

Расчёт резонансных нагрузок в линейных ускорителях электронов с бегущей волной

А.В. Рябцов

*Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия*

В линейных ускорителях электронов с бегущей волной применяются оконечные нагрузки двух типов – внешние и встроенные резонансные. Резонансная нагрузка создаётся на основе нескольких последних ячеек ускоряющего волновода. Остаточная ВЧ-мощность поглощается кольцевыми альсиферовыми полосками различной ширины, нанесёнными на внутреннюю цилиндрическую поверхность ячеек.

К числу достоинств резонансной нагрузки относятся более полное использование ВЧ-энергии на ускорение (или торможение) электронов, простота конструкции, малые габариты и стоимость. Основным недостатком в сравнении с внешней нагрузкой является меньший верхний предел рассеиваемой ВЧ-мощности.

Предположим, что резонансная нагрузка состоит из N одинаковых ячеек, в которых для исключения локального перегрева потери распределены равномерно. Для расчёта воспользуемся теорией связанных контуров [1, 2]. Будем учитывать только коэффициенты связи k между соседними ячейками. Комплексное контурное уравнение для n -ой ячейки имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{k}{2}(X_{n-1} + X_{n+1}) + a_n X_n &= 0, & n = 1, 2, \dots, N-1, \\ \frac{k}{2}X_{N-1} + a_N X_N &= 0, \\ a_n &\equiv 1 - \left(\frac{f_n}{f_g}\right)^2 - j\frac{f_n}{f_g Q_n}, & n = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь f_n и f_g – собственная частота ячейки и частота поля ВЧ-генератора; Q_n – добротность; $X_n \equiv A_n e^{j\theta_n}$ – комплексная функция отклика; A_n – вещественная амплитуда; θ_n – фаза. Индекс $n = 0$ относится к последней ячейке основной части ускоряющей структуры; при этом полагаем $\theta_0 = 0$ и $X_0 = A_0$.

Пусть нагрузка работает на ψ -виде колебаний, так что

$$\frac{X_{n+1}}{X_n} = \frac{A_{n+1}}{A_n} e^{-j\psi}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (2)$$

Разделяя вещественные и мнимые части в уравнениях (1) для нагрузки, находим

$$\frac{f_n}{f_g} = \sqrt{1 + \frac{k}{2} \frac{A_{n-1} + A_{n+1}}{A_n} \cos \psi}, \quad \frac{A_{n-1} - A_{n+1}}{A_n} = 2 \frac{f_n}{f_g} \frac{1}{k Q_n \sin \psi} \equiv U_n, \quad (3)$$

$$\frac{f_N}{f_g} = \sqrt{1 + \frac{k}{2} \frac{A_{N-1}}{A_N} \cos \psi}, \quad \frac{A_{N-1}}{A_N} = 2 \frac{f_N}{f_g} \frac{2}{k Q_N \sin \psi} \equiv U_N. \quad (4)$$

Далее, составим уравнение баланса мощности [3], умножив (1) на $j X_n^* \omega_g$ ($\omega_g \equiv 2\pi f_g$) и выделив из получившегося соотношения вещественную часть:

$$-\operatorname{Re}\left(j \frac{k \omega_g}{2} X_{n-1} X_n^*\right) = \frac{\omega_n A_n^2}{Q_n} + \operatorname{Re}\left(j \frac{k \omega_g}{2} X_{n+1} X_n^*\right). \quad (5)$$

Члены в порядке слева направо описывают поток ВЧ-мощности, втекающий в n -ю ячейку, мощность джоулевых потерь в n -ой ячейке и поток ВЧ-мощности, вытекающий из неё; A_n^2 – запасённая энергия в n -ой ячейке. Из условия равенства ВЧ-потерь в отдельных ячейках получаем

$$\operatorname{Re}\left(j \frac{k \omega_g}{2} X_{n+1} X_n^*\right) = \frac{k \omega_g}{2} \sin \psi A_n A_{n+1} = (N-n) \frac{\omega_n A_n^2}{Q_n} \quad (6)$$

$$\text{и} \quad \frac{A_{n+1}^2}{A_n^2} = \frac{f_n}{f_{n+1}} \frac{Q_{n+1}}{Q_n} = \frac{U_n}{U_{n+1}}. \quad (7)$$

Исключая из (6) и (7) отношение A_{n+1}/A_n , находим

$$U_{n+1} = \frac{1}{(N-n)^2} \frac{1}{U_n}, \quad n = 1, \dots, N-1. \quad (8)$$

Через переменную U_n можно выразить собственные частоты и добротности ячеек нагрузки:

$$\frac{f_n}{f_g} = \sqrt{1 + \left(N - n + \frac{1}{2}\right) k \cos \psi U_n} \quad \text{и} \quad Q_n = \frac{2}{k \sin \psi} \frac{f_n}{f_g} \frac{1}{U_n}. \quad (9)$$

Остаётся определить граничное значение U_1 . Применяя выражение (6) ко входу в первую ячейку нагрузки, найдём

$$U_1 = \frac{1}{N} \frac{A_1}{A_0}. \quad (10)$$

Для определённости предположим, что размеры нескольких последних ускоряющих ячеек такие же, что и у ячеек нагрузки *). В режиме чисто бегущей волны имеет место соотношение

$$A_0/A_{-1} = e^{-\tau_o} \cong 1, \quad (11)$$

где A_{-1} – амплитуда функции отклика в предпоследней ячейке основной части; $\tau_o \ll 1$ – затухание поля на одной основной ячейке. Поскольку $k Q_0 \gg 1$ для основных ускоряющих ячеек, из уравнения (3) при $n = 0$ получаем с учётом (11)

$$A_1/A_0 = 1 - U_0 \cong 1 \quad \text{и} \quad U_1 \cong 1/N. \quad (12)$$

Формулы (8), (9) и (12) позволяют последовательно рассчитать параметры всех ячеек нагрузки. Отметим, что в частном случае $\psi = \pi/2$:

$$f_n = f_g, \quad Q_{n+1} = \left[\frac{2(N-n)}{k} \right]^2 \frac{1}{Q_n}, \quad Q_1 = \frac{2N}{k}. \quad (13)$$

Основной проблемой резонансных нагрузок является импульсный характер нагрева альсифера. Стойкость альсиферового покрытия по отношению к периодическим тепловым ударам пока недостаточно изучена. Вместе с тем двухлетний опыт эксплуатации дефектоскопа УЭЛВ-10-2Д-40 с энергией электронов 10 МэВ подтверждает перспективность резонансных нагрузок. В комбинированной ускоряющей структуре [4] этого ускорителя, работающей на $\pi/2$ -виде колебаний, нагрузка состоит из шести ячеек. Структура возбуждается клистроном КИУ-111 (2450 МГц, 5 МВт, 5 кВт). При нулевом токе пучка импульсная мощность потерь в одной ячейке нагрузки P_n составляет 0.36 МВт, а средняя – 0.36 кВт. Это в 6 раз больше максимальной мощности потерь в основных ускоряющих ячейках. Собственные частоты и размеры ячеек основной части структуры и нагрузки одинаковы. Коэффициент связи между ячейками $k = +0.56$ %. Расчётный КСВН не превышает 1.2 в полосе частот (2450±3) МГц. Значения добротностей, определённые по изложенной методике, приведены в табл. 1.

В проектируемом стерилизаторе УЭЛВ-10/5-15С на 10 МэВ в качестве ВЧ-источника используется клистрон КИУ-147 (2450 МГц, 5 МВт, 25 кВт). По сравнению с предыдущим примером длительность ВЧ-импульса возрастает с 6.7 до 11.1 мкс, а частота повторений – с 150 до 450 с⁻¹. Комбинированная структура содержит $2\pi/3$ – основной участок со ступенчато-убывающими коэффициентами связи между U -образными ячейками.

*) Это условие необязательно. Всегда можно согласовать волновые сопротивления отрезков структуры, вводя промежуточные ячейки, как это имеет место в структуре УЭЛВ-10/5-15С с $\pi/2$ -нагрузкой.

Ужесточение импульсного и циклического режимов нагрева предполагается компенсировать снижением ВЧ потерь в расчёте на одну ячейку и на единицу площади альсифера. Первое достигается увеличением числа ячеек нагрузки до десяти. При этом импульсные потери ВЧ-энергии в одной ячейке становятся такими же, что и в УЭЛВ-10-2Д-40. Снижение удельных потерь в альсифере достигается уменьшением поля в нагрузке. Действительно, поскольку имеют место пропорции

$$P_n \sim W_n / Q_n \sim W_n S_n \quad (14)$$

(W_n – запасённая ВЧ энергия; S_n – площадь альсиферовой полоски), то при заданной величине P_n , $S_n \sim 1/W_n$. В итоге, чтобы увеличить S_n , нужно поднять коэффициент связи между ячейками нагрузки. В варианте нагрузки, возбуждаемой на $\pi/2$ - виде колебаний, коэффициент связи взят равным 2.7%, тогда как в последних ячейках основной части он равен 0.63%. Согласование $\pi/2$ - нагрузки с $2\pi/3$ – основной частью структуры осуществляется ячейкой, настроенной на промежуточную частоту. Частота выбирается так, чтобы разность фаз согласующей ячейки с первой ячейкой нагрузки составляла бы $\pi/2$, а с предпоследней ячейкой основной части $-2\pi/3$. Данные табл. 1 указывают на значительное снижение добротностей ячеек $\pi/2$ -нагрузки в УЭЛВ-10/5-15С по сравнению с УЭЛВ-10-2Д-40. Соответственно уменьшаются и удельные импульсные ВЧ-потери в альсифере. Естественно, что в такой сложной структуре полосовая характеристика сужается. В данном случае КСВН ≤ 1.2 имеет место в полосе (2450 ± 0.5) МГц, что вполне достаточно для структуры, запитываемой от высокостабильного клистрона.

В качестве альтернативы этому, основному, варианту рассмотрена также $2\pi/3$ - нагрузка из 10 ячеек с коэффициентом связи 0.63%, как и у последних основных ячеек. Добротности и собственные частоты обеих нагрузок для УЭЛВ-10/5-15С также содержатся в табл. 1. При изменении добротностей ячеек резонансных нагрузок на $\pm 10\%$ КСВН холостого режима не превышает 1.05. Аналогично, расчёт показывает, что без ущерба для КСВН, ячейки $2\pi/3$ - нагрузки могут быть настроены на собственную частоту последнего основного участка равную 2446.16 МГц. Полосовые характеристики структур с $\pi/2$ - и $2\pi/3$ - нагрузками подобны друг другу.

На рис. 1 и 2 показаны поячеечные распределения амплитуд полей в ускоряющих структурах УЭЛВ-10 – 2Д-40 и УЭЛВ-10/5-15С, оканчивающихся $\pi/2$ - резонансными нагрузками. В обоих случаях ток пучка равен нулю. Первые 6 ускоряющих ячеек и 5 ячеек связи, включая ячейку ТТВ № 11, образуют $\pi/2$ -группирователь, работающий в режиме стоячей волны; на остальной части структуры возбуждается бегущая волна. Распределение амплитуды поля в отдельной ячейке имеет вид «колокольчика», проникающего через центральные отверстия до середин соседних ячеек. Плавность огибающей амплитуд указывает на высококачественное согласование, когда примесь отраженной волны минимальна. Небольшие пульсации амплитуд на основной части УЭЛВ-10/5-15С обусловлены разбросом собственных частот основных ячеек при последовательной настройке их на $2\pi/3$ -вид колебаний от нагрузки к группирователю.

Таблица 1

№	УЭЛВ-10-2Д-40		УЭЛВ-10/5-15С $\pi/2$ -нагрузка		УЭЛВ-10/5-15С $2\pi/3$ -нагрузка	
	f_n , МГц	Q_n	f_n , МГц	Q_n	f_n , МГц	Q_n
1	2450	2158	2450	741	2446.34	3678
2	2450	1499	2450	600	2445.96	2978
3	2450	1381	2450	585	2446.35	2906
4	2450	843	2450	460	2445.97	2280
5	2450	614	2450	429	2446.36	2135
6	2450	211	2450	320	2445.98	1584
7			2450	274	2446.38	1366
8			2450	180	2446.03	891
9			2450	122	2446.52	607
10			2450	45	2446.83	223

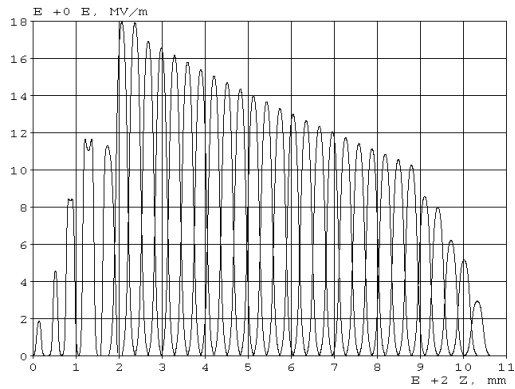


Рис. 1. Распределение амплитуд ускоряющего поля в действующем ускорителе УЭЛВ-10-2 Д-40.

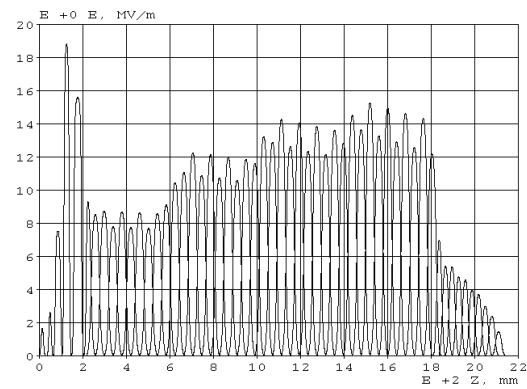


Рис. 2. Распределение амплитуд ускоряющего поля в ускорителе УЭЛВ-10/5-15С с $\pi/2$ - резонансной нагрузкой.

Автор признателен М.А. Калиниченко и Л.Ф. Ро за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. G.R. Swain. Proc. of the 1966 Linear Accelerator Conference, LANL-3609, 1966, pp. 125-131.
2. В.Ф. Викулов, В.Е. Калужный. ЖТФ, **52**, вып. 11, 1982, с. 2168-2176.
3. D.E. Nagle, E.A. Knapp, B.C. Knapp. Rev. Sci. Instrum., **38**, # 11, 1967, pp. 1583-1587.
4. Ю.П. Вахрушин, А.В. Рябцов, В.Л. Смирнов, В.В. Терентьев. Труды 13-го Совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 1, Дубна, 1993, с. 249-252.