

УДК 519.254.004.67

## Метод управления спектром плазменного релятивистского СВЧ-генератора в частотно-периодическом режиме

С. Е. Андреев, Д. К. Ульянов

*Плазменный релятивистский генератор может работать в режиме генерации одиночного импульса СВЧ-излучения или частотно-периодическом режиме (до 50 импульсов в секунду, длительностью до 80 нс, мощность до 50 МВт с частотами излучения от 2 до 25 ГГц). Для получения и исследования режимов генерации в частотно-периодическом режиме необходима оперативная обработка получаемых временных рядов. Представлена методика анализа временного ряда за время между экспериментами серии, позволяющая найти требуемый режим работы устройства. Приведены примеры достигнутых в результате исследования режимов работы плазменного релятивистского СВЧ-генератора.*

PACS: 52.35.-g, 52.59-f

*Ключевые слова:* релятивистский, СВЧ-излучение, плазма, антенна Фурье, спектр, временной ряд.

### Введение

В релятивистской СВЧ-электронике для генерации СВЧ-излучения используются релятивистские электронные пучки (РЭП) с энергией электронов до 1,5 МэВ, токами до 10 кА. В результате генерации полученное СВЧ-излучение может достигать мощности несколько ГВт при длительности импульса от единиц до сотен нс как в разовом, так и в частотно-периодическом режиме.

Особенностью плазменного релятивистского СВЧ-генератора (ПРГ) является использование плазмы в качестве замедляющей структуры. Это позволяет получить СВЧ-излучение в широком диапазоне частот от 2 до 25 ГГц на уровне мощности около 50 МВт в одном устройстве, а также позволяет управлять частотой излучения от импульса к импульсу [1—2]. ПРГ установлен на ускорителе Sinus 550-80 (длительность импульса тока 80 нс, энергия электронов 500 кэВ, ток 2 кА).

Для достижения заданного режима генерации необходимо повторить несколько экспериментов, подбирая параметры ПРГ. В данной работе описывается методика получения заданных

режимов работы. Для получения требуемой информации о спектрах СВЧ-излучения в каждом импульсе последовательности обрабатывались временные ряды (ВР), описывающие серии СВЧ-импульсов (от 1 до 50), излучаемых плазменным релятивистским СВЧ-генератором. В данной работе описана специальная программа обработки, позволяющая быстро оценить результат эксперимента и за время между экспериментами серии сделать вывод о необходимом изменении параметров следующего эксперимента. Приведены спектры СВЧ-излучения полученных режимов генерации.

### Эксперимент

Для получения ВР, описывающих СВЧ-излучение, использовалась широкополосная вибраторная антенна, которая принимала СВЧ-излучение, получаемое в результате генерации. Геометрические параметры принимающей антенны, подобранные в процессе тестирования, позволяли исследовать частоты в диапазоне несколько гигагерц с введением коррекции амплитуды (АЧХ антенны). Схема сбора данных приведена на рис. 1.

Задачей проводимых экспериментов являлось получение заданного режима генерации (характеристик спектра СВЧ-излучения) в частотно-периодическом режиме. Получаемый сигнал проходил по коаксиальной линии передачи, ослаблялся аттенуаторами и регистрировался осциллографом Tektronix TDS-7404. Временные ряды передавались на компьютер и там обрабатывались (см. рис. 1). После обработки корректировались значения параметров ПРГ и проводился следую-

**Андреев Сергей Евгеньевич**, студент.

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

Тел.: 8 (903) 145-84-65. E-mail: funkmonk@rambler.ru

**Ульянов Денис Константинович**, ст. научный сотрудник.

Институт Общей Физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел.: 8 (916) 512-39-12. E-mail: uyanov@fpl.gpi.ru.

Статья поступила в редакцию 11 августа 2014 г.

© Андреев С. Е., Ульянов Д. К., 2014

щий эксперимент из серии. При проведении серии экспериментов время, имеющееся для анализа, составляло около 2 минут.

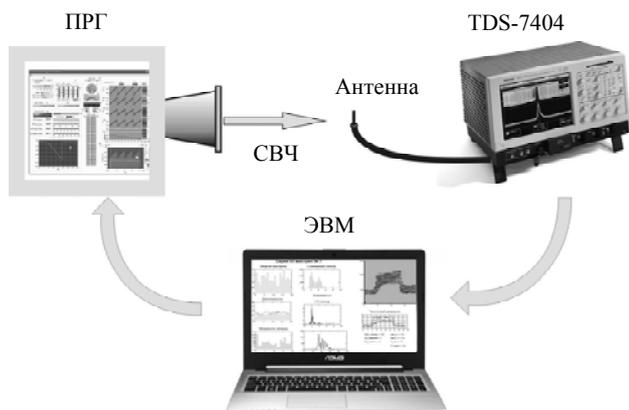


Рис. 1. Схема сбора экспериментальных данных

Характеристики осциллографа представлены в табл. 1.

Таблица 1

	TDS 7404
Полоса, ГГц	4
Выборка, $10^{10} \text{ с}^{-1}$	2
Шаг дискретизации, пс	50
АЦП, бит	8

### Методика обработки временного ряда

Оказалось, что необходимо проанализировать достаточно большой объем информации. Возможностей, предоставляемых пакетом математической обработки осциллографа, оказалось недостаточно. По этой причине была разработана программа обработки полученного в результате

работы ПРГ временного ряда, описывающего СВЧ-излучение, принятое антенной. Один ВР может описывать от 1 до 50 импульсов. В качестве среды разработки был выбран САПР Mathcad 14. Выбор программы был обусловлен требованиями простоты использования созданной программы другими пользователями.

Для описания ВР был выбран набор характеристик (табл. 2) и способы представления данных. Большая часть анализа связана с частотной областью. Данные о спектральных характеристиках получены в результате использования дискретного преобразования Фурье с последующей обработкой полученных данных. Кроме этого, определялись интегральные характеристики СВЧ-импульса, а именно, его энергия и длительность.

Оказалось, что для быстрого анализа более 5 различных параметров и принятия решения по каждому из 20—50 выстрелов в последовательности хорошо подходит графическое представление данных. Табличные данные не позволяют это сделать. Таким образом, для представления результатов расчета характеристик временного ряда были выбраны гистограммы и графики, показывающие характеристики серии. Для анализа отдельного импульса (в случае необходимости) предоставлена возможность просмотра любого импульса из последовательности более подробно. Результаты работы программы на примере серии, состоящей из 20 импульсов, представлены на рис. 2 (номера позиций в списке и на рисунке совпадают). На графиках в блоках 1—4, 7 по оси абсцисс указаны номера эксперимента (импульса) в одной последовательности, а по оси ординат — значения параметра в данном импульсе.

Таблица 2

№	Характеристика	Описание
1	Энергия	Гистограмма. Среднее от мгновенной мощности каждого импульса ВР
2	Длительность	Гистограмма. Длительность каждого СВЧ-импульса ВР
3	Средняя мощность	Гистограмма, получена из данных пунктов 1 и 2
4	Частотный диапазон	График. Определяется нижняя верхняя частота спектра каждого ВР серии, а также частота с максимальной амплитудой. Показано линиями
5	Спектр $n$ -го выстрела	Спектр любого выбранного импульса последовательности, полученный с помощью БПФ
6	Огибающая $n$ -го выстрела	Детектированный ВР. Огибающая ВР любого выбранного импульса
7	3D-спектр	Графическое 3D-представление спектров всех импульсов серии
8	Гистограмма суммы спектров	Гистограмма суммы амплитудных спектров от всех ВР, с окном 200 МГц без учета шумовой составляющей (менее 0,2 от максимального значения амплитуды спектра в каждом спектре)

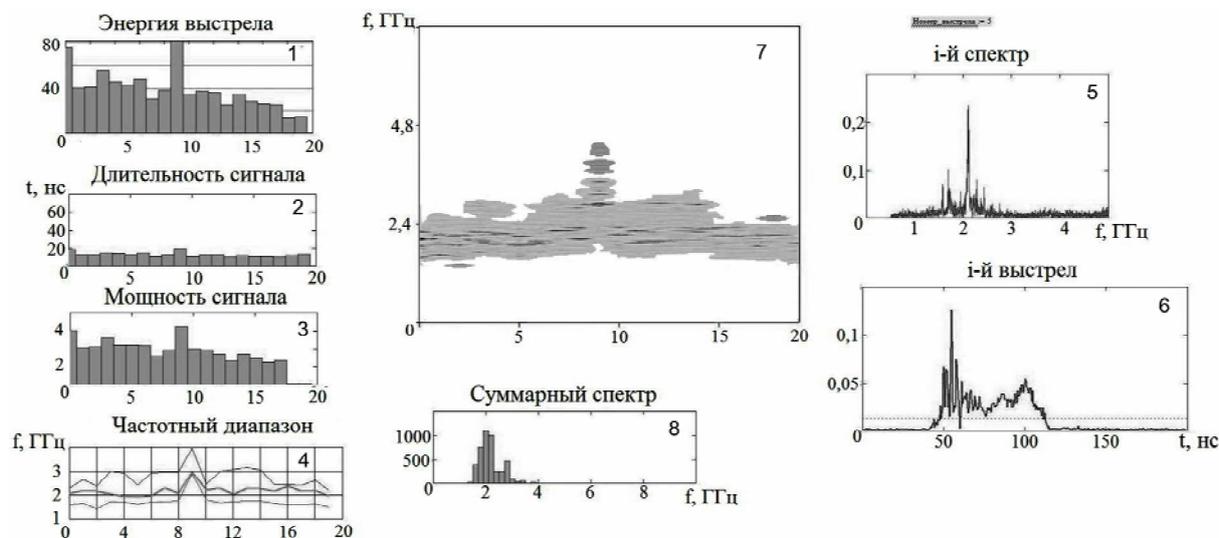


Рис. 2. Результат работы программы обработки временного ряда, полученного в частотно-периодическом режиме работы ПРГ. Индексы на рисунке соответствуют индексам в таблице 2

Графики энергии и мощности представлены в относительных единицах. При наличии данных калориметрических измерений, эти данные можно нормировать на показания калориметра и представить в абсолютных единицах. К сожалению, результаты, полученные в абсолютных значениях, также можно использовать только как оценку. Точными данными является только энергия и мощность за всю последовательность (20—50) импульсов, а распределение энергии по импульсам последовательности определяется пропорционально интегралам от квадрата амплитуды сигнала с антенны (электрического поля). Для получения спектров в данной программе обработки используется быстрое преобразование Фурье (БПФ).

### Результат

Из рис. 2 видно, что получен режим генерации СВЧ-излучения с примерно одинаковым спектром во всех выстрелах последовательности кроме 9-го импульса, имеющего более высокую частоту СВЧ-излучения (хорошо видно на графиках блоков 4 и 7). На графике суммарного спектра 8 видно, что большая часть излучения попадает в полосу  $2 \pm 0,4$  ГГц.

Представленный метод оперативной обработки позволяет получить наглядную информацию о характеристиках как каждого импульса из серии, так и всей серии в целом. Подобная информация позволяет определить влияние параметров эксперимента на получаемое излучение и помогает настроить ПРГ на необходимый режим работы.

Подобная работа может проводиться в случае, если ПРГ работает стабильно от выстрела к выстрелу и от одной последовательности к другой при неизменных параметрах. Было проведено исследование, которое показало, что при неизмен-

ных параметрах при последовательных экспериментах спектры действительно повторяются с хорошей точностью.

В конечном итоге, в экспериментах были получены различные режимы генерации. Примеры некоторых полученных режимов представлены на рис. 3. Видно, что в одной последовательности импульсов в течение секунды можно получить спектр, похожий на спектр одного импульса, а можно зафиксировать очень широкий спектр (шириной в несколько ГГц).

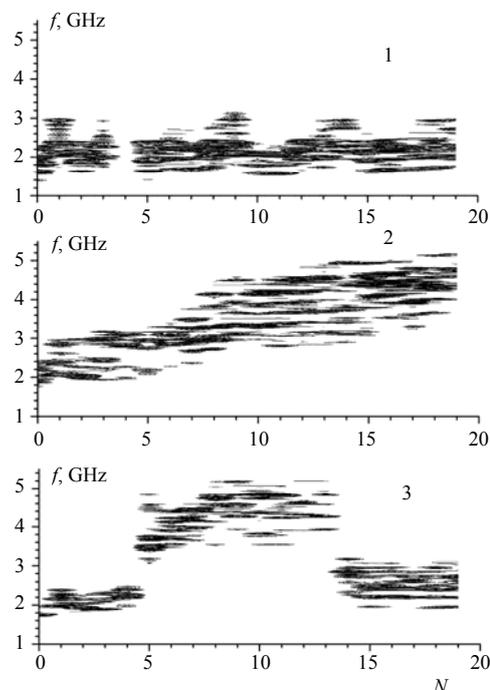


Рис. 3. Полученные режимы генерации: 1 — генерации с фиксированным спектром во всех импульсах последовательности, 2 — генерация с плавным увеличением средней частоты, 3 — последовательная перестройка частоты вверх и вниз

### Выводы

Предложенная методика использования графического вывода результатов, включающая предложенный набор параметров, позволяет быстро оценить большой объем информации для принятия решения об изменении параметров установки для получения нужного режима. Такой подход может быть рекомендован при проведении других исследований, требующих многократного повторения, для подбора параметров с большим объемом анализируемой информации.

Отметим, что в результате работы с программами впервые были получена возможность управления частотой по заранее заданному закону в каждом импульсе пачки [3].

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 8392 от 24 августа 2012 г. «Образование структур и стохастизация в плазме», комплексной программе РАН «Фундаментальные проблемы импульсной сильноточной электроники» и грантов РФФИ № 12-08-00638-а и № 14-08-01126-а.*

### Литература

1. Богданкевич И. Л., Гришин Д. М., Гунин А. В. и др. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 10. С. 926.
2. Ulyanov D. K., Bogdankevich I. L., Ivanov I. E., et al. // 16th International Symposium on High-Current Electronics (16th SHCE), 2010, 19–24 Sept, Tomsk, P. 408–410.
3. Ульянов Д. К., Лоза О. Т., Баранов Р. В., Андреев С. Е. // XL Межд. конф. по физике плазмы и УТС, 11–15 февраля 2013, Звенигород. С. 224.

## Method of radiation spectrum control for plasma relativistic microwave oscillator in repetitively-rated regime

*S. E. Andreev<sup>1</sup> and D. K. Ulyanov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Moscow State Institute of Radio-Engineering, Electronics and Automation  
78 Vernadskogo prosp., Moscow, 119454, Russia  
E-mail: funkmonk@rambler.ru

<sup>2</sup>A. M. Prokhorov General Physics Institute of the RAS  
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: ulyanov@fpl.gpi.ru

*Received August 11, 2014*

*Plasma relativistic microwave oscillator (RPO) operates in one pulse and repetitively-rated (RR) regime (up to 50 pulse per second). Microwave power is about 50 MW, pulse duration up to 80 ns in UHF and SHF frequency bands. Online evaluation of time series parameters of RPO is necessary to achieve required microwave spectrum in repetitively-rated regime. The methodic of evaluation of time series parameters is represented. It allows to analyse time series between experiments in one series to make required changes of experimental parameters. Some results of microwave spectra are presented.*

PACS: 52.35.-g, 52.59-f

*Keywords:* relativistic, microwave, plasma, antenna, Fourier, specter, time series.

### References

1. I. L. Bogdankevich, D. M. Grishin, A. V. Gunin, et al., Plasma Physics Reports **34**, 926 (2008).
2. D. K. Ulyanov, I. L. Bogdankevich, I. E. Ivanov, et al., in Proc. 16th International Symposium on High-Current Electronics (Tomsk, Russia, 2010), pp. 408–410.
3. D. K. Ulyanov, O. T. Loza, R. V. Baranov, et al., in Proc. XL Int. Conf. on Plasma Physics and CTS (Zvenigorod, Russia, 2013), p. 224.