

сообщения
Объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

105/2-81

12/1-81

P9-80-625

В.С.Александров, П.Ф.Белошицкий, С.Н.Доля,
А.К.Красных, Э.А.Перельштейн, В.П.Саранцев

КОМПРЕССОР ЭЛЕКТРОННЫХ КОЛЕЦ
С ВЫСОКОЙ ЦИКЛИЧНОСТЬЮ

1980

Задача повышения интенсивности пучков ускоренных ионов является одной из важнейших при работе коллективного ускорителя. Большая рассеиваемая и потребляемая мощность при компрессии электронных колец в динамических адгезаторах приводит к существенному ограничению их цикличности. Поэтому представляют значительный интерес способы компрессии, при которых используется небольшая импульсная мощность. Принципиальная схема одного из таких компрессоров, действие которого основано на совместном использовании статического и импульсного магнитных полей, была описана в работе ^{1/}.

В настоящей работе обсуждается конструкция модели такого компрессора, приведены результаты измерений в импульсной линии, моделирования аналогичных процессов на ЭВМ и их сравнение, проведен расчет статической магнитной системы, обсуждаются результаты динамики сжатия электронного кольца в компрессоре.

1. ИМПУЛЬСНАЯ ЛИНИЯ КОМПРЕССОРА

Конструкция установки изображена на рис.1. Вакуумная камера состоит из металлической обечайки 1 и крепящегося на ней профилированного конуса из органического стекла 2. Возбуждающие витки импульсной линии 3 частично помещены внутрь камеры, частично закреплены на конусе. Снаружи камеры расположены катушки магнитной системы 4, создающие нарастающее вдоль оси компрессора статическое магнитное поле. Электронный пучок /в качестве источника используется электронная пушка с энергией электронов $T_{кин.} \leq 300$ кэВ и $\gamma_{in} < 1,6$ / инжектируется через специальный патрубок 5 /показан условно/ внутрь вакуумной камеры, сворачивается в кольцо в слабофокусирующем статическом магнитном поле и с помощью специального устройства /корректора/ отводится в потенциальную яму статического магнитного поля /расположена правее точки инжекции/. После этого на вход линии подается импульс от генератора и по ней начинает распространяться токовый импульс. Волна импульсного магнитного поля B_z /значок ~ здесь и в дальнейшем означает принадлежность к импульсным величинам/ продвигает электронное кольцо 6 вдоль оси установки в область сильного статического поля, обеспечивая при этом сжатие кольца по большому радиусу,

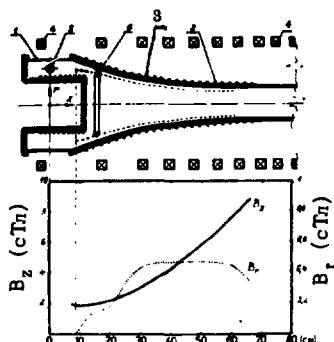


Рис.1. Вверху - конструкция модели компрессора, внизу - распределение статического магнитного поля вдоль траектории кольца.

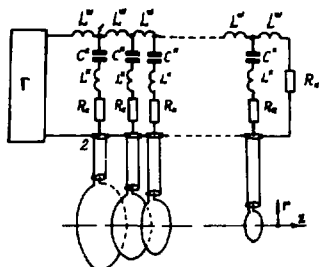


Рис.2. Принципиальная электрическая схема импульсной линии.

размерам поперечного сечения, и увеличение вращательной энергии γ электронов ^{1/}. Расположение части витков импульсной линии внутри камеры обеспечивает слабое влияние экранирования возбуждаемого ими поля металлической обечайкой.

Принципиальная электрическая схема импульсной линии изображена на рис.2. Здесь Γ - питающий генератор, L_k - индуктивность витка с номером k , L^w - индуктивность соединительных проводов, L^c и R^c учитывают конечную величину индуктивности и активного сопротивления конденсатора C_k , R_n - сопротивление нагрузки. Выбор такой схемы был обусловлен удобством ее практической реализации, а также достаточно высокой степенью азимутальной симметрии магнитных полей /каждый виток линии крепится отдельно от других/. Вместе с тем, как показывают результаты численного моделирования, такая схемная реализация устанавливает принципиальные ограничения на "качество" передачи импульса по линии.

Чтобы выявить особенности электрической схемы, используемой для создания бегущего токового импульса, был изготовлен макет устройства, состоявший из питающего генератора, собственно импульсной линии и неотражающей нагрузки R_n на ее конце. Линия содержала 112 конденсаторов емкостью 10 мкФ каждый и столько же возбуждающих витков. Радиус витка r_n с но-



Рис.3. Осциллограмма напряжения на конденсаторах импульсной линии /4,8,42,70,112 соответственно/.

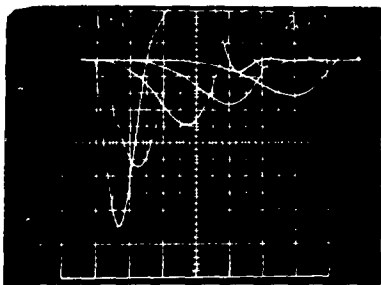


Рис.4. Осциллограмма тока в возбуждающих витках импульсной линии /4,8,42,70,112 соответственно/.

мером n постепенно уменьшался вдоль оси z по закону

$$r_n = \frac{r_1}{1 + a \frac{z_n}{r_1}}, \quad /1/$$

где $a \approx 0,4$. Расстояние между возбуждающими витками /шаг катушки/ $h = 0,7$ см. Величина нагрузки R_n подбиралась экспериментально с учетом требований наименьших искажений импульса в конце линии.

Было проведено экспериментальное исследование деформации токового импульса при его распространении по линии. На рис.3,4 показаны осциллограммы импульса напряжения на емкостях линии и тока в возбуждающих витках. Анализ осциллограмм показывает, что скорость распространения импульса по линии $v_{\text{ф}} = 7 \cdot 10^6$ см/с, а оценка величины L^w по измеренному времени его распространения дает $L^w = 0,9$ мкГ. Величины активного сопротивления R^c и индуктивности L^c были измерены непосредственно и оказались равными $R^c = 0,18$ Ом, $L^c = 0,35$ мкГ.

Методом численного моделирования было исследовано распространение токового импульса по линии, выяснены ее дисперсионные свойства и "предельные возможности" по транспортировке импульса /рис.5-8/. Ток I в каждом из $N=112$ витков в квазиэвклиновом случае определяется из системы уравнений /2/

$$\ddot{M}I + \dot{R}I + CI = \dot{U}(t). \quad /2/$$

Матрица $\ddot{M}_{i,k}$ устроена следующим образом:

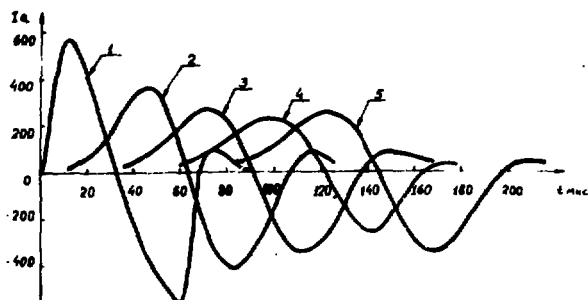


Рис. 5. Зависимость тока в витках импульсной линии от времени / 1 - 1-й виток, 2 - 29-й виток, 3 - 57-й виток, 4 - 85-й виток, 5 - 112-й виток/, полученная в результате численного моделирования. $T_0 = 120$ мкс, $U_0 = 1$ кВ.

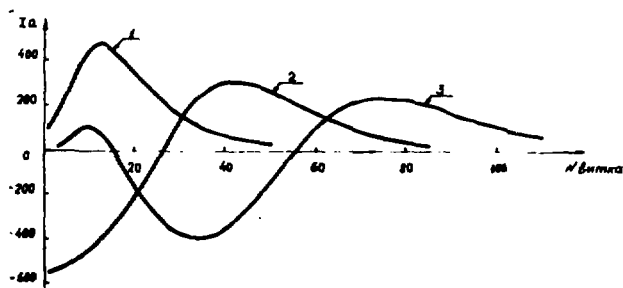


Рис. 6. Распределение токов по виткам импульсной линии / 1 - $t = 30$ мкс, 2 - $t = 60$ мкс, 3 - $t = 90$ мкс/, полученное при численном моделировании. $T_0 = 120$ мкс, $U_0 = 1$ кВ.

$$U(t) = U_0 \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad t \leq \frac{T_0}{2}, \quad U(t) = 0, \quad t > \frac{T_0}{2}.$$

Сравнение результатов расчета с измерениями показывает большее затухание и расплывание импульса в реальной линии по сравнению с расчетом. При подаче на вход сигнала с большей величиной периода T_0 /рис. 7/ происходит уменьшение амплитуды тока в каждом из витков линии. Это легко объясняется, так как при слабом изменении импеданса Z_0 всей линии сопротивление между точками 1 и 2 /рис. 2/ в основном емкостное $Z_{12} \approx 1/\omega$. Уменьшение подсадки амплитуды тока

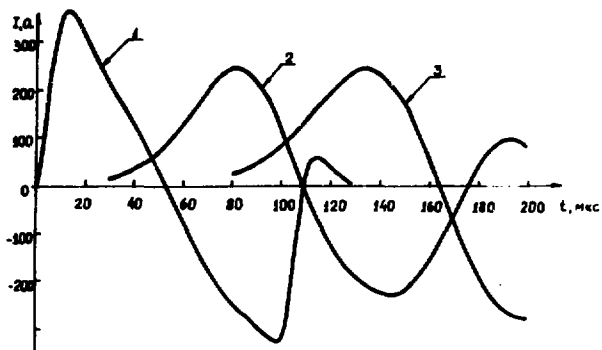


Рис.7. Зависимость тока в витках импульсной линии /1 - 1-й виток, 2 - 57-й виток, 3 - 112-й виток/ от времени /результат численного моделирования/. $T_0 = 200$ мкс, $U_0 = 1$ кВ.

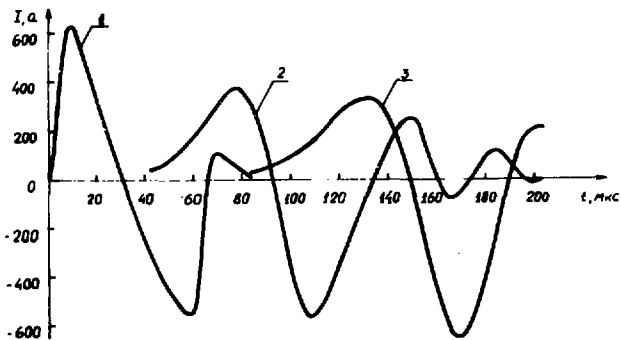


Рис.8. Зависимость тока в витках для "идеальной" линии, когда $L^c = 0$, $R^c = 0$. /1 - 1-й виток, 2 - 57-й виток, 3 - 112-й виток/. $T_0 = 120$ мкс, $U_0 = 1$ кВ.

при распространении по линии объясняется ее дисперсионными свойствами. Электрическая схема линии напоминает схему низкочастотного фильтра с определенной граничной частотой ω_c . Если разложить входной сигнал по собственным колебаниям системы, то коэффициенты разложения при высоких гармониках для больших значений T_0 будут меньше и эффект их "зарезания" окажется слабее. Практически, однако, выбор T_0 определяется не допу-

стимым затуханием импульса в линии, а требованиями, предъявляемыми к величинам магнитных полей и их градиентов при заданном шаге намотки спирали. Величина шага намотки в данной модели компрессора $h = 7$ мм должна быть достаточно малой, так, чтобы кольцо, проходя мимо витков спирали, не чувствовало их структуру, т.е. чтобы поля и градиенты в месте нахождения кольца были достаточно гладкими /как показывают результаты моделирования динамики сжатия электронного кольца, необходимо, чтобы расстояние между кольцом и витками по меньшей мере вдвое превосходило шаг намотки/.

Представляет интерес выяснение "пределных возможностей" импульсной линии по транспортировке токового импульса. Такой идеальной линии соответствуют значения $R^c = 0$, $L^c = 0$. Результаты численного моделирования показывают /рис. 8/, что и в этом случае, когда диссипативных потерь в линии нет, происходит уменьшение амплитуды токового импульса при распространении его по линии, связанное с дисперсионными свойствами системы. Как видно из рис. 5, 8, падение амплитуды токового импульса при данной величине периода входного сигнала $T_0 = 120$ мкс примерно в равной мере обусловлено активными потерями и переотражениями в линии.

2. СТАТИЧЕСКОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОМПРЕССОРА

Метод расчета статической магнитной системы компрессора /4/ основан на создании такой геометрии магнитного поля, при которой вдоль заданной траектории $r = r_0(z)$ сохраняется азимутальная компонента обобщенного момента импульса равновесной частицы. Так как импульсные величины значительно меньше статических, то электронное кольцо, сжимаясь, движется по траектории, близкой к $r = r_0(z)$. Продвижение кольца в область нарастающего статического B_z^{CT} поля осуществляется при распространении по импульсной линии токового импульса. При подаче сигнала $U(t)$ на вход линии вместе с перемещением вправо /рис. 1/ токового импульса сдвигается потенциальная яма суммарного магнитного поля, в которой находится электронное кольцо. При моделировании сжатия кольца оказалось, что его траектория и параметры /размеры поперечного сечения и вращательная энергия γ / слабо зависят от геометрии поля, что значительно упрощает задачу формирования полей и снижает допуски к ним.

Для формирования статического магнитного поля была использована система катушек постоянного радиуса. Заданное распределение $B_z^{CT}(z)$ подбиралось путем изменения токов в соответствующих катушках. При этом учитывались ограничения на величину B_r^{CT} ($B_r^{CT} < B_r^{max}$) и на величины токов: 0-300 А, а также

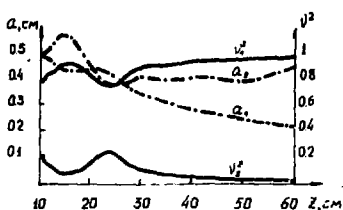


Рис. 9. Изменение малых полуразмеров a_1, a_2 /штрихпунктирная линия/ и квадратов частот нормальных колебаний ν_1, ν_2 /сплошная линия/ в процессе сжатия кольца.

гу траектории к виткам импульсной линии на величину $\Delta r_0 / r_0 \leq 0,4$. Отметим, что значительное уменьшение B_r при распространении токового импульса по линии приводит к необходимости аналогичного уменьшения B_r^{CT} с ростом z , а это влечет за собой уменьшение области положительных значений n^{CT} / n - показатель спада магнитного поля/. При этом в конце сжатия фокусировка в аксиальном направлении осуществляется только импульсным полем и является довольно слабой, что приводит к увеличению размеров поперечного сечения кольца.

3. ДИНАМИКА СЖАТИЯ ЭЛЕКТРОННОГО КОЛЬЦА

Методом численного моделирования было проведено исследование динамики сжатия кольца в компрессоре. На вход импульсной линии /схема на рис. 2/ подавался сигнал $U(t) = U_0 \sin \frac{2\pi}{T_0} t, t \leq \frac{T_0}{2}, U(t) = 0, t > \frac{T_0}{2}$. Система уравнений /2/-/4/ интегрировалась по времени, после этого по найденным токам в линии определялось импульсное магнитное поле в компрессоре в произвольный момент времени. По известным импульсным полям рассчитывались введенные токи в металлической /из нержавеющей стали/ обечайке /учет влияния металлических конструкций проведен в Приложении/. Положение электронного кольца в камере /траектория кольца показана на рис. 1/ в зависимости от времени определялось из уравнений

условие отсутствия прохождения наиболее опасных резонансов бетатронных колебаний $1/\nu_{\min}^2 < 0,25/$ при сжатии кольца. Для частичной компенсации уменьшения $M_{\phi}^{CT} = e/c (r^2 B_z^{CT} - r A_{\phi}^{CT})$, неизбежного в системе катушек с постоянным радиусом, при приближении к оси установки /сжатие кольца/ использовалось увеличение плотности расположения катушек к концу компрессора.

Было сформировано статическое магнитное поле /рис. 1/, в котором отклонение $\frac{\Delta M_{\phi}^{CT}}{M_{\phi}^{CT}}$ вдоль заданной траектории составило 0,6, что вместе с учетом вклада импульсных величин привело к сдвигу

$$\tilde{B}_r(r, z, t) + B_r^{CT}(r, z) = 0, \quad /5/$$

$$\frac{c}{e} M_\phi = r^2 B_z \Sigma - r A_\phi \Sigma = \text{const}, \quad /6/$$

$$B_z \Sigma(r, z, t) = \tilde{B}_z(r, z, t) + B_z^{CT}(r, z),$$

$$A_\phi \Sigma(r, z, t) = \tilde{A}_\phi(r, z, t) + A_\phi^{CT}(r, z),$$

а изменение малых полуразмеров кольца a_1, a_2 /рис.9/ в процессе сжатия можно найти, решая систему уравнений /7/:

$$\gamma^2 a_{1,2}^4 \left(\frac{\nu_{1,2}^2}{r^2} - \frac{Q}{a_{1,2}(a_1 + a_2)} \right) = \text{const}, \quad /7/$$

где ν_1, ν_2 - частоты нормальных колебаний в пренебрежении просторанственным зарядом кольца /4,6/ /рис.9/, $Q = \frac{4\nu}{\beta^2 \gamma^3}$, $\nu = \frac{N_e}{2\pi r} \frac{e^2}{mc^2}$, $N_e = 3 \cdot 10^{10}$ - число электронов в кольце. Небольшое начальное значение вращательной энергии электронов, обусловленное использованием в качестве источника электронной пушки с указанными параметрами, приводит к сильному ограничению на число электронов N_e в данной модели компрессора. Так, ограничение, связанное с кулоновским расталкиванием /8/, дает $N_e < 5,8 \cdot 10^{11} \nu_{\text{min}}^2$ при $\gamma_{\text{in}} = 1,6$. Если принять ограничение $\nu_{\text{min}}^2 < 0,25$, связанное с прохождением параметрического резонанса бетатронных колебаний, то $N_e \leq 1,5 \cdot 10^{11}$. Такое же ограничение получается из порогового условия для продольных неустойчивостей /7/ при полном энергетическом разбросе $\Delta E/E = 5\%$.

Из проделанного расчета модели компрессора с повышенной циклическостью и проведенных измерений следует, что на ней возможна принципиальная проверка метода компрессии электронных колец в статическом и импульсном магнитных полях. Дальнейшее улучшение ускоряющей способности колец связано, в первую очередь, с увеличением энергии инжектируемого электронного пучка.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Для расчета токов, наведенных в экране, воспользуемся результатом работы /8/, где решена задача нахождения магнитных полей при наличии тонких азимутально-симметричных экранов, когда выполняется условие квазистационарности

$$\frac{v_\phi^2}{c^2} \ll \frac{l^2}{L_0^2}. \quad /П.1/$$

Здесь $\ell \approx 20 \div 40$ см - характерный размер области, в которой поле отлично от нуля, $L_0 = 14,3$ см длина контура азимутально-го сечения экрана толщины $H = 4$ мм, с проводимостью $\sigma/c^2 = 1,25 \cdot 10^{-5}$ с/см² /нержавеющая сталь/ в $r-z$ плоскости. При нулевых начальных условиях для плотности тока j_ϕ в экране имеем:

$$j_\phi(\ell, t) = \frac{c}{HL_0} \frac{1}{\sqrt{u(\ell)}} \sum_i \Phi_i(\ell) \lambda_i [D_i(t) - B_i(t)], \quad /П.2/$$

где ℓ определяет положение точки (r, z) на экране, $u = \frac{r}{L_0}$, $v = \frac{z}{L_0}$, λ_i и Φ_i - соответственно собственные числа и собственные функции ядра $G(\ell, \ell')$

$$G(\ell, \ell') = G_{ij}(u_i, u_j', v_i, v_j') = \frac{4}{k^2} [(1 - \frac{k^2}{2})K(k) - E(k)],$$

$$k^2 = \frac{4u_i u_j'}{(u_i + u_j')^2 + (v_i - v_j')^2},$$

$$\Phi_i(\ell) = \lambda_i \int_L \Phi_i(\ell') G(\ell, \ell') d\ell', \quad /П.3/$$

$$B_i(t) = \int_L F(\ell, t) \Phi_i(\ell) d\ell,$$

$$D_i(t) = \frac{1}{r_i} \int_0^t B_i(t') e^{-(t-t')/r_i} dt',$$

$$r_i = \frac{r}{\lambda_i}, \quad r = \frac{\sigma HL_0}{c^2}, \quad F(\ell, t) = \sqrt{u(\ell)} \tilde{A}_\phi(\ell, t),$$

где интегрирование проводится по контуру L с элементом длины $d\ell = \sqrt{du^2 + dv^2} / \sqrt{2}$. Перейдя от интегрирования к суммированию с заменой собственных функций на собственные векторы, получим

$$j_\phi(\ell_n, t) = \frac{c}{HL_0} \frac{1}{(r_n f_n q_n)^{1/2}} \sum_{i,k} \frac{1}{\lambda_i} \tilde{\Phi}_n^{(i)} \tilde{\Phi}_k^{(i)} (r_k f_k q_k)^{1/2} * /П.4/$$

$$* \left\{ \frac{1}{r_i} \int_0^t A_\phi(\ell_k, t') e^{-(t-t')/r_i} dt' - A_\phi(\ell_k, t) \right\},$$

где $f_n = [1 + (\frac{dr}{dz})^2]^{1/2}$, $\tilde{\lambda}_i$ и $\tilde{\Phi}^{(i)}$ - собственные числа и собственные векторы матрицы \tilde{Q} , вычисление которой проведено в работе /4/, коэффициенты q_k определяются выбором метода интегрирования /в данной работе все интегралы, кроме одного, вычислялись методом Симпсона/. Сравнение двух членов, стоящих в фигурных скобках в /П.4/, показывает, что при данных параметрах задачи, когда экран близок к идеально проводящему /для $t_0 = 100 \div 250$ мс $\omega r = 2 \div 4$ /, основной вклад вносит второй член. Тогда интеграл $I_{ik}(t)$ можно вычислить по формуле трапеций, что при достаточно высокой точности обеспечивает быстрое вычисление интеграла по рекуррентной формуле

$$I_{ik}(t_n) = \frac{1}{r_i} \int_0^t \tilde{A}_\phi(p_k, t') e^{-(t-t')/r_i} dt' = \quad /П.5/$$

$$= [I_{ik}(t_{n-1}) + \frac{\alpha_i}{2} \tilde{A}_\phi(p_k, t_{n-1})] e^{-\alpha_i} + \frac{\alpha_i}{2} \tilde{A}_\phi(p_k, t_n).$$

$$I_{ik}(t_1) = \frac{1}{2} \alpha_i \tilde{A}_\phi(p_k, t_1), \quad \tilde{A}_\phi(t=0) = 0, \quad \alpha_i = \frac{\Delta t}{\lambda_i r},$$

где Δt - шаг интегрирования. Зная токи в экранах, можно обычным образом /2/ вычислить величины V_r, V_z и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барабаш Л.С. и др. ОИЯИ, Р9-11776, Дубна, 1978.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Гостехиздат, М., 1957.
3. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. "Мир", М., 1977, т.6.
4. Белошицкий П.Ф. и др. ОИЯИ, Р9-12830, Дубна, 1979.
5. Ярковой О.И. ЖТФ, 1966, т.36, с.988; ОИЯИ, 2183, Дубна, 1965.
6. Laslett L.J., Sessler A.M. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1969, NS-16, No.3, p.1034.
7. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат, М., 1979.
8. Алексахин Ю.И., Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А. ЖТФ, 1975, т.45, с.933; ОИЯИ, Р9-7786, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 сентября 1980 года.