

# ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ГЕНЕРАТОРНЫХ СВЧ-МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ БЕЗНАКАЛЬНЫХ МАГНЕТРОНОВ И РЕЗОНАНСНЫХ СВЧ-КОМПРЕССОРОВ

Н.Скрипкин, П.Чумерин, Ю.Юшков n.scripkin@pluton.msk.ru

Повышение пиковой мощности передающих СВЧ-модулей, используемых в РЛС различного назначения, – ключевая задача для множества приложений. Одним из эффективных способов ее решения является применение так называемой резонансной СВЧ-компрессии. Технология резонансной компрессии энергии СВЧ-импульсов узкополосных генераторов основана на простых технических решениях, и для изготовления серийных образцов передающих модулей не требуется дополнительной подготовки производственных мощностей. Оценить возможность создания генераторных СВЧ-модулей, работающих в X-диапазоне частот, на основе безнакальных магнетронов и резонансных СВЧ-компрессоров, чтобы обеспечить электромагнитное излучение наносекундной длительности, позволили исследования, проведенные специалистами Томского политехнического университета и ОАО "Плутон".

Импульсные передатчики на базе безнакальных магнетронов X-диапазона частот, выпускаемых ОАО "Плутон", благодаря компактной конструкции, низким рабочим напряжениям, отсутствию накальных цепей и мгновенному запуску, успешно используются в качестве источников зондирующего сигнала с относительной полосой излучения  $\Delta f/f$  менее  $10^{-4}$  в бортовых РЛС различного назначения. На современном этапе развития радиотехнических систем требуется расширить абсолютную полосу частот электромагнитного излучения и увеличить пиковую мощность. Решить поставленные задачи при использовании магнетронов можно различными способами. Например, обеспечить пико-наносекундную длительность энергии импульса за счет временного сжатия с соответствующим увеличением пиковой

мощности без изменения характеристик самого магнетрона.

Техническая реализация такого подхода основана на преобразовании импульсных сигналов, генерируемых магнетроном путем накопления электромагнитной энергии в высокодобротном резонаторе (в течение времени  $t_n \sim \tau_p$ , где  $\tau_p = Q_n/\omega_0$  – постоянная времени резонатора,  $Q_n$  – нагруженная добротность резонатора,  $\omega_0$  – круговая резонансная частота) и последующим быстрым ее выводом в нагрузку за время  $t_n \ll \tau_p$  (такой метод называется резонансной СВЧ-компрессией) [1]. Мощность генератора в этом случае увеличивается и рассчитывается по формуле:

$$M = \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}} = \eta_n \cdot \eta_v \cdot \frac{t_{\text{ген}}}{t_{\text{и}}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{вх}}$  и  $P_{\text{вых}}$  – мощности, соответственно, на входе и выходе компрессора,  $\eta_n$  – КПД накопления энергии импульса генератора в резонаторе,  $\eta_v$  – КПД вывода накопленной энергии,  $t_{\text{ген}}$  – длительность импульса генератора,  $t_{\text{и}}$  – длительность выходного импульса. КПД резонансных СВЧ-компрессоров X-диапазона частот составляет 20–60%.

Исследования, проведенные в сантиметровом диапазоне волн, показывают, что если сжать длительность импульса генератора в 1000 раз, его мощность можно увеличить на 28 дБ [2]. В резонансных СВЧ-компрессорах X-диапазона частот для этого используют объемные резонаторы добротностью от 10 000 до 50 000, изготовленные из медных волноводов прямоугольного и круглого сечения.

Оценим параметры излучения на выходе генераторных модулей на основе безнакальных магнетронов X-диапазона частот и резонансных СВЧ-компрессоров и рассмотрим перспективные направления их использования в радиотехнической аппаратуре различного назначения.

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЫХОДЕ ГЕНЕРАТОРНЫХ МОДУЛЕЙ

В Томском политехническом университете проведены работы по созданию источников электромагнитного излучения с компрессией импульсов магнетронных генераторов [1, 2]. Основные параметры источников X-диапазона частот представлены в табл.1. Полученные результаты позволяют говорить о возможности создания на базе безнакальных магнетронов X-диапазона частот генераторных СВЧ-модулей для формирования электромагнитного излучения наносекундной длительности с пиковой мощностью несколько мегаватт.

В табл.2 приведены оценочные данные достижимых параметров излучения генераторных СВЧ-модулей с компрессией импульса безнакальных магнетронов X-диапазона частот, выпускаемых ОАО "Плутон".

**Таблица 1.** Параметры источников излучения с компрессией импульсов магнетронных генераторов X-диапазона частот, полученные в Томском политехническом университете

Импульсная мощность, МВт	Длительность импульса, нс	Частота повторения, кГц (макс.)	Усиление мощности, дБ (макс.)
0,3–5	2–20	2	21

## ГЕНЕРАТОРНЫЕ МОДУЛИ И РАДАРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Разработка генераторных СВЧ-модулей, в которых используются зондирующие радиосигналы наносекундной длительности, представляет интерес для специалистов в области создания передатчиков для радаров нового поколения [3]. Отсутствие боковых лепестков в функции неопределенности такого сигнала важно для локации целей на фоне помех или групповых целей с различными характеристиками рассеяния, а малая величина длительности импульса позволяет обнаружить цели в непосредственной близости от РЛС. Развитие данного направления в радиолокации связано с прогрессом в создании источников мощных зондирующих сигналов наносекундной длительности. В табл.3 приведены ключевые параметры существующих и разрабатываемых перспективных РЛС X-диапазона частот.

Из данных, указанных в табл.3, следует, что генераторные модули на основе безнакальных магнетронов – перспективное решение для использования в радарх с высоким разрешением целей и дальностью действия до нескольких десятков километров. Преимущества данных радаров заключаются в высоком разрешении по дальности и малой протяженности "мертвой" зоны.

## ТЕХНОЛОГИИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Разработанные установки с компрессией СВЧ-импульсов применяются в основном для определения критериальных уровней воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. В отличие от традиционных микросекундных СВЧ-импульсов наносекундные импульсы излучения легче проходят через устройства защиты и электромагнитные экраны, достигая функциональных элементов радиоэлектронных систем, которые наиболее подвержены влиянию электромагнитных полей.

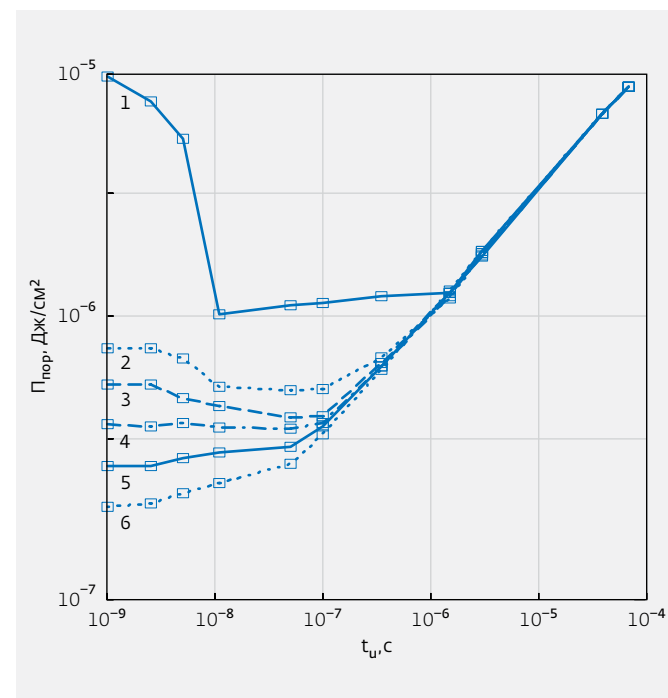
**Таблица 2.** Оценка параметров излучения на выходе генераторных модулей с компрессией импульса безнакальных магнетронов

Тип магнетрона	Импульсная мощность, МВт	Длительность импульса, Нс	Частота повторения, кГц
МИ-461	0,3–1,5	1–10	1–5
МИ-463А	0,1–0,4	1–10	1–5

Таблица 3. Параметры перспективных РЛС X-диапазона частот

Вид зондирующего сигнала	Сложный с базой $10^2$ – $10^6$	Импульсный длительно- стью 40–1000 нс	Импульсный длительно- стью 1–10 нс
Боковые лепестки в функции неопределенности	Соотношение 13–20 дБ	Отсутствуют	Отсутствуют
Тип передающего устройства	Твердотельные усилители СВЧ-колебаний	Электроракуумные генераторы и усилители	Электроракуумные генераторы СВЧ-колебаний с компрессией импульса
Средняя мощность излучения, определяющая энергетический потенциал РЛС, Вт	0,1–50	1–100	0,5–50
Разрешение по дальности, м	0,5–10	6–150	0,15–1,5
Протяженность "мертвой" зоны обзора, м	50–100	6–150	0,15–1,5

При воздействии такого излучения на полупроводниковые приборы в них протекают физические процессы, приводящие к изменению электрических параметров или полному их разрушению и выходу из строя.



Зависимости пороговой плотности СВЧ-энергии 10-см диапазона длин волн, достаточной для сбоя программы тестирования ячеек памяти компьютера, от длительности импульсов при различных частотах повторения: 1 – одиночные импульсы; 2–25 Гц; 3–50 Гц; 4–100 Гц; 5–200 Гц; 6–400 Гц

Для оценки эффективности применения резонансной СВЧ-компрессии импульсов на выходе СВЧ-генераторов воспользуемся результатами исследований воздействия на компьютер [4]. На рисунке представлены зависимости пороговых плотностей энергии импульсов излучения, при которых возникали сбои в работе компьютера, от длительностей импульсов и частот повторения. Из рисунка видно, что наименее энергоемкий механизм поражения наблюдается при уменьшении длительности СВЧ-импульсов и росте частот повторения.

При облучении наносекундными импульсами требуется большая плотность потока мощности, чем при облучении микросекундными импульсами. Однако по мере увеличения частоты повторения она снижается.

Оценки показывают, что рассмотренные выше установки с выходным излучением гигаваттного уровня и антенной с коэффициентом усиления 30 дБ позволяют воздействовать на объекты, подобные компьютеру, на расстоянии до 1 км. Дальность воздействия можно увеличить, если использовать несколько компрессоров с питанием от синхронизированных источников. Были проведены эксперименты по суммированию излучения из двух синхронно функционирующих резонансных компрессоров со сверхразмерными накопительными резонаторами, работающими в 3- и 10-см диапазонах [4]. Физической основой для сложения импульсов является когерентность входных и выходных сигналов при синхронном возбуждении накопительных резонаторов.

\*\*\*

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать ряд выводов. Реализация резонансной компрессии энергии СВЧ-импульсов традиционных узкополосных генераторов не требует дополнительной подготовки производственно-технологических мощностей для изготовления серийных образцов. Повышение более чем на порядок мощности импульсов традиционных СВЧ-генераторов дает возможность в сжатые сроки разрабатывать передающие модули РЛС различного назначения.

Результаты исследований подтверждают возможность создания на базе серийных и разрабатываемых безнакальных магнетронов производства ОАО "Плутон", а также резонансных СВЧ-компрессоров X-диапазона частот, генераторных модулей, для которых параметр  $P \cdot F^2$  (где  $P$  – выходная мощность и  $F$  – рабочая частота излучения) может достигать величины  $1,5 \cdot 10^{26}$  Вт·Гц<sup>2</sup>. Такие генераторные модули могут быть использованы при создании высокоинформативных радаров с высоким разрешением целей и средств электромагнитного воздействия на электронные системы различного назначения. Практическая реализация принципов сложения колебаний нескольких модулей открывает возможность объединения отдельных модулей

в общей излучающей системе с целью повышения энергетического потенциала генераторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Чумерин П., Юшков Ю., Ваулин В. и др.** Источник мощного СВЧ-излучения наносекундной длительности трехсантиметрового диапазона длин волн. – ПТЭ, 2009, № 4, с. 107–112.
2. **Манько А., Слинко В., Чумерин П. и др.** Установка с резонансной импульсной компрессией для получения мощных сверхвысокочастотных импульсов двухсантиметрового диапазона. – ПТЭ, 2004, № 3, с. 106–109.
3. **Новиков С., Чумерин П., Шпунтов Ю. и др.** Способ наносекундной радиолокации с резонансной компрессией импульса передатчика. Патент РФ на изобретение № 2356065 от 08.05.2007.
4. **Бродский С., Манько А., Сырбу И. и др.** Перспективные направления развития средств функционального поражения РЭС на основе реализации технологии резонансной компрессии СВЧ импульсов. Инновации в авиационных комплексах и системах военного назначения. Вопросы радиоэлектронной борьбы и информационного противоборства (часть 8). Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 26 ноября, 2009. Военный авиационный инженерный университет, 2009, с. 21–25.