу импульса —  $3\pi/4$ -вид. Одновременное существование двух видов колебаний и конкуренция между ними приводят к снижению эффективности работы РМГ и расширению спектра колебаний.

При исследовании модифицированного 8-резонаторного РМГ по схеме рис. 1 ставилась прямая задача: используя симметричную и антисимметричную схемы соединения противоположных резонаторов, вывести из прибора стабильное излучение того или другого конкурирующего вида. В каждом из вариантов длина волнового канала связи отдельно подбиралась с помощью вставок по критерию максимального уровня выходной мощности и стабильности спектра излучения. Несмотря на трудоемкость данная процедура является необходимым этапом настройки, так как позволяет определить оптимально длину канала, а также идентифицировать возбуждаемый вид. (В данных экспериментах длина канала связи составляла порядка  $13\lambda_0$ ).

Основные результаты исследования представлены на рис. 10 [10]. Кривая 1, очевидно, соответствует  $\pi$ -виду с противофазными колебаниями резонаторов, а кривая 2 —  $3\pi/4$ -виду с синфазными колебаниями резонаторов (частота колебаний близка к 3000 MHz, их разнос



**Рис. 10.** Зависимости мощности 8-резонаторного РМГ с внешним каналом связи при антисимметричном (1) и симметричном (2) включениях Н-тройника от величины индукции магнитного поля.

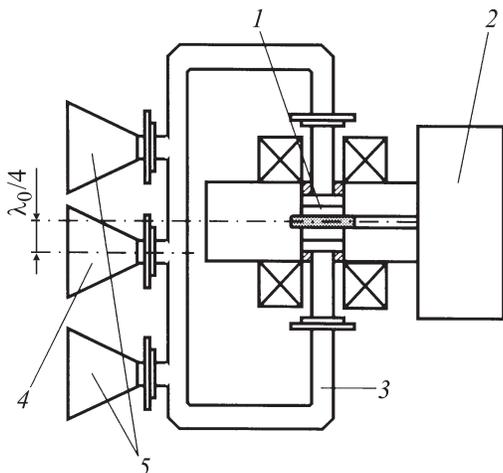
составляет порядка 30 MHz). Важно подчеркнуть, что внешний канал связи устраняет конкуренцию указанных видов, обеспечивая их раздельное существование в каждой из схем в широком интервале значений магнитного поля. Ширина спектров излучения для обоих видов на уровне  $-3$  dB не превышает 60 MHz. Следует отметить, что возбуждение  $\pi$ -вида (кривая 1) достигается при больших значениях магнитного поля, поскольку этот вид обладает наибольшим замедлением.

Весьма показательным является следующий опыт. Переход от симметричного к антисимметричному варианту, и наоборот, в настроенных схемах при оптимальных магнитных полях не изменяет вид генерируемых колебаний, а приводит к их глубокому вычитанию в общей нагрузке. Фактически магнетрон работает в этих схемах без нагрузки.

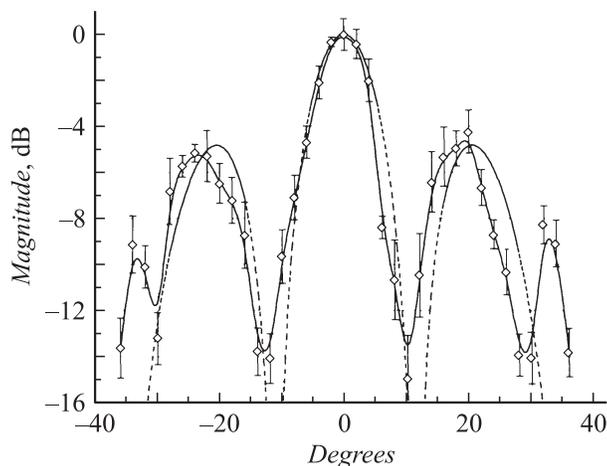
При оптимальной длине канала связи наблюдается также стабилизация уровня генерируемой в импульсах мощности. В отличие от приборов с одним выводом 8-резонаторный РМГ с объединенными выводами отдает в нагрузку мощность на 12% выше, чем подобный ему 6-резонаторный РМГ.

## 5. РМГ с распределенным выводом излучения из канала связи резонаторов

Для распределенного вывода СВЧ излучения в канал внешней связи резонаторов РМГ вводится система излучателей (нагрузок). Схема источника на основе 6-резонаторного магнетрона представлена на рис. 11 [11–13]. Длина канала связи резонаторов выбрана исходя из результатов исследования системы с одним излучателем. Она составляла  $17\lambda_0$  для рабочего  $\pi$ -вида колебаний и соответствовала оптимальной настройке канала. Центральный излучатель (антенна) 4 смещен относительно



**Рис. 11.** Схема модифицированного РМГ: 1 — релятивистский магнетрон, 2 — источник питания, 3 — канал связи, 4 — центральная антенна, 5 — боковые антенны.



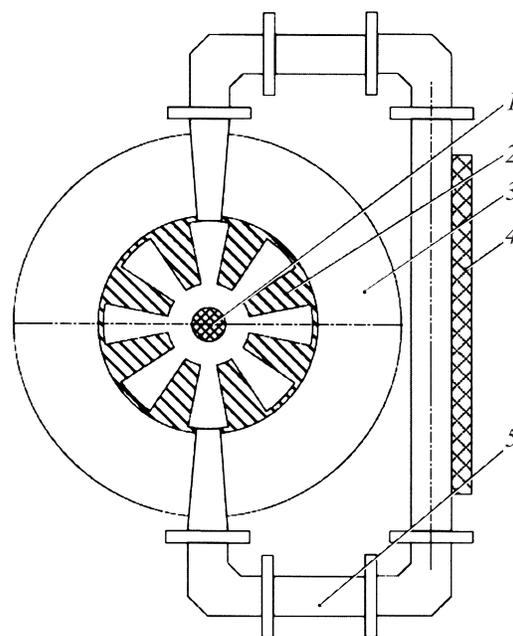
**Рис. 12.** Диаграмма пространственного распределения излучения.

оси электрической симметрии канала связи на  $\lambda_0/4$ ; левый и правый боковые излучатели 5 расположены на расстоянии  $5\lambda_0/4$  и  $9\lambda_0/4$  относительно центрального излучателя. Режим возбуждения канала для  $\pi$ -вида колебаний является синфазным. По отношению к центральному излучателю схема является антисимметричной, так что в рабочем режиме колебания резонаторов в этом излучателе вычитаются. Из-за геометрических размеров антенн боковые излучатели разнесены друг от друга. Разность отрезков линий до каждого излучателя кратна  $\lambda_0$ , поэтому сигналы резонаторов поступают в каждый из боковых излучателей в фазе, т.е. суммируются. Расстояние между боковыми антеннами составляет  $3.5\lambda_0$ , и поэтому их излучение в противофазе; для синфазности излучения на выходе одного из тройников включается полуволновая вставка.

Зарегистрированный уровень мощности СВЧ импульсов в канале центрального излучателя не превышает

ет 25 MW. Мощность излучения боковых антенн составляет 180 MW. Спектры излучаемого сигнала аналогичны спектрам настроенной симметричной системы с одной нагрузкой. При этом спектр имеет один максимум на частоте 2720 MHz. Пространственное распределение излучения показано на рис. 12. Интенсивность излучения максимальна в нормальном к излучателям направлении. Уровень излучения в направлении минимумов диаграммы достаточно низок (ниже  $-13$  dB). Важно отметить, что этот уровень повторяется в непрерывной серии импульсов. Все эти данные указывают на высокую стабильность амплитудно-фазовых соотношений  $\pi$ -вида колебаний РМГ. Рассчитанная для двух пирамидальных рупорных антенн диаграмма направленности (пунктир на рис. 12) находится в качественном соответствии с экспериментом.

Распределенный вывод излучения из волноводного канала связи может быть также выполнен в виде линейной волноводно-щелевой решетки. Продольные щели прорезаются в широкой стенке волновода на расстоянии  $\lambda_0/2$  попеременно по разные стороны относительно средней линии волновода. Такая система щелей при их синфазном возбуждении фокусирует излучение в плоскости, проходящей через продольную ось волновода, и в направлении, нормальном широкой стенке волновода. Схема СВЧ источника на основе 8-резонаторного РМГ показана на рис. 13. Щели закрыты диэлектрическим окном из органического стекла с вакуумным уплотнением. Настройка длины канала связи позволила сформировать в плоскости волновода узкий (угол порядка  $20^\circ$  на уровне половинной мощности) электромагнитный луч [14,15].



**Рис. 13.** Схема РМГ с антенной решеткой: 1 — катод, 2 — анодный блок, 3 — магнитная система, 4 — антенная решетка, 5 — волноводные вставки.

## Заключение

Описанные экспериментальные результаты демонстрируют возможность эффективного управления энергетическими и спектральными характеристиками СВЧ излучения релятивистского магнетрона путем изменения параметров внешней связи резонаторов. В зависимости от длины канала и согласования общей нагрузки в системе могут быть созданы условия высокой модовой и спектральной стабильности рабочего вида колебаний, а также получены эффекты затягивания частоты и гистерезисной неустойчивости, инициированы конкурентные признаки процесса генерации. Введение в канал связи резонаторов магнетрона системы излучателей позволяет реализовать распределенный вывод СВЧ излучения высокого уровня с заданным профилем колебаний. При введении в канал связи системы нагрузок-излучателей релятивистский магнетрон приобретает свойства сверхмощного генерирующего модуля с направленным излучением СВЧ энергии.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-08-00555а).

## Список литературы

- [1] Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Черногалова Л.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 8. С. 482–485.
- [2] Владимиров С.Н., Майдановский А.С., Новиков С.С. Нелинейные колебания многочастотных автоколебательных систем. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1993. 203 с.
- [3] Новиков С.С., Майдановский С.А. // Радиотехника и радиоэлектроника. 2003. Т. 48. Вып. 5. С. 595–600.
- [4] Винтизенко И.И., Новиков С.С. Релятивистские магнетронные СВЧ-генераторы. Томск. Изд-во НТЛ, 2009. 432 с.
- [5] Релятивистский магнетрон / И.И. Винтизенко, А.И. Заревич, С.С. Новиков. Пат. РФ № 2190281. Заявл. 25.10.2001. 2002. Б.И. № 27. С. 595–600.
- [6] Винтизенко И.И., Гусельников С.И., Заревич А.И., Новиков С.С. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 7. С. 64–70.
- [7] Бутаков Л.Д., Винтизенко И.И., Фурман Э.Г. // ПТЭ. 2001. № 5. С. 104–110.
- [8] Винтизенко И.И., Заревич А.И., Новиков С.С. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 23. С. 40–47.
- [9] Винтизенко И.И., Заревич А.И., Новиков С.С. // Изв. вузов. Физика. 2006. № 9. С. 114–118.
- [10] Винтизенко И.И., Новиков С.С. // Изв. вузов. Физика. 2009. № 11/2. С. 272–282.
- [11] Релятивистский магнетрон / И.И. Винтизенко, А.И. Заревич, С.С. Новиков. Пат. РФ № 22285560. Заявл. 11.09.2002. 2004. Б.И. № 13
- [12] Zarevich A.I., Vintzenko I.I., Novikov S.S. // Proc. 13 Int. Symp. on high current electronics. Томск. 2004. P. 269–272.
- [13] Винтизенко И.И., Заревич А.И., Новиков С.С. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 9. С. 63–68.
- [14] Винтизенко И.И., Новиков С.С. // Изв. вузов. Физика. 2008. № 9.2. С. 154–156.
- [15] Винтизенко И.И., Новиков С.С. // Письма в ЖТФ. 2009. Вып. 23. С. 88–96.