

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФАЗИРОВКИ ВЧ-ГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ РАЗРЯДА С ПОЛЫМ КАТОДОМ

Е. А. Садчиков, Д. В. Вялых, А. Е. Дубинов, И. Л. Львов, С. А. Садовой

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Не так давно в научно-технической литературе [1–5] появились сообщения о возможности создания высокоэффективных генераторов на основе газового разряда с полым катодом.

Принцип работы ВЧ-генератора на основе разряда с полым катодом (РПК) заключается в возможности получения 100 %-й модуляции напряжения, падающего на газоразрядном промежутке.

На рис. 1 представлена схема, которая демонстрирует работу ВЧ-генератора на основе газового разряда с полым катодом. После включения блока питания начинается зарядка емкости C и, соответственно, рост напряжения на газоразрядном промежутке. После того как напряжение на газоразрядном промежутке превысит напряжение пробоя, начинается формирование газового разряда в камере. Если выполнены все условия генерации, то напряжение, падающее на газоразрядном промежутке, подвергается сильной модуляции [6]. Через разделительный конденсатор C_{ϕ}

осцилляции анодного потенциала поступают в устройство согласования или непосредственно в фидер. Наличие разделительного конденсатора обеспечивает защиту фидерных линий от постоянной составляющей высокого напряжения и не позволяет шунтировать газоразрядный промежуток активной составляющей сопротивления нагрузки.

Подобный тип генераторов отличают простота и небольшой размер газоразрядной камеры, высокая эффективность и стабильность ВЧ-генерации, широкий диапазон рабочей частоты. Необходимо отметить, что мощность ВЧ генератора ограничена зажиганием дугового разряда в газоразрядной камере ВЧ-генератора, который шунтирует катод-анодный промежуток, и генерация становится невозможной. Вероятность зажигания дугового разряда в камере растет по мере увеличения рабочего напряжения и соответственно выходной мощности, вследствие чего уменьшается длительность генерации [6], что подтверждается основными зависимостями, представленными на рис. 2.

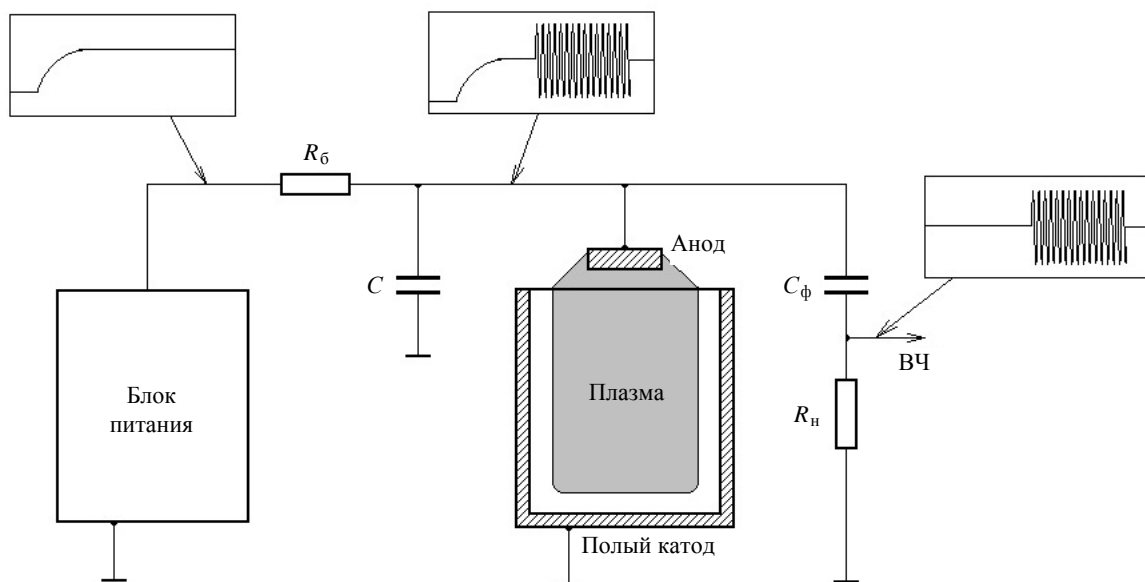
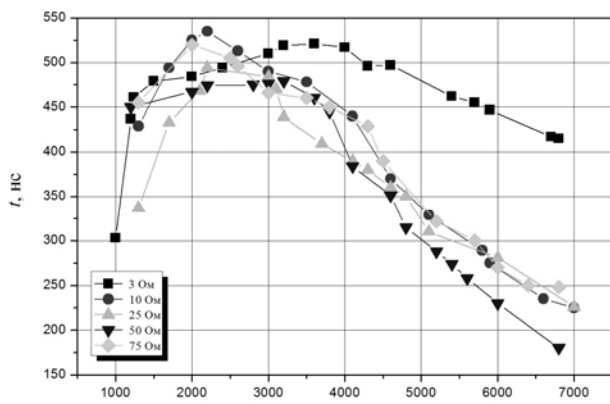
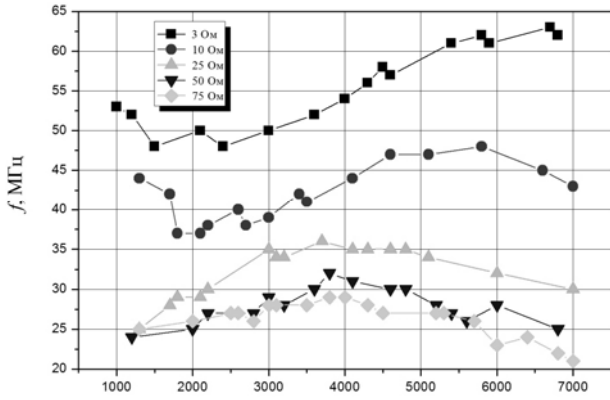


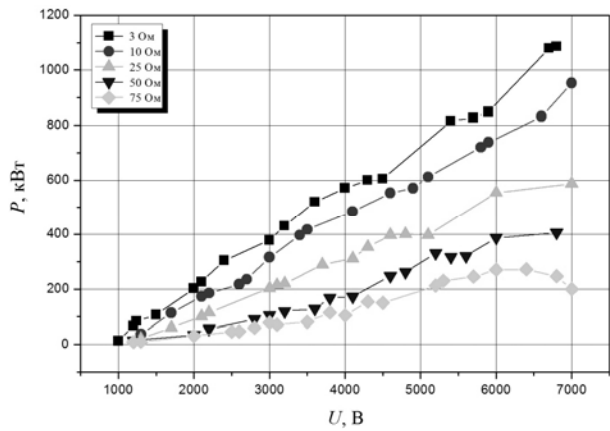
Рис. 1. Схема, демонстрирующая работу ВЧ-генератора на основе РПК



а



б

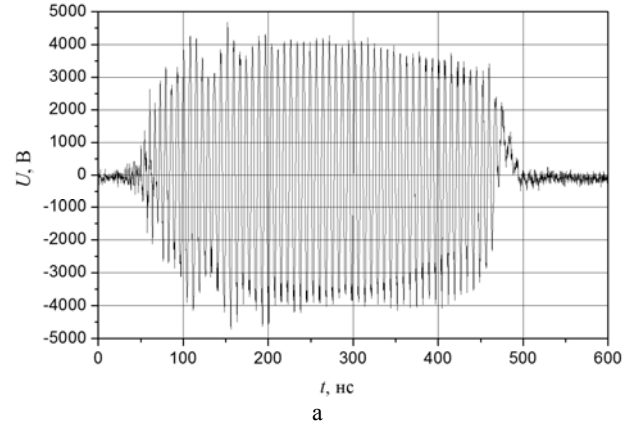


в

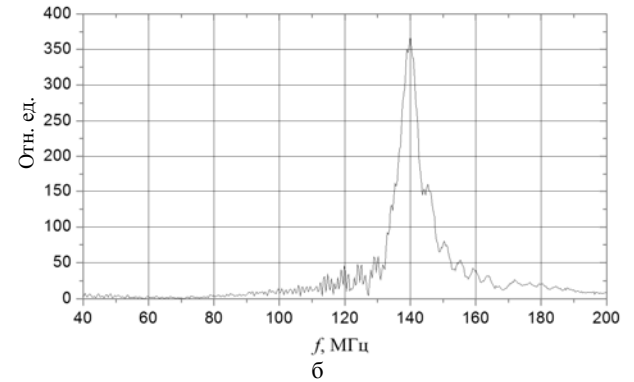
Рис. 2. Основные зависимости: а – действующей выходной мощности; б – длительности генерации; в – частоты ВЧ-осцилляций от величины рабочего напряжения ВЧ-генератора для различных номиналов сопротивления нагрузки [6]

Увеличение мощности модуля ВЧ-генератора является одной из основных проблем оптимизации ВЧ-генераторов. Для решения этой проблемы предполагается использовать систему из двух ВЧ-генераторов. Взаимодействие ВЧ-генераторов системы осуществляется за счет остаточной плазмы, образованной в газоразрядных камерах ВЧ-генераторов. ВЧ-генераторы на основе РПК создают гармонические колебания с узким спектром главной линии генерации, что наглядно подтверждается представленными на рис. 3а

осциллограммой и на рис. 3б фурье-образом, что позволяет надеяться на создание в будущем мощной установки в ВЧ- и ОВЧ-диапазонах частот с выходной мощностью несколько десятков МВт из нескольких таких сфазированных генераторов. В будущем подобные установки, вероятно, не будут иметь аналогов и будут востребованы при проведении исследований по воздействию электромагнитного излучения этих частотных диапазонов на различные объекты.



а



б

Рис. 3. Осциллограмма (а) и ее фурье-образ (б), демонстрирующие работу ВЧ-генератора на основе газового разряда с полым катодом

Описание экспериментальной установки

Схема конструкции системы газоразрядных камер представлена на рис. 4. Система газоразрядных камер с РПК состоит из двух одинаковых модулей газоразрядных камер ВЧ-генераторов. Газоразрядные камеры крепились к вакуумной системе коаксиально, откачка осуществлялась за счет расположенных под анодом отверстий для откачки. К катоду каждой газоразрядной камеры системы крепился и подключался электрически разделительный конденсатор, который обеспечивает защиту подключенной к нему фидерной линии от постоянной составляющей высокого напряжения и не позволяет шунтировать катод-анодный промежуток активной составляющей сопротивления нагрузки.

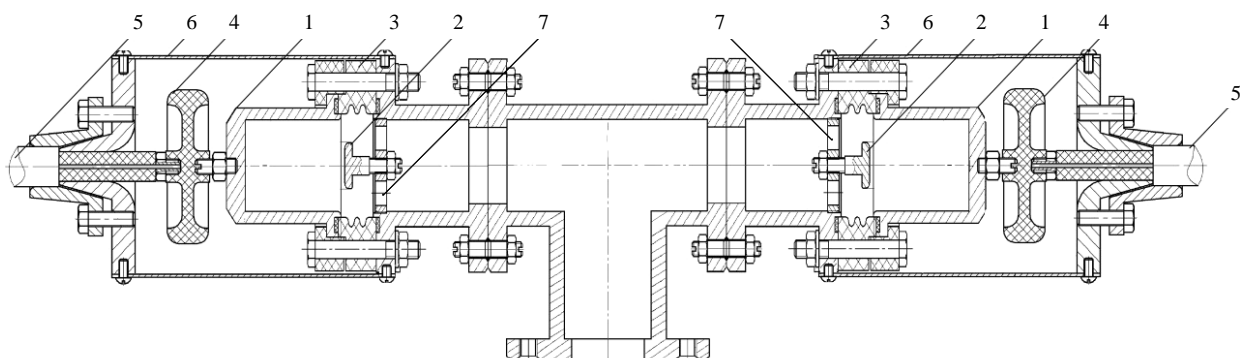


Рис. 4. Схема конструкции системы газоразрядных камер с РПК: 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – изолятор; 4 – разделительный конденсатор; 5 – фидерная линия; 6 – кожух; 7 – отверстия для откачки

Схема высоковольтной системы представлена на рис. 5. Высоковольтная система позволяет запускать ВЧ-генераторы системы в импульсно-периодическом режиме. Импульсно-периодическое зарядное устройство (напряжение зарядки 2–7 кВ, максимальная частота следования импульсов до 1 кГц) осуществляет одновременную зарядку обеих формирующих линий. После того, как напряжение на одной из формирующих линий достигнет напряжения пробоя, развивается разряд в одном из генераторов. Через некоторое время развивается разряд и в другом генераторе. Если выполнены условия генерации, то на выходе появляются осцилляции рабочего напряжения, которые поступают в систему регистрации.

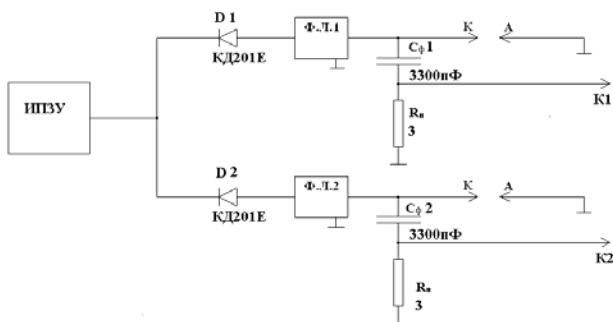


Рис. 5. Схема высоковольтной системы, работающей в импульсно-периодическом режиме

Вакуумная система обеспечивает необходимое давление (10^{-1} – 10^{-2} Тор) остаточного газа (воздуха) в системе газоразрядных камер с РПК.

Измерение и регистрация ВЧ-составляющей колебаний осуществляются осциллографом, который подключен к выходным трактам системы ГК с РПК.

Результаты исследования

На рис. 6 и 7 представлены зависимость изменения мгновенных частот ВЧ-генераторов и зависимость изменения разности фаз колебаний двух ВЧ-генераторов системы от времени, работающих в импульсно-периодическом режиме, частота следования им-

пульсов зарядки составляет 1 Гц. Анализ полученных зависимостей показывает, что наблюдается задержка запуска ВЧ-генераторов системы, которая составляет 0,5 мкс, разность фаз колебаний двух ВЧ-генераторов системы постоянно и монотонно увеличивается, что говорит о том, что наблюдается отсутствие взаимодействия генераторов, вследствие недостаточной плазменной связи между ними.

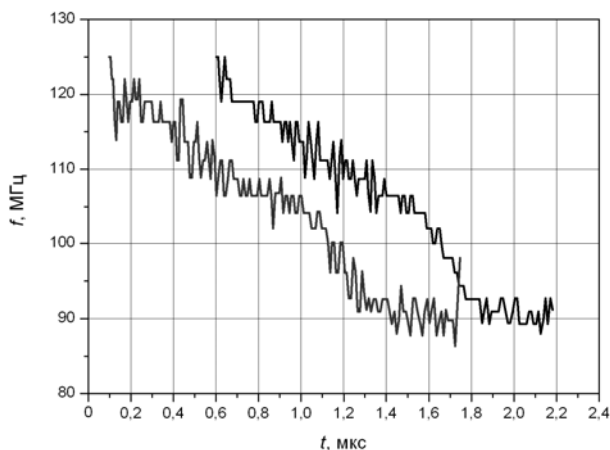


Рис. 6. Зависимость изменения мгновенных частот двух генераторов системы от времени

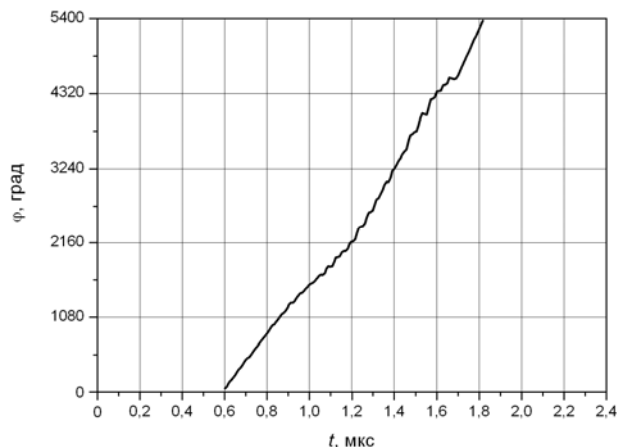


Рис. 7. Зависимость изменения разности фаз колебаний двух генераторов системы от времени

На рис. 8 представлена сумма (математическая) осциллограмм колебаний двух генераторов системы, работающих в импульсно-периодическом режиме, частота следования импульсов зарядки составляет 1 Гц. Анализ суммы осциллограмм колебаний двух генераторов системы показывает, что фазировка колебаний не наблюдается, а наблюдаются биения, возникающие вследствие того, что частоты двух генераторов отличаются на небольшую величину.

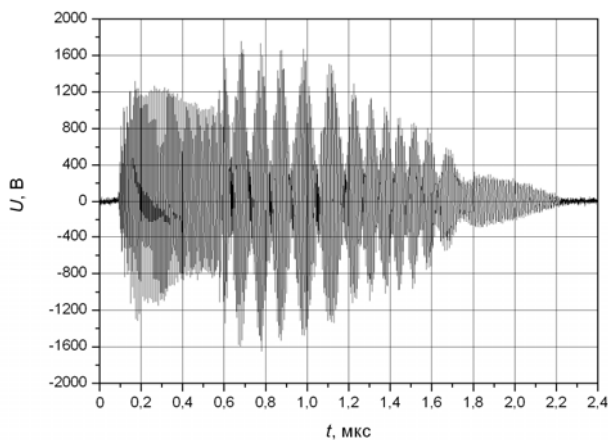


Рис. 8. Сумма (математическая) осциллограмм колебаний двух ВЧ-генераторов системы

На рис. 9 и 10 представлены зависимость изменения мгновенных частот двух ВЧ-генераторов и зависимость изменения разности фаз колебаний двух ВЧ-генераторов системы от времени, работающих в импульсно-периодическом режиме, частота следования импульсов зарядки составляет 200 Гц. Заметим, что увеличение частоты следования импульсов зарядки при работе в импульсно-периодическом режиме позволяет заполнить связующий плазменный канал остаточной плазмой, образованной в системе газоразрядных камер ВЧ-генераторов, тем самым увеличивается концентрация плазмы, заполняющей соединительный канал, при этом взаимодействие ВЧ-генераторов возрастает. Анализ полученных зависимостей показывает, что наблюдается задержка запуска ВЧ-генераторов системы, которая составляет 0,2 мкс, зависимость разности фаз колебаний двух ВЧ-генераторов имеет падающие и возрастающие участки, что говорит о том, что наблюдается взаимодействие генераторов, вследствие увеличения плазменной связи между ВЧ-генераторами системы.

На рис. 11 представлена сумма (математическая) осциллограмм колебаний двух ВЧ-генераторов системы, работающих в импульсно-периодическом режиме, частота следования импульсов зарядки составляет 200 Гц. Анализ суммы осциллограмм колебаний двух генераторов системы показывает, что наблюдаются колебания с двукратным увеличением амплитуды, т. е. наблюдается фазировка колебаний в течение 0,5 мкс, биений не наблюдается.

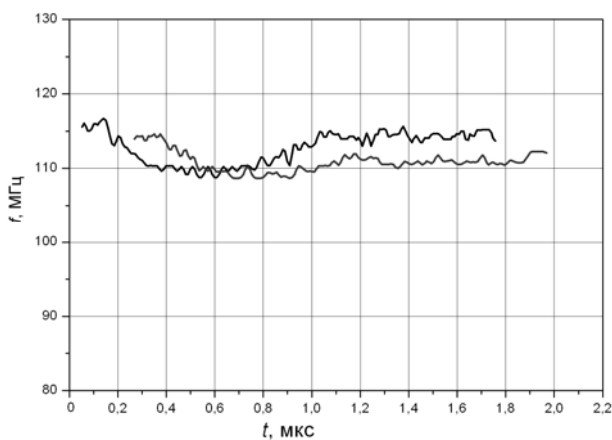


Рис. 9. Зависимость изменения мгновенных частот двух генераторов системы от времени

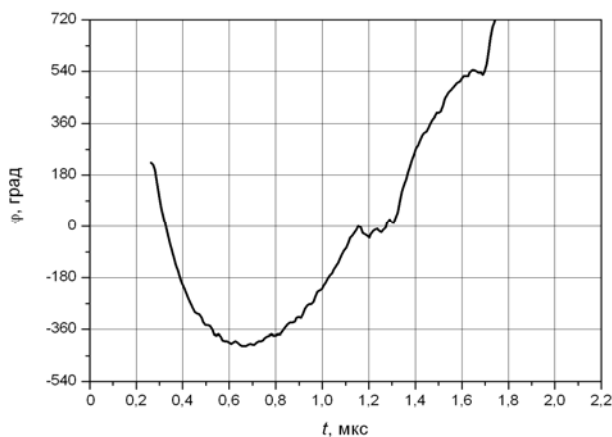


Рис. 10. Зависимость изменения разности фаз колебаний двух генераторов системы от времени

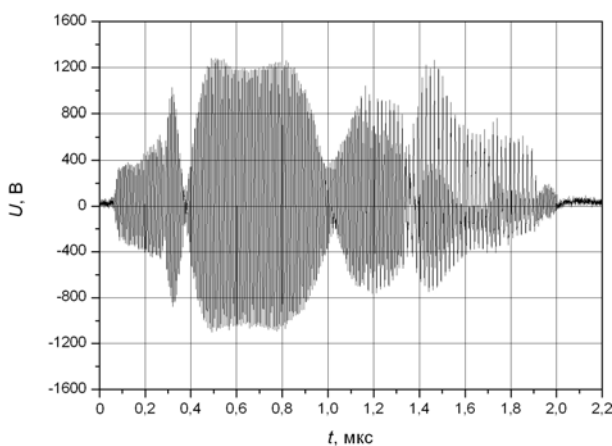


Рис. 11. Сумма (математическая) осциллограмм колебаний двух ВЧ-генераторов системы

Вывод

Проведено экспериментальное исследование возможности фазировки ВЧ-генераторов на основе РПК. Показано, что при определенных режимах происходит автоподстройка частот ВЧ-генераторов системы, а также то, что на достаточно продолжительном периоде длительности импульса генерации фазовый сдвиг остается постоянным.

Работа выполнена по гранту РФФИ № 10-02-00137-а.

Литература

1. Felsteiner J., Ish-Shalom S., Slutsker Ya. Z. Optimized performance of a powerful hollow-cathode RF oscillator // *Journal of Applied Physics*. 1998. Vol. 83. N 6. P. 2940.

2. Arbel D., Bar-Lev Z., Felsteiner J. et al. Collisionless Instability of the Cathode Sheath in a Hollow-Cathode Discharge // *Physical Review Letters*. 1993. Vol. 71, N 18. P. 2919.

3. Arbel D., Bar-Lev Z., Felsteiner J. et al. High-power radio frequency generation in a hollow-cathode discharge // *Applied Physics Letters*. 1995. Vol. 66, N 10. P. 1193.

4. Arbel D., Bar-Lev Z., Felsteiner J. et al. Periodic Microwave Spikes from a Magnetic-Field-Free Hollow-Cathode Discharge // *Physical Review Letters*. 1997. Vol. 78, N 1. P. 66.

5. Bliokh Y., Felsteiner J., Slutsker Ya. Z. et al. Characteristics of a High-Power RF Oscillator Based on a Pulsed Hollow-Cathode Discharge // *IEEE Transactions on plasma science*. 2001. Vol. 29, N 6. P. 895.

6. Булычев С., Вялых Д., Дубинов А. и др. Результаты исследований генераторов мощных ВЧ-импульсов на основе разряда с полым катодом // *Физика плазмы*. 2009. Т. 35, № 11. С. 1019–1040.