

09;12

## **Влияние внешней связи резонаторов релятивистского магнетрона на стабильность и мощность колебаний**

© И.И. Винтизенко, В.И. Гусельников, А.И. Заревич, С.С. Новиков

Научно-исследовательский институт ядерной физики  
при Томском политехническом университете  
E-mail: lablia@npi.tpu.ru

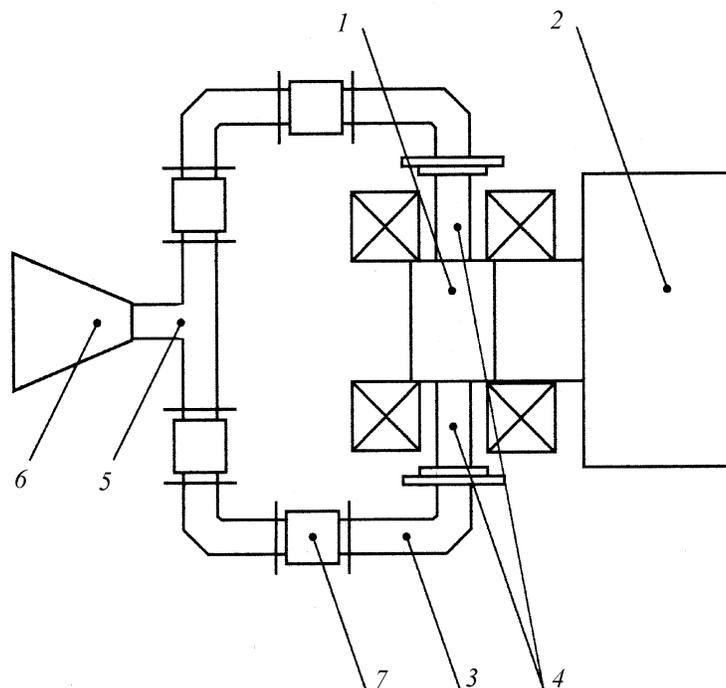
Томский государственный университет

Поступило в Редакцию 22 октября 2002 г.

Экспериментально исследованы автоколебательные режимы релятивистского магнетрона при внешней взаимной связи его резонаторов. Показано, что взаимодействие колебаний в условиях модовой конкуренции заметно повышает стабильность рабочего вида колебаний, улучшает спектральные характеристики излучения.

Электровacuумные СВЧ-приборы с распределенным взаимодействием являются многочастотными автоколебательными системами, вследствие чего им присуще явление конкуренции колебаний и связанная с ней модовая нестабильность. Это особенно характерно для сверхмощных магнетронных генераторов. В таких приборах из-за нестабильности внешних полей возникают условия для возбуждения колебаний различных видов как от импульса к импульсу, так и на протяжении одного импульса [1,2]. Если в классическом варианте задача стабилизации процесса генерации эффективно решается применением разнорезонаторных колебательных систем или связей, то в релятивистских магнетронах эти методы, как правило, неприемлемы.

Перспективным способом повышения стабильности работы генераторов является введение в колебательные системы внешних связей [3]. В релятивистском магнетроне внешняя связь может быть реализована с помощью волноводного тракта, соединяющего различные резонаторы. В этом случае взаимодействие колебательных компонент резонансной системы магнетрона с физической точки зрения аналогично процессам когерентного взаимодействия в системах взаимно-синхронизированных автогенераторов. Поэтому для создания стабильного магнетронного



**Рис. 1.** Структурная схема экспериментальной установки.

источника могут быть использованы методы построения многогенераторных когерентных систем [4–7]. Высокая стабильность синхронных режимов в этих системах реализуется при определенной организации каналов связи, включающих общие диссипативные элементы-нагрузки.

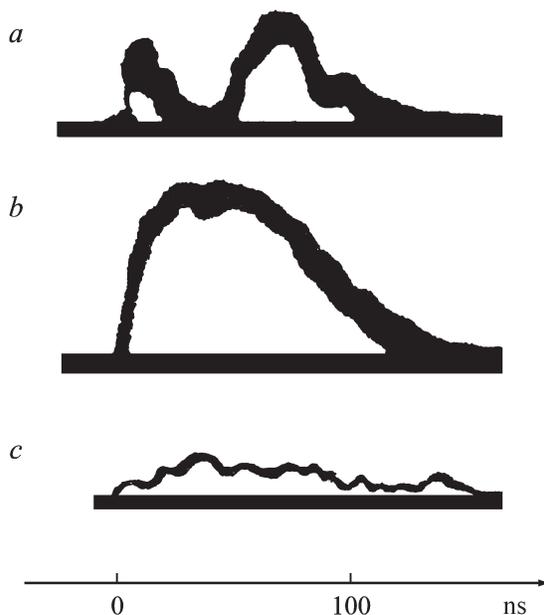
В настоящей работе экспериментально исследуются энергетические и спектральные характеристики СВЧ-излучения релятивистского магнетрона при внешней взаимной связи резонаторов.

Структурная схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Два противоположных резонатора 6-резонаторного релятивистского магнетрона 10-см диапазона 1, питаемого секцией линейного индукционного ускорителя 2, соединяются волноводным трактом связи 3 через плавные переходы 4 и 3-dB волноводный H-тройник 5. Трой-

ник обеспечивает вывод СВЧ-энергии из системы через излучающую пирамидальную антенну 6. Вставки 7 позволяют дискретно изменять суммарную длину тракта связи и симметрию включения нагрузки-излучателя. Экспериментальная установка [8] обеспечивает генерацию СВЧ-импульсов с частотой следования до 320 Hz при уровне катод-анодного напряжения 400–500 kV, полном токе 2.5–3 kA и отличается высокой повторяемостью рабочих характеристик. В эксперименте определялись мощность и спектральный состав импульса СВЧ-излучения, регистрировались полный ток и напряжение магнетрона; по огибающим сигналов рассчитывалась полная энергия в импульсе. Измерения параметров излучения производились с помощью амплитудных детекторов и перестраиваемого узкополосного фильтра.

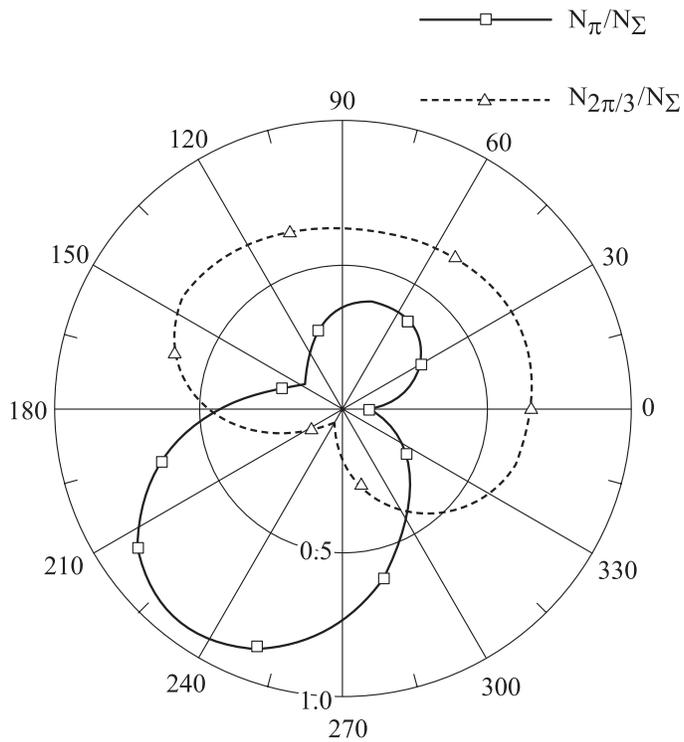
Источник исследовался в следующих трех конфигурациях: магнетрон с несвязанными резонаторами; магнетрон со связанными резонаторами при симметричном расположении нагрузки-излучателя; магнетрон со связанными резонаторами при антисимметричном расположении нагрузки-излучателя. Антисимметричная конфигурация реализуется путем смещения волноводного  $H$ -тройника относительно оси электрической симметрии тракта связи на электрический угол  $90^\circ$  для рабочей длины волны магнетрона. В двух последних конфигурациях изменялась суммарная электрическая длина тракта связи, что позволяло задавать различные фазовые задержки взаимодействующих сигналов. Таким образом, тракт связи содержит общий диссипативный элемент-нагрузку, его конфигурация соответствует изложенным в работах [5–7] принципам построения многогенераторных систем.

В исследуемом релятивистском магнетроне основными конкурирующими видами колебаний являются  $\pi$ -вид и  $2\pi/3$ -вид. Стабильный  $\pi$ -вид существует в некоторой области магнитных полей (0.3–0.5 T), за пределами которой возбуждаются колебания типа  $2\pi/3$  (0.25–0.3 T) и его  $(-1)$ -я гармоника (0.5–0.54 T). На границе интервала модовой стабильности (0.5 T) возможно одновременное возбуждение колебаний конкурирующих видов. При отсчете по азимуту колебания  $\pi$ -вида в противоположных резонаторах синфазны, а  $2\pi/3$ -вида — противофазны. Это обеспечивает суммирование колебаний в общей нагрузке для  $\pi$ -вида в симметричной конфигурации и их вычитание — в антисимметричной. Колебания  $2\pi/3$ -вида, наоборот, вычитаются в симметричной конфигурации и суммируются в антисимметричной [9]. Указанные свойства системы позволяют однозначно идентифицировать рабочий вид колебаний.



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов СВЧ-излучения.

Результаты проведенных экспериментов приведены на рис. 2–4. Огибающие СВЧ-импульсов магнетрона с несвязанными резонаторами (рис. 2, *a*) в рабочем диапазоне магнитного поля имеют характерную глубокую изрезанность, отражающую нестабильность процесса генерации. Уровень мощности излучения с каждого вывода  $\sim 80$  MW, суммарная энергия в импульсе  $\sim 6$  J. Соединение резонаторов по симметричной схеме при оптимальной длине канала связи существенно меняет форму импульсов (рис. 2, *b*). Огибающие СВЧ-сигналов становятся гладкими, что свидетельствует о более стабильной работе магнетрона. Выходная мощность возрастает и достигает  $\sim 200$  MW, энергия импульса повышается до  $\sim 9$  J. Такой уровень мощности соответствует режиму суммирования при возбуждении  $\pi$ -вида колебаний. Если при этом перейти к антисимметричной схеме, то выходная мощность оказывается малой  $\sim 7$ – $8$  MW, энергия в импульсе  $\sim 0.5$  J (рис. 2, *c*). Таким образом,



**Рис. 3.** Диаграмма конкуренции видов колебаний  $\pi$  и  $2\pi/3$ .

мощности, выводимые из резонаторов, вычитаются, что однозначно указывает на возбуждение в магнетроне  $\pi$ -вида колебаний.

Влияние суммарной электрической длины линии связи резонаторов магнетрона на модовую стабильность наиболее четко наблюдалось в антисимметричной схеме. На рис. 3 показано изменение относительного числа реализаций  $N_{\pi}$  и  $N_{2\pi/3}$  видов колебаний в сериях из  $N_{\Sigma} \approx 50$  импульсов в зависимости от электрической длины  $\Theta_{\Sigma}$  внешнего тракта при индукции магнитного поля  $B \approx 0.5$  Т. Как видно, в интервале углов  $\Delta\Theta_{\Sigma} \approx (210 \div 270)^{\circ}$ , отсчитываемых относительно некоторого начального значения, внешняя связь обеспечивает оптимальное взаимодействие  $\pi$ -колебаний и неоптимальное —  $2\pi/3$ -колебаний. За

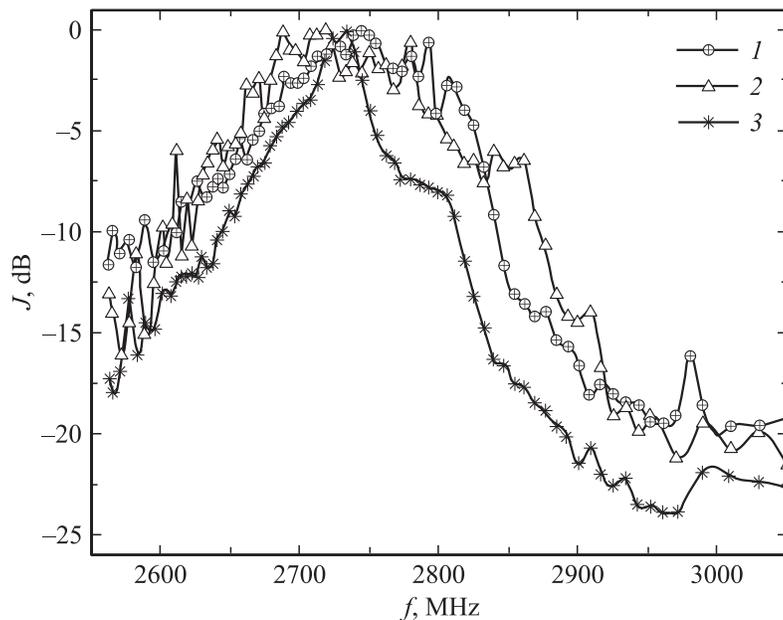


Рис. 4. Спектральные характеристики импульсов СВЧ-излучения.

пределами выделенного интервала углов возбуждение видов становится равновероятным и далее смещается в пользу  $2\pi/3$ -вида.

Влияние цепи связи также проявляется и на спектральных характеристиках импульсов. Магнетрон с несвязанными резонаторами имеет полосу излучения около 4.5% по уровню  $-3$  дБ (кривая 1 на рис. 4). Соединение резонаторов при длинах линии связи, близких к оптимальной, позволяет существенно сузить спектр излучения, приблизительно до 1% (кривая 2 на рис. 4). В остальных случаях, т.е. при неоптимальном подборе связи, полоса излучения по уровню  $-3$  дБ составляет 5% и более (кривая 3 на рис. 4).

Таким образом, проведенные исследования показывают, что введение внешних связей между резонаторами релятивистского магнетрона оказывает существенное влияние на спектральные и энергетические характеристики процесса генерации. Предложенная оригинальная конфигурация канала связи на основе схем с общими диссипативными

элементами позволяет заметно улучшить качество СВЧ-сигнала на выходе источника. Можно полагать, что включение в канал связи многих излучателей позволит эффективно решить проблему создания стабильных сверхмощных узконаправленных излучающих систем.

## Список литературы

- [1] *Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Черногалова Л.Ф.* и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 8. С. 482–485.
- [2] *Schnitzer I., Rosenberg A., Leibovitz C.* et al. // Proc. of SPIE. 1995. V. 2843. P. 101–107.
- [3] *Kitsanov S.A., Klimov A.I., Korovin S.D.* et al. // Proc. of 1st Int. Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials. Tomsk, 2000. V. 2. P. 423–428.
- [4] *Владимиров С.Н., Майдановский А.С., Новиков С.С.* // Нелинейные колебания многочастотных автоколебательных систем. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1993. 203 с.
- [5] *Novikov S.S., Maidanovskii S.A., Sulakshin S.A.* // Proc. SPIE in Intense Microwave Pulses IV. Denver, 1996. V. 2843. P. 293–302.
- [6] *Novikov S.S.* // Proc. SPIE in Intense Microwave Pulses V. San Diego, 1997. V. 3158. P. 260–264.
- [7] *Novikov S.S., Zarevich A.I.* // Proc. of 1st Int. Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials. Tomsk, 2000. V. 2. P. 466–469.
- [8] *Бутаков Л.Д., Винтизенко И.И., Гусельников В.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 13. С. 66–70.
- [9] *Патент* на изобретение № 2190281 РФ, МПК Н 01 J 25/50. Релятивистский магнетрон / Винтизенко И.И., Заревич А.И., Новиков С.С. № 2001128794; Заявл. 25.10.2001. Оpubл. БИ. 2002. № 27.