

Модуляция протонного пучка линейного ускорителя по энергии

КАПЧИНСКИЙ И. М., БОБЫЛЕВ В. И.

УДК 621.384.643

При осуществлении некоторых способов многооборотной инжекции протонов в кольцевые ускорители или накопители необходимо менять среднюю энергию частиц на выходе линейного ускорителя-инжектора по закону, близкому к линейному, в течение импульса тока. В принципе энергию частиц можно менять дебанчером одновременно с разгруппировкой пучка. Для этого частота напряжения дебанчера должна быть смещена относительно частоты ускоряющего поля в инжекторе на величину

$$\Delta f = \Delta \varphi / 2\pi\tau, \quad (1)$$

где τ — длительность импульса протонного тока; $\Delta \varphi$ — фазовая протяженность используемого участка изменения напряжения в дебанчере. Величина $\Delta \varphi$ определяется допуском на линейность закона модуляции. Например, при допустимой относительной погрешности скорости изменения среднего импульса

$$\delta = \Delta \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta p_{ср}}{p_{ср}} \right) / \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta p_{ср}}{p_{ср}} \right)_{\max},$$

равной 0,1, и длительности пучка $\tau = 15$ мксек получим $\Delta \varphi = 0,90$ рад и $\Delta f = 9,54$ кГц.

Пусть в переменных $\psi = \varphi - \varphi_s$, $g = \frac{p - p_s}{p_s}$ (φ , p — фаза и импульс частицы) фазовый объем пучка на выходе линейного ускорителя ограничен эллипсом:

$$\frac{\psi^2}{\Psi_0^2} + \frac{g^2}{G_0^2} = 1. \quad (2)$$

Тогда на выходе дебанчера фазовый объем охватывается кривой

$$g = k \sin(\psi + \varphi_0) - k_0 \psi \pm \frac{v}{1 + a^2 v^2} \sqrt{(1 + a^2 v^2) \Psi_0^2 - \psi^2}, \quad (3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} v &= G_0 / \Psi_0; \quad a = \frac{2\pi}{\gamma^2} \cdot \frac{l}{\beta \lambda}; \\ k &= \frac{U_d T_d}{\beta^2 \gamma E_0}; \quad k_0 = \frac{a v^2}{1 + a^2 v^2}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

l — длина дрейфа до дебанчера; U_d , T_d — амплитуда напряжения и фактор пролетного времени в зазоре дебанчера; E_0 — энергия покоя частицы; β , γ — относительные скорость и энергия частиц; λ — длина волны ВЧ-поля в линейном ускорителе; φ_0 — текущее значение фазы ВЧ-поля в дебанчере, при котором синхронная

частица пролетает центр зазора дебанчера:

$$\varphi_0(t) = 2\pi \Delta f \left(t - \frac{\tau}{2} \right). \quad (5)$$

Параметр k положительный, если сгусток частиц попадает в дебанчер на восходящем участке синусоидального напряжения, и отрицательный — на нисходящем участке напряжения.

Для дальнейших оценок ограничимся линейным законом нарастания напряжения в дебанчере. Тогда условие оптимальной разгруппировки имеет вид $k = k_0$. При этом фазовый объем пучка на выходе дебанчера охватывается эллипсом:

$$\frac{\psi}{\Psi_K^2} + \frac{(g - k\varphi_0)^2}{G_K^2} = 1, \quad (6)$$

где

$$\Psi_K = D \Psi_0, \quad G_K = G_0 / D, \quad (7)$$

$$D = \sqrt{1 + a^2 v^2}. \quad (8)$$

На рис. 1 показана зависимость $k_0(a)$. Рассмотрен случай $v = 0,043$, соответствующий линейному ускорителю И-2 в ИТЭФ. Ниже кривой оптимальной разгруппировки $k < k_0$; эллипс разгруппированного пучка «не дотягивает» до канонических осей; амплитуда напряжения в зазоре дебанчера меньше оптимальной. Выше кривой оптимальной разгруппировки $k > k_0$, что соответствует слишком большой амплитуде напряжения в дебанчере. Жирной линией представлена зависимость коэффициен-

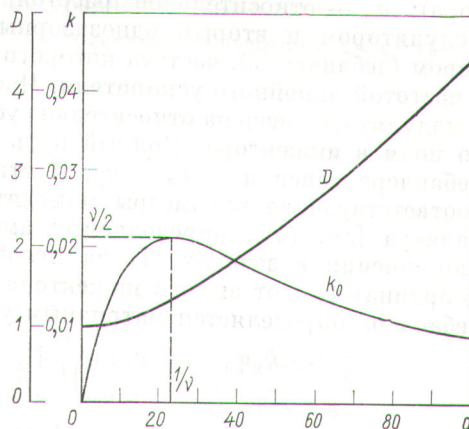
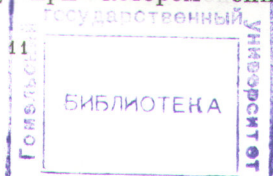


Рис. 1. Зависимость параметра k_0 и коэффициента разгруппировки от относительного пути дрейфа.



та разгруппировки D от относительного пути дрейфа a . При выборе параметров дебанчера обычно задаются значением коэффициента разгруппировки, что однозначно определяет путь дрейфа и оптимальное напряжение в зазоре. Максимальное значение k_0 соответствует точке $a = 1/v$: $k_{0 \text{ макс}} = v/2$. Из рис. 1 видно, что при $D \geq 1,5$ всегда $a > 1/v$, так что с увеличением пути дрейфа оптимальное напряжение в дебанчере снижается.

Если в дебанчере должны одновременно осуществляться функции разгруппировки и модуляции, то параметр k задается требованием, наложенным на модуляцию

$$\frac{dg_{\text{ср}}}{g_{\text{ср}}} = k \frac{d\varphi_0}{dt},$$

и не может быть определен из заданного значения коэффициента разгруппировки.

Пусть величина k , определенная из требований на модуляцию энергии, ниже $k_{0 \text{ макс}}$. Тогда функции разгруппировки и модуляции в принципе могут быть объединены в одном дебанчере. Однако коэффициент разгруппировки в этом случае не может быть выбран независимо. Если же по требованиям на модуляцию $k > k_{0 \text{ макс}}$, то функции разгруппировки и модуляции вообще не могут быть совмещены в одном дебанчере, и на пути пучка следует устанавливать последовательно два однозакорных резонатора (этот случай встречается на практике).

Рассмотрим преобразование фазового объема пучка при последовательном прохождении двух однозакорных резонаторов. Пусть a_m — относительное расстояние от линейного ускорителя до первого однозакорного резонатора (модулятора); a_d — относительное расстояние между модулятором и вторым однозакорным резонатором (дебанчером), частота которого совпадает с частотой линейного ускорителя. Частота поля в модуляторе смещена относительно ускоряющего поля в инжекторе. Полный путь дрейфа до дебанчера равен $a = a_m + a_d$. Пусть k_m, k_d — соответствующие параметры модулятора и дебанчера [см. (4)], определяемые амплитудами напряжения в зазорах. Тогда преобразование координат ψ, g от выхода инжектора до выхода дебанчера определяется матричным уравнением

$$\begin{pmatrix} \psi + a_d k_m \varphi_0 \\ g - K \varphi_0 \end{pmatrix}_{\text{дб}} = \begin{pmatrix} a_{11} a_{12} \\ a_{21} a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi \\ g \end{pmatrix}_{\text{лу}}, \quad (9)$$

где φ_0 — текущее значение фазы ВЧ-поля в зазоре модулятора, при котором синхронная частица пролетает центр этого зазора; K —

коэффициент модуляции, характеризующий смещение среднего импульса частиц $\frac{dg_{\text{ср}}}{dt} = K \frac{d\varphi_0}{dt}$; он равен:

$$K = (1 - a_d k_d) k_m. \quad (10)$$

Индексы «дб» и «лу» относятся соответственно к линейному ускорителю и дебанчере.

Элементы матрицы преобразования (9) равны:

$$\begin{aligned} a_{11} &= 1 - a_d k_m; & a_{12} &= -a + a_m a_d k_m; \\ a_{21} &= k_d + k; & a_{22} &= 1 - a k_d - a_m K. \end{aligned}$$

Условие оптимальной разгруппировки в этом случае имеет вид:

$$\frac{a_{11}}{a_{22}} = -\sqrt{2} \frac{a_{12}}{a_{21}}. \quad (11)$$

Фазовый объем пучка на выходе дебанчера при оптимальной разгруппировке ограничен эллипсом:

$$\frac{(\psi + a_d k_m \varphi_0)^2}{\Psi_K^2} + \frac{(g - K \varphi_0)^2}{G_K^2} = 1. \quad (12)$$

Полуоси эллипса задаются соотношениями (7), а коэффициент разгруппировки определяется более общим выражением:

$$D = v \sqrt{\frac{a - a_m a_d k_m}{K + k_d}}. \quad (13)$$

В частном случае, когда модулятор отсутствует, $k_m = 0$ и выражение (13) сводится к (8).

При установке двух однозакорных резонаторов коэффициенты модуляции и разгруппировки могут задаваться независимо. По заданным значениям K, D отбираются подходящие параметры устройства k_m, k_d, a, a_d , соответствующие оптимальной разгруппировке. Величины этих параметров оказываются вполне приемлемыми для практической реализации.

В обычном устройстве, содержащем один дебанчер, всегда должно выполняться условие $k_d > 0$. Из выражения (10) видно, что в системе модулятор — дебанчер при $k_d > 0$ дебанчер снижает модуляцию средней энергии, определяемую резонатором со смещенной частотой. Однако именно в этом случае возможен выбор $k_d < 0$ и обеспечивается наиболее эффективное использование обоих резонаторов. Физический смысл выбора $k_d < 0$ особенно очевиден, когда расстояние между зазорами модулятора и дебанчера пренебрежимо мало. Приняв $a_d = 0$, получим: $k_m = K; k_d = k_0 - K; D = \sqrt{a/k_0}$. Если заданный коэффициент модуляции K выше максимально допустимой величины $k_{0 \text{ макс}}$, то отрицательное значение k_d позволяет умень-

шить угол поворота эллипса при разгруппировке до оптимального значения.

Параметры устройства k_d , k_m определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} k_d &= \frac{A - \sqrt{\Delta}}{2a_d}; \\ k_m &= \frac{k}{1 - a_d k_d}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

В равенства (14) введены обозначения:

$$A = 2k_0 K a_d^2 - (2K - k_0) a_d + 1; \quad (15)$$

$$\Delta = (1 - k_0 a_d)^2 - \frac{4K k_0^2}{a^2 v^2} (1 + K a_d) a_d^3. \quad (16)$$

Выбор $k_d < 0$ позволит снизить необходимую амплитуду напряжения в модуляторе. На рис. 2 тонкими сплошными и пунктирными линиями представлена зависимость параметров k_d , k_m от относительного расстояния между модулятором и дебанчером соответственно для различных значений полного пути дрейфа. Жирные линии определяют подобные же зависимости для коэффициента разгруппировки. Кривые построены для случая $K = 0,03$; $v = 0,043$. Если при одинарном дебанчере (см. рис. 1) $D \approx 4$ при $a = 100$ и $k \approx 0,01$, то в системе модулятор — дебанчер для $K = 0,03$ при $D \approx 4$ и $a = 100$ получаем $k_m = 0,03$; $k_d \approx -0,02$; $a_d \approx 0$. С приближением модулятора к линейному ускорителю параметры k_m , k_d по абсолютной величине сначала падают, а затем начинают расти; однако коэффициент разгруппировки с увеличением расстояния между модулятором и дебанчером монотонно снижается. В связи с демодулирующим действием дебанчера модулятор нельзя приблизить к линейному ускорителю как угодно близко. Существует макси-

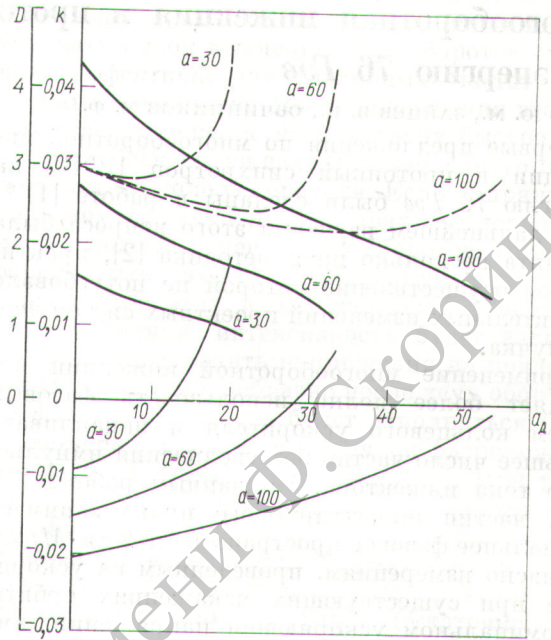


Рис. 2. Зависимость параметров k_d , k_m и коэффициента разгруппировки от относительного расстояния между модулятором и дебанчером (тонкие сплошные кривые соответствуют значениям k_d ; тонкие пунктирные — значениям k_m).

мально допустимое значение a_d , определяемое переменной знака дискриминанта (16).

Таким образом, система из двух последовательно установленных однозональных резонаторов позволяет эффективно модулировать среднюю энергию пучка в течение импульса тока, при этом оптимальные условия для разгруппировки сохраняются. Параметры системы определяются из уравнений (14) и (13).

Поступила в Редакцию 23/XI 1973 г.