

УДК 621.372

## УСТАНОВКА С РЕЗОНАНСНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ КОМПРЕССИЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МОЩНЫХ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДВУХСАНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2004 г. А. Н. Манько\*, В. Н. Слинко, П. Ю. Чумерин, Ю. Г. Юшков

ГНУ «НИИ ядерной физики при Томском политехническом университете»

Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 2а

\*Пятый Центральный научно-исследовательский испытательный институт

Россия, 394052, Воронеж, ул. Краснознаменная, 153

Поступила в редакцию 26.09.2003 г.

После доработки 12.11.2003 г. Описан источник мощных с.в.ч.-импульсов двухсантиметрового диапазона длин волн с резонансной импульсной компрессией, позволяющей осуществлять ступенчатую регулировку длительности выходных импульсов от 1 нс до 1.5 мкс с частотой следования от 200 Гц до 1.5 кГц и пиковой мощности от 58 кВт до 10 МВт. Источник может быть использован для проведения исследований взаимодействия электромагнитного излучения с различными объектами.

Для изучения взаимодействия электромагнитного поля с веществом, электронными приборами, биологическими объектами и др. необходимы мощные источники однократного и импульсно-периодического с.в.ч.-излучения длительностью  $10^{-11}$ – $10^{-6}$  с [1–4]. Одно из наиболее перспективных направлений создания таких источников связано с использованием технологии получения сверхкоротких импульсов (с.к.и.) методом резонансной импульсной компрессии энергии непрерывного или импульсно-периодического излучения микросекундной длительности [5]. При реализации данной технологии появляется возможность получения на выходе одного прибора импульсов, длительность которых регулируется в диапазоне от непрерывного излучения до одного периода колебаний несущей частоты.

Излучение с минимальной длительностью до 100 нс обеспечивается с помощью традиционных источников с.в.ч. на базе классических электровакуумных приборов и модуляторов с частичным разрядом накопителя энергии. Применение устройств резонансной импульсной компрессии позволяет реализовать на выходе этих приборов, генерирующих с.в.ч.-импульсы длительностью  $t_n$ , более короткие импульсы  $t_b$  с одновременным увеличением пиковой мощности в  $\eta_n \eta_b t_n / t_b$  раз, где  $\eta_n$  – к.п.д. накопления,  $\eta_b$  – к.п.д. вывода. Величина  $\eta_b$  составляет 70–90% и определяется эффективностью работы коммутатора. Величина  $\eta_n$  может быть определена параметрами резонансной системы (собственной добротностью  $Q_0$ , коэффициентом связи с возбуждающим трактом  $\beta$ , постоянной времени резонатора  $\tau = 2Q_0/\omega(1 + \beta)$ ) и параметрами генератора (несущей частотой ге-

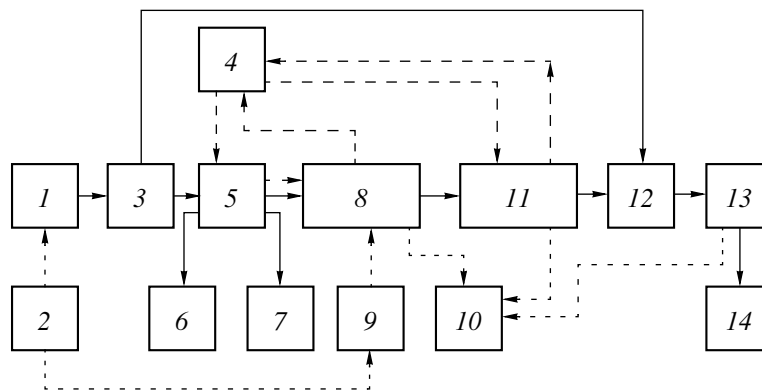
нерации  $\omega$  и длительностью импульсов  $t_n$ ) с помощью соотношения [6]

$$\eta_n = \frac{2\beta}{1 + \beta} \frac{\tau}{t_n} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_n}{\tau}\right)\right)^2. \quad (1)$$

В данной работе описан макет установки, созданный на базе серийного магнетронного передатчика радиолокационной станции двухсантиметрового диапазона длин волн и резонансных импульсных компрессоров. Установка обеспечивает ступенчатую регулировку длительности импульсов электромагнитного излучения в диапазоне от 1 до 1500 нс.

Упрощенная схема установки приведена на рис. 1. Магнетронный с.в.ч.-передатчик 1 обеспечивает режимы генерации со следующими выходными параметрами: длительность импульсов – 1500, 800, 300 нс, частота следования соответственно 200, 600, 1500 Гц и импульсная мощность 58 кВт. В передатчике для ступенчатой регулировки длительности и частоты следования импульсов использована схема построения модулятора с частичным разрядом емкостного накопителя энергии.

Два волноводных электромеханических переключателя 3, 12 обеспечивают микросекундный или наносекундный режимы работы установки. В микросекундном режиме излучение, генерируемое магнетроном, поступает на вход направленного ответвителя 13, а с его выхода в антенну или эквивалент антенны 14. В наносекундном режиме импульсы магнетрона поступают на вход фазового циркулятора 5, предназначенного для согласования магнетрона с резонансным импульсным компрессором 8. Циркулятор имеет прямые поте-



**Рис. 1.** Блок-схема установки резонансной компрессии с.в.ч.-энергии. 1 – с.в.ч.-передатчик; 2 – блок управления; 3, 12 – волноводные электромеханические переключатели; 4 – система газового наполнения; 5 – фазовый циркулятор; 6, 7 – нагрузки циркулятора; 8 – компрессор первой ступени компрессии; 9 – блок запуска разрядника; 10 – система индикации и измерения параметров сигнала; 11 – компрессор второй ступени; 13 – ответвитель; 14 – эквивалент антенны.

ри 0.2 дБ и обеспечивает развязку между плечами, подключенными к компрессору и к выходу магнетрона, равную 30 дБ. С помощью нагрузок 6, 7 осуществляется поглощение мощности волн, отраженных от входа компрессора в процессе возбуждения его резонансной системы.

Для реализации импульсно-периодического режима излучения наносекундной длительности импульсов используются три компрессора.

Выбор конструкции первого компрессора определялся возможностью получения на выходе установки импульсов с максимальной величиной пиковой мощности. Для этого с.в.ч.-передатчик переводился в режим излучения с длительностью импульсов 1500 нс, следующих с частотой 200 Гц. Анализ соотношения (1) показывает, что для получения к.п.д. компрессии более 10–20% резонансная система компрессора должна быть выполнена с использованием сверхразмерного высокодобротного резонатора. Возможности увеличения добротности резонатора путем увеличения его объема ограничиваются проблемами селекции типов колебаний. С учетом этого ограничения был изготовлен компрессор, резонансная система которого имела собственную добротность 35000. Отстройка колебаний рабочего типа относительно ближайшего паразитного составляла 50 МГц.

В компрессоре реализован принцип формирования с.к.и., который основан на выводе энергии из сверхразмерного объемного резонатора с помощью интерференционного переключателя за счет изменения коэффициента межвидового взаимодействия на окне связи между резонатором и переключателем [5]. Резонансная система компрессора состоит из цилиндрического медного резонатора с внутренним диаметром 44 мм и переключателя на основе волноводного тройника Н-типа, изготовленного из медных волноводов стандартного сечения  $16 \times 8$  мм<sup>2</sup>. В резонаторе и

тройнике возбуждались колебания типа  $H_{12,11}$  и  $H_{10}$  соответственно. Боковое плечо тройника оканчивалось короткозамкнутой стенкой. На расстоянии четверти длины волны в волноводе от короткозамкнутой стенки размещался коммутатор тригatronного типа. Конструкция коммутатора описана в [7]. Запуск коммутатора осуществлялся высоковольтными импульсами, поступающими из блока запуска разрядника 9.

Установка с первым компрессором обеспечивала режим излучения с длительностью импульсов 10 нс, частотой повторения 200 Гц и пиковой мощностью 1624 кВт. Коэффициент усиления составлял 14.4 дБ, к.п.д. компрессии 18.7%. Напряженность поля в элементах конструкции компрессора была не менее 100 кВ/см.

Для дальнейшего увеличения пиковой мощности импульсов на выходе установки и преодоления проблем, связанных с электрической прочностью элементов конструкции компрессора, использовалась известная схема двухступенчатой последовательной компрессии [7]. Первый компрессор (8) осуществлял предварительное сжатие энергии импульса генератора. На выходе первого компрессора размещался один из двух компрессоров (11), которые обеспечивали дальнейшее сокращение импульса генератора до требуемого значения. С использованием данной схемы в установке реализовано два режима излучения разной длительностью. Один из дополнительных компрессоров обеспечивал режим излучения длительностью 2.5 нс, а другой – 1 нс. Оба компрессора выполнены на базе волноводных тройников Н-типа. В одном плече тройника размещалась индуктивная диафрагма, через которую происходило возбуждение резонансной системы компрессора. Другое плечо соединялось с нагрузкой, а третье оканчивалось короткозамкнутой стенкой. Принцип формирования с.к.и. в таком компрессоре

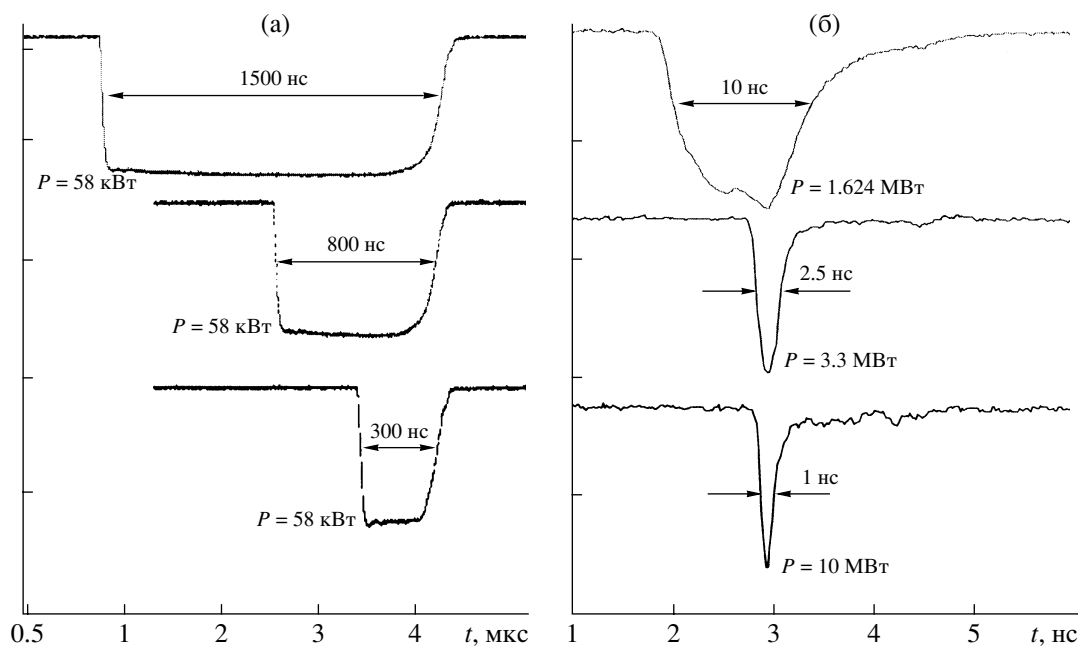


Рис. 2. Осциллограммы импульсов в режиме формирования микросекундных (а) и наносекундных (б) импульсов.

ре основан на выводе энергии, накопленной в отрезке волноводной линии между диафрагмой и осью симметрии тройника, после изменения коэффициента связи с нагрузкой с помощью интерференционного переключателя [5]. Длительность сформированных импульсов определяется временем двойного пробега волны вдоль этой линии. Конструкция переключателя была аналогична конструкции, используемой в первом компрессоре.

Резонансная система компрессоров изготовлена из стандартных медных волноводов сечением  $16 \times 8$  мм<sup>2</sup>. Колебанием рабочего типа являлась волна  $H_{01,10}$  при формировании импульсов длительностью 2.5 нс и  $H_{01,5}$  при формировании импульсов длительностью 1 нс. Собственная добротность резонансной системы компрессоров составляла 3300 и 3200 соответственно.

На выходе установки с двухступенчатой системой компрессии при использовании одного из дополнительных компрессоров сформированы импульсы длительностью 2.5 нс с пиковой мощностью 3.3 МВт или импульсы длительностью 1 нс с пиковой мощностью 10 МВт. Коэффициент усиления двухступенчатой системы компрессии составлял соответственно 17.5 и 22.4 дБ, к.п.д. компрессии 9.5 и 11.5%, а напряженность поля в элементах конструкции была не менее 140 и 250 кВ/см.

Установка также обеспечивает излучение импульсов наносекундной длительности с частотой повторения до 1.5 кГц. В этом режиме магнетронный генератор вырабатывает импульсы длительностью 300 нс. Один из дополнительных компрессоров размещается на выходе циркулятора. Пиковая

мощность импульсов, измеренная на выходе установки, работающей в данном режиме, составляла 300 и 580 кВт, коэффициент усиления компрессоров 7.14 и 10 дБ, а к.п.д. компрессии 4.31 и 3.33% соответственно.

Расчетные значения коэффициента усиления компрессоров при данном режиме возбуждения составляют соответственно 11.5 и 15.4 дБ. Отличие расчетных значений коэффициента усиления от измеренных объясняется тем, что конструкция компрессоров не предусматривала регулировку входной связи при смене длительности импульса возбуждения.

Для обеспечения электрической прочности циркулятора и компрессоров первой и второй ступеней сжатия использовался азот. Рабочее давление в компрессоре первой ступени и циркуляторе составляло 3–4 атм. Рабочее давление в компрессоре второй ступени компрессии составляло 1–2 атм. Прозрачные для радиоизлучения окна из лавсана, размещенные на выходе первой и второй ступенях компрессии, обеспечивали необходимый перепад давления. Наполнение, сброс и контроль за давлением газа осуществляется посредством газовой системы 4.

С помощью ответвителя 13 и системы индикации 10 контролировались процессы накопления энергии в резонансных системах компрессоров и параметры выходного излучения. Форма, длительность и частота повторения импульсов измерялись с помощью осциллографа TDS-3. Пиковая мощность на выходе установки определялась по

Таблица

Параметр	С.в.ч. передатчик	Установка с 1-м компрессором	Установка с компрессором 2.5 нс	Установка с компрессором 1 нс	Установка с двухступенчатой компрессией	
Длительность импульса, нс	1500, 800, 300	10	2.5	1	2.5	1
Пиковая мощность, кВт	58	1624	300	580	3300	10000
Частота следования, Гц	200, 600, 1500	200	1500	1500	200	200
Потребляемая мощность от сети, Вт	1600	2000	2000	2000	2000	2000
Масса, кг	80	99.7	99	98.9	100	99.9
Объем, м <sup>3</sup>	0.166	~0.213	~0.213	~0.213	~0.213	~0.213

средней мощности, измеренной ваттметром МЗ-22 с термисторной головкой типа М5-43.

С помощью переменного аттенюатора ДЗ-34А определялась пиковая мощность импульсов на выходе установки, собранной для реализации режимов излучения, предполагающих использование схемы двухступенчатой компрессии. Для этого применялся метод сравнения амплитуды этих импульсов с амплитудой импульсов, измеренных на выходе компрессора первой ступени сжатия. На рис. 2 приведены огибающие импульсов с.в.ч. на выходе магнетронного генератора (рис. 2а), компрессоров первой и второй ступени (рис. 2б).

Конструктивно передатчик с.в.ч. 1 (рис. 1), блок управления 2 и блок запуска разрядника 9 размещены в отдельной стойке. Газовая система 4 выполнена в виде отдельного блока. Циркулятор 5, компрессоры первой (8) и второй ступени (11), электромеханические переключатели 3, 12 размещаются на несущих элементах снаружи стойки.

Питание установки осуществлялось от сети ~115 В, 400 Гц и +27 В. Основные параметры установки приведены в таблице.

Результаты исследования установки показывают, что на основе с.в.ч.-передатчиков радиолокационной станции двухсантиметрового диапазона длин волн и резонансных компрессоров возможно создание установок с регулируемой длительностью импульсов в диапазоне от нескольких микросекунд до единиц наносекунд. Дополнительный на-

носекундный режим излучения связан с введением резонансных компрессоров и вспомогательного оборудования, обеспечивающего их функционирование. Это увеличивает энергопотребление установки на 12.5%, массу на 25% и объем на 28.6%.

Использование методов последовательной компрессии позволило в двухсантиметровом диапазоне впервые получить с.в.ч.-импульсы длительностью 1 нс и пиковой мощностью 10 МВт. Коэффициент компрессии импульса генератора в этом случае составлял 1500, усиление пиковой мощности 23 дБ, а к.п.д. компрессии 11.5%.

В заключение авторы выражают благодарность В.А. Августиновичу, С.Н. Артеменко, В.Л. Каминскому за интерес к работе и помощь в создании установки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юшков Ю.Г., Чумерин П.Ю., Артёменко С.Н. и др. // РЭ. 2001. Т. 46. № 7. С. 1.
2. Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. М.: Наука, 2000.
3. Морозов Г.А. // Антенны. 1998. Вып.1 (40). С. 88.
4. Антипин В.В., Годовицин В.А., Громов Д.В. и др. // Зарубеж. радиоэлектрон. 1995. № 1. С. 37.
5. Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984.
6. Новиков С.А., Разин С.А., Юшков Ю.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30. С. 1520.
7. Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. // ПТЭ. 2000. № 3. С. 85.