

Экспериментальные исследования системы накопления энергии ВЧ-поля с резонансной нагрузкой

Б.Ю.Богданович, А.П.Игнатъев, В.А.Сенюков

Московский государственный инженерно-физический институт, Москва, Россия

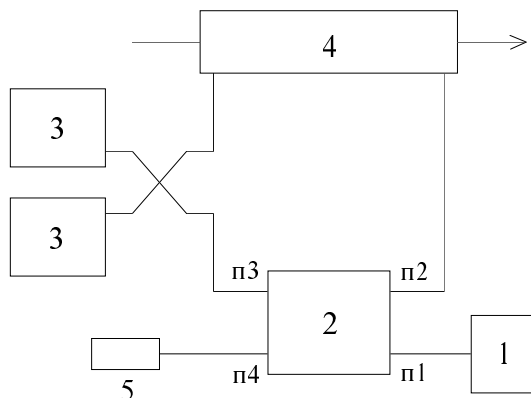
В настоящее время известно достаточно много типов и конструкций систем компрессии энергии ВЧ-поля, предназначенных для увеличения импульсной мощности ускоряющей ВЧ-волны и обладающих различными свойствами [1]. Среди этих систем определенным интерес для практического использования представляют системы с резонансной нагрузкой. Основное отличие таких систем компрессии от систем других типов заключается в том, что здесь нагрузка является существенным элементом, от параметров которой в значительной степени зависят параметры всей системы. Их также можно назвать системами со связанными резонаторами.

Основные принципы работы системы

Принцип работы систем компрессии с резонансной нагрузкой основан на том, что при определенных параметрах системы из двух связанных резонаторов энергия, накопленная в одном из них, полностью переходит поочередно то в один резонатор, то в другой. При этом, в первом приближении, можно считать, что отношение максимальных эквивалентных мощностей ВЧ-волны в этих резонаторах определяется выражением

$$P_1/P_2 = Q_2/Q_1, \quad (1)$$

Рис.1. Система компрессии энергии ВЧ-поля с резонансной нагрузкой.
(1 - ВЧ-генератор;
2 - коммутирующее устройство;
3 - накопительные резонаторы;
4 - ускоряющая секция;
5 - поглощающая нагрузка).



где P_1 и P_2 – эквивалентные мощности ВЧ-волны в первом и втором резонаторах; Q_1 и Q_2 – собственные добротности первого и второго резонаторов. Из выражения (1) следует, что чем больше отношение добротностей резонаторов, тем большее повышение эквивалентной мощности может быть достигнуто.

Вариант системы компрессии энергии с резонансной нагрузкой представлен на рис.1 [2]. Здесь ускоряющая секция 4 является частью резонатора с бегущими волнами. Перевод системы из режима накопления энергии в режим использования осуществляется с помощью коммутатора 2. В одном состоянии коммутатора (состояние (А)) ВЧ-волна, поступающая на плечо П1 коммутатора, выходит из плеча П3, а волна поступающая на

плечо П2, — из плеча П4. В другом состоянии (состояние (Б)) плечи П3 и П4 меняются местами. При этом генератор 1 оказывается подключенным к нагрузке 5, а вход и выход ускоряющей секции 4 замкнуты в кольцо через накопительные резонаторы 3, образуя резонатор с бегущими волнами (РБВ).

Работает устройство следующим образом. Когда коммутатор находится в состоянии (А), происходит накопление энергии в резонаторах 3. Волна, отражаемая от накопительных резонаторов (НР), проходит по кольцу РБВ и поступает в нагрузку 5. По окончании процесса накопления ВЧ-генератор выключается, а коммутатор переводится в состояние (Б). При этом волной, падающей на НР, является волна, выходящая из ускоряющей секции. Фазовый набег волны в кольце РБВ выбирается так, чтобы падающая на НР волна складывалась в одной фазе с волной, излучаемой их них. Тогда после каждого оборота амплитуда волны, циркулирующей по кольцу РБВ, будет возрастать до тех пор, пока вся накопленная в НР энергия не перейдет в РБВ. После этого начнется обратная перекачка энергии из РБВ в НР. Качественный график изменения усредненной амплитуды волны, циркулирующей в РБВ, приведен на рис.2.

Если потери в РБВ незначительны, то коэффициент повышения мощности в такой системе можно оценить по следующему выражению:

$$K_p = P_k / P_o = W_H / (T \cdot P_k) , \quad (2)$$

где P_k и P_o — мощности ВЧ-волны в РБВ и на выходе генератора, соответственно; W_H — накопленная в резонаторах энергия; T — время одного оборота волны по кольцу.

Практически достижимые величины коэффициента K_p в такой системе могут составлять 150...200 (для НР с собственной добротностью $Q_o \sim 10^5$) и более (при использовании сверхпроводящих НР). При этом время "существования" в РБВ волны с такой мощностью оказывается примерно на порядок больше, чем при сбрасывании импульса на активную нагрузку.

Расчетные соотношения

Для амплитуды волны, отраженной от резонаторов в течение рабочего цикла системы (рис. 1), имеем следующее выражение:

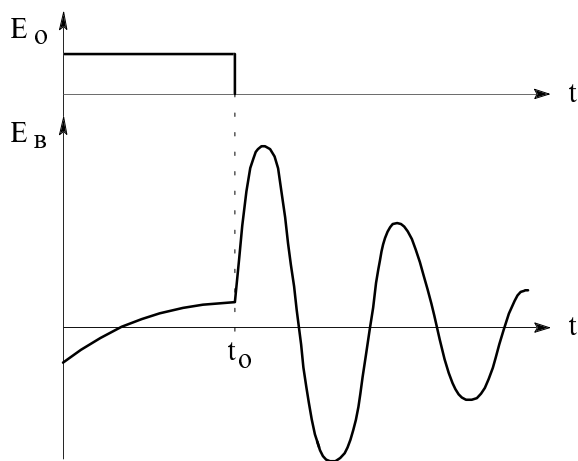


Рис.2. Графики изменения амплитуды ВЧ-волн в системе компрессии с резонансной нагрузкой (E_o - волна генератора; E_B - волна в РБВ).

$$E_B(t) = \begin{cases} \left(-\frac{2\beta}{1-\beta}(1-e^{-t/\tau})+1\right) \cdot E_0, & \text{для } 0 \leq t < t_0 \\ \sum_{n=0}^N E_{B(n)}(t), & \text{для } t \geq t_0 \end{cases} \quad (3)$$

Здесь использованы обозначения: E_0 – амплитуда волны ВЧ-генератора; $\tau = Q_0/\pi f_0(1+\beta)$ – постоянная времени НР (Q_0 – собственная добротность, f_0 – собственная частота); t – текущее время от момента коммутации; α – затухание в РБВ;

$$E_{Bn}(t) = -\frac{2\beta}{1+\beta} \cdot E_0 \left(1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}}\right) \cdot e^{-n\alpha} \times \\ \times e^{-\frac{t-t_0-T}{\tau}} \cdot F(-n, 1, A)$$

где $F(-n, 1, A) = \sum_{k=0}^n \frac{C_n^k}{k!} (-1)^k A^k$ – вырожденная гипергеометрическая функция Куммера;

$$A = \frac{2\beta}{1+\beta} \cdot \frac{t-t_0-nT}{\tau};$$

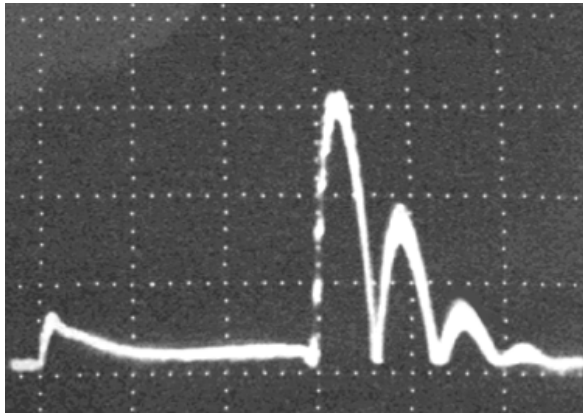
$n = [(t-t_0)/T]$ – число оборотов волны по кольцу РБВ. Поскольку ускоряющая секция в этой системе является частью РБВ, то выражение (3) описывает также и амплитуду волны на входе ускоряющей секции.

Результаты экспериментов

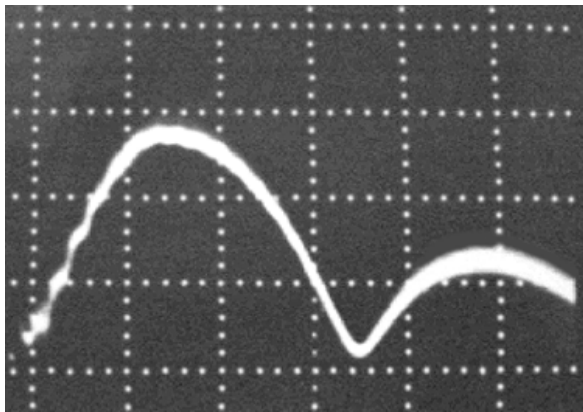
Экспериментальные исследования системы компрессии энергии ВЧ-поля с накоплением энергии в резонаторах и с резонансной нагрузкой проводились на уровнях мощности ВЧ-генератора до 100 кВт в 10-см диапазоне длин волн. Для накопления энергии в исследуемой системе использовались медные цилиндрические резонаторы с колебаниями типа H_{015} с собственной добротностью $Q_0 = 90 \cdot 10^3$ и коэффициентом связи $\beta=6$. А в качестве РБВ резонатора использовался резонатор, выполненный из отрезков гладкого прямоугольного волновода сечением 72×34 мм². Для коммутации ВЧ-волн в системе применялись волноводные разрядники. На этом уровне мощности эксперименты проводились при двух значениях длины кольца РБВ: с длительностью периода одного оборота волны 40 и 24 нс. Общие потери в кольце, определяемые в основном неидеальностью регулируемого ответвителя, в обоих случаях составляли около 0,05.

Типичные осциллограммы огибающей ВЧ-импульса в кольце РБВ в период использования накопленной энергии приведены на рис.3.

Результаты измерений и расчетная зависимость (по выражению (5)) максимальной амплитуды волны в РБВ $E_{вм}$ для рассматриваемых параметров системы от длительности периода накопления энергии t_0 приведены на рис.4. Измерения и расчеты проводились



(1 деление - 1 мкс)



(1 деление - 200 нс)

Рис.3. Осциллограммы огибающих ВЧ-импульса в кольце РБВ.

находился под атмосферным давлением, а максимальная мощность волны в РБВ примерно соответствовала электрической прочности используемых волноводов (сечением $72 \times 34 \text{ мм}^2$), т.е. порядка 2- 2,5 МВт.

Поскольку в данном случае коммутация для изменения режима работы системы производится на высоком уровне мощности, то необходимо использование разрядников, что несколько ограничивает возможности применения таких систем. Однако в качестве положительного момента следует отметить, что здесь разрядники в открытом состоянии (т.е. в отсутствии разряда) работают только на уровне мощности питающего ВЧ-генератора. Это позволяет значительно упростить конструкцию разрядника и управляющего высоковольтного модулятора, а в ряде случаев (при не очень больших мощностях) использовать для коммутации твердотельные устройства.

для кольца с длительностью одного оборота $T = 40 \text{ нс}$. При измерениях максимального значения коэффициента увеличения мощности K_p в системе при $t_o = 2,5 \text{ мкс}$ получены следующие результаты: для кольца с $T = 40 \text{ нс}$ $K_p = (15,0 \pm 0,5) \text{ дБ}$ (~ 32 раза); для кольца с $T = 24 \text{ нс}$ $K_p = (17,0 \pm 0,5) \text{ дБ}$ (~ 50 раз). Расчетные значения $K_p = 14,9$ и $16,8 \text{ дБ}$ соответственно.

Был также проведен ряд экспериментов по исследованию работы системы при мощности ВЧ-генератора до 100 кВт. В этих экспериментах высоковольтный модулятор разрядников использовался только для инициализации разряда, а формирование плазмы в разрядном промежутке осуществлялось за счет мощности падающей ВЧ-волны. Оказалось, что в таком варианте система также работоспособна. При этом, как и следовало ожидать, несколько снижался коэффициент увеличения мощности ВЧ-волны (из-за потерь в разрядниках при формировании плазмы). При входной мощности около 100 кВт измеренное значение коэффициента K_p составило $(14 \pm 0,5) \text{ дБ}$ (~ 25 раз).

Дальнейшее увеличение входной мощности приводило к возникновению пробоев в кольце РБВ, так как тракт

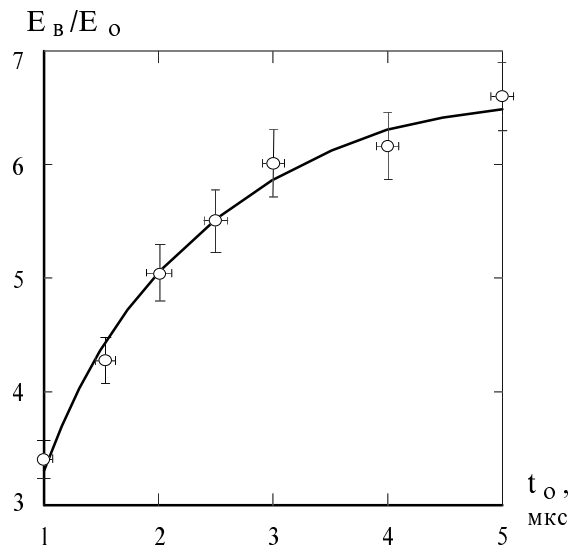


Рис.4. Зависимость максимальной амплитуды волны в РБВ E_B/E_0 длительности периода накопления энергии t_0 .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Shalnov A., Bogdanovich B., Ignatyev A., Senyukov V. RF-power Upgrade Systems with Energy Compression for Electron Linacs. (1995 Particle Accelerator Conference). 1995.
- [2] Игнатьев А.П., Сеньюков В.А. Система высокочастотного питания ускорителя заряженных частиц. А.С. № 1832406, Россия, МКИ 5Н05Н7/02, Приоритет от 25.12.1990 г.