Рекуперация энергии фазовой частицы в сверхпроводящей системе сопровождения

Пигнастый О.М., Попович Д.В., Рашкован В.М.

Одной из составных частей проблемы управляемого термоядерного синтеза являются вопросы рекуперации энергии ионных пучков и их торможение. На сегодняшний день предложено достаточно много схем рекуперации [1,2,3]. Но при всем многообразии в основе их работы лежит один общий принцип - прямое преобразование энергии заряженных частиц при переносе заряда против сил электрического поля за счет сил инерции [1]. Предлагаемую в данной работе схему рекуперации отличает то, что заряженные частицы движутся против сил электромагнитного поля, индуцируемого сверхпроводящими контурами, где и происходит накопление энергии.

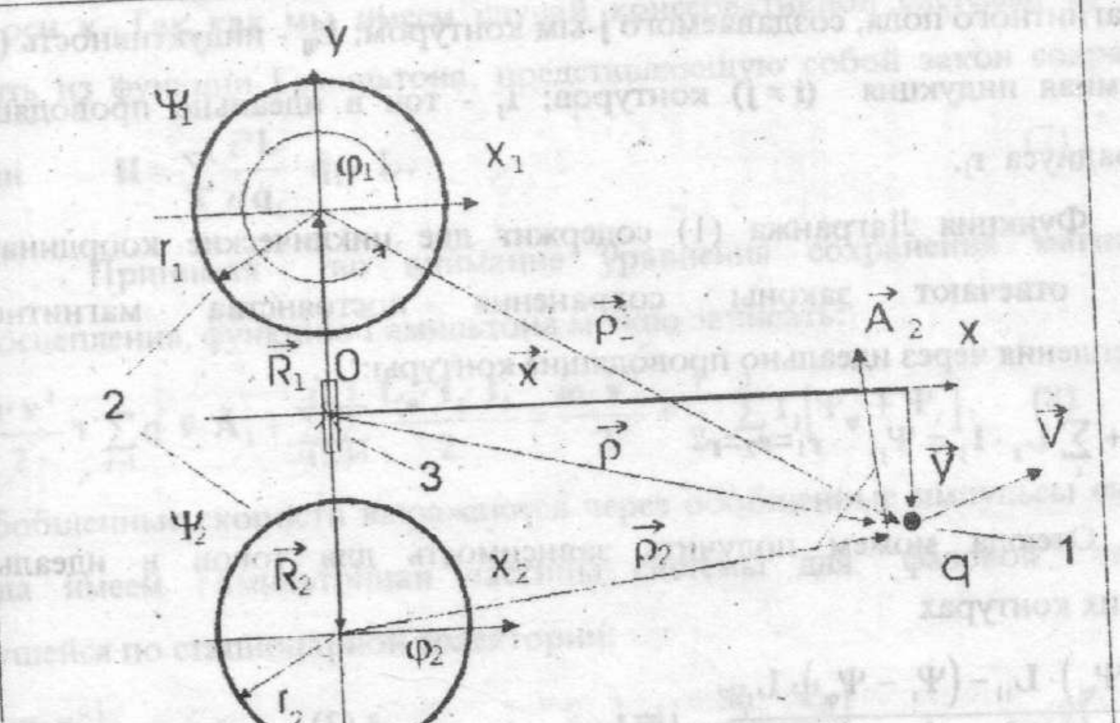

Рис.1 Элементарная ячейка индукционного рекуператора

Для выяснения механизма энергообмена в предлагаемой системе рассмотрим движение одиночного точечного заряда в электромагнитном поле идеально проводящих колец, лежащих в одной плоскости, как представлено на рис. 1., где 1-частица, энергию которой необходимо рекуперировать, 2 - сверхпроводящие короткозамкнутые кольца, 3 - приемник (утилизатор) ионов.

Примем за центр декартовой системы координат точку 0, делящую пополам отрезок с концами в центрах сверхпроводящих колец. Ось X направим перпендикулярно отрезку в плоскости сверхпроводящих колец. Лагранжиан системы можно записать в виде

$$L = \frac{m \cdot v^2}{2} + \sum_{j=1}^{2} q \cdot \vec{v} \cdot \vec{A}_j + \sum \frac{L_{ij} \cdot I_i \cdot I_j}{2}, \qquad (1)$$

где m- масса, v-скорость, q - заряд частицы; $\vec{A}_j$- векторный потенциал электромагнитного поля, создаваемого j-ым контуром; L_{ij} - индуктивность $(i=j)$ или взаимная индукция $(i \neq j)$ контуров; I_j - ток в идеально проводящем контуре радиуса r_j.

Функция Лагранжа (1) содержит две циклические координаты, которым отвечают законы сохранения постоянства магнитного потокосцепления через идеально проводящие контуры:

$$\frac{\partial L}{\partial I_j} = \Psi_{qj} + \sum_i L_{ij} \cdot I_j = \Psi_j; \quad r_1 = r_2 = r \qquad (2)$$

Отсюда можем получить зависимость для токов в идеально проводящих контурах

$$I_j = \frac{\left(\Psi_j - \Psi_{qj}\right) \cdot L_{11} - \left(\Psi_i - \Psi_{qi}\right) \cdot L_{12}}{L_{11}^2 - L_{12}^2}, \ i \neq j \qquad (3)$$

Энергия взаимодействия заряженной частицы с бесконечно тонким идеально проводящим контуром представима в виде

$$q \cdot \vec{v} \cdot \vec{A}_1 = \Psi_{q} \cdot I_1 = q \cdot \vec{v} \cdot \left(-\sin\varphi_1 \cdot \vec{i}_x + \cos\varphi_1 \cdot \vec{i}_y\right) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_i \cdot f_i, \qquad (4)$$

где $f_i = \sqrt{\frac{r_i}{\rho_i}} \cdot \frac{1}{k_i} \cdot \left[\left(2 - k_i^2\right) \cdot K_i - 2 \cdot E_i\right]$; $k_i = \frac{2 \cdot \sqrt{\rho_i \cdot r_i}}{\sqrt{\left(\rho_i \cdot r_i\right)^2 + z^2}}$,

K,E- эллиптические интегралы первого рода модуля **k**.

Рассмотрим стационарное движение заряженной частицы по прямолинейной траектории **z=0, y=0** ($\big|_0$):

$$\left.\frac{\partial L}{\partial y}\right|_0 = 0; \quad \left.\frac{\partial L}{\partial z}\right|_0 = 0 . \tag{5}$$

В силу осевой симметрии системы необходимые условия устойчивости (5) можно записать в виде

$$\begin{cases} I_1\big|_0 = -I_2\big|_0 \\ z\big|_0 = 0 \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \Psi_1 = -\Psi_2 = \Psi \\ z\big|_0 = 0 \end{cases} \tag{6}$$

Получим выражение для скорости движения заряженной частицы вдоль оси **x**. Так как мы имеем случай консервативной системы, то будем исходить из функции Гамильтона, представляющую собой закон сохранения энергии

$$H = \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot q_i} \cdot \dot q_i - L. \tag{7}$$

Принимая во внимание уравнения сохранения магнитного потокосцепления, функцию Гамильтона можно записать:

$$H = \frac{m \cdot v^2}{2} + \sum_{j=1}^{2} q \cdot \vec v \cdot \vec A_j + \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2} \frac{L_{ij} \cdot I_i \cdot I_j}{2} = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^{2} I_j\left[\Psi_{qj} + \Psi_j\right], \tag{8}$$

где обобщенные скорости выражаются через обобщенные импульсы системы. Отсюда имеем Гамильтониан частицы системы для "фазовой" частицы, движущейся по стационарной траектории:

$$H_0 = \left.\frac{m \cdot v_x^2}{2}\right|_0 + I_1\big|_0 \left[\Psi'_{q1} + \Psi_1\right]\Big|_0 = \mathbf{const}, \quad \text{где } I_1\big|_0 = \left.\frac{\Psi_1 - \Psi_{q1}}{L_{11} - L_{12}}\right|_0 ; \tag{9}$$

$$\Gamma_0 = H\big|_0 - \left.\frac{\Psi_1^2}{L_{11} - L_{12}}\right|_0 = \mathbf{const}. \tag{10}$$

Для стационарной траектории выражение магнитного пото[...] пронизывающего поверхность, ограниченную идеально проводящ[...] контуром, принимает вид:

$$\Psi_{q}\big|_0 = \Psi_q - \left[\frac{\mu_0}{2\pi}\cdot f_1\cdot q\cdot v_x\left(-\sin\varphi_1\right)\right]_0. \qquad (11)$$

Подставляя последнее выражение в (10), получаем закон изменен[...] скорости "фазовой" частицы, движущейся по стационарной траектории.

$$v_x^2\big|_0 = \frac{\Gamma_0}{\left(\dfrac{m}{2} - \dfrac{1}{L_{11}-L_{12}}\left[\dfrac{\mu_0}{2\pi}\cdot f_1\cdot q\cdot\sin\varphi_1\right]^2\Big|_0\right)}. \qquad (12)$$

Для анализа динамики движения пучка S заряженных частиц введ[...] безразмерные параметры системы "фазовая частица-сверхпроводящ[...] контуры":

$$\xi_1 = \frac{y}{r};\quad \xi_2 = \frac{z}{r};\quad \xi_3 = \frac{x}{r};\quad \tau = \frac{\psi}{r}\sqrt{\frac{1}{m\cdot L_{11}}}\,t;\quad \dot{} = \frac{d}{dr};\quad h_i = \frac{R_{i}}{r};\qquad (13)$$

$$N_1 = I_1\cdot\frac{L_{11}}{\psi_i};\qquad \gamma_1 = \frac{\Gamma_0}{\left[\dfrac{\psi_1^2}{L_{11}}\right]};\qquad \gamma_2 = \frac{\sqrt{S}\,q\cdot\mu_0}{2\pi\cdot\sqrt{L_{11}\cdot m}};\qquad \gamma_3 = \frac{L_{12}}{L_{11}};$$

$$\lambda_4 = \left[0.5 - \frac{1}{1-\lambda_3}\left(\lambda_2\cdot f_1\cdot\sin\varphi_1\right)^2\Big|_0\right] = \mathrm{const}.$$

Тогда
$$\frac{\gamma_4}{\left[\dfrac{1}{2} - \left[\gamma_2\cdot\dfrac{1}{\sqrt{1-\gamma_3}}\cdot f_1\cdot\sin\varphi_1\right]^2\right]}\Bigg|_0 = \frac{\dot\xi_{30}^2}{(\xi^{*}_{30})^2}. \qquad (14)$$

Стационарное движение пучка заряженных частиц вдоль оси О[...] определяется только электрической силой, обусловленной изменени[...] векторного потенциала электромагнитного поля во времени. Выражение (14) показывает, что при движении электрического заряда в электромагнитно[...]

поле пары идеально проводящих контуров в системе происходит интенсивный энергообмен между пучком и идеально проводящими контурами. В интересующем нас случае рекуперации частицы отдают свою энергию идеально проводящим кольцам и, соответственно, тормозятся. Естественно, что возможен и обратный процесс, когда частицы ускоряются, используя энергию сверхпроводящих элементов. Таким образом, при приближении пучка заряженных частиц к оси симметрии плоскости контуров, расположенной перпендикулярно оси движения, происходит ускорение пучка заряженных частиц, либо торможение с рекуперацией его энергии в идеально проводящих элементах системы, причем экстремальное значение скорости падает на точку центральной симметрии двух контуров. Важен тот факт, что случай рекуперации или ускорения не зависит от знака заряженных частиц, а определяется знаком выражения для Γ_0, представляющего собой разность

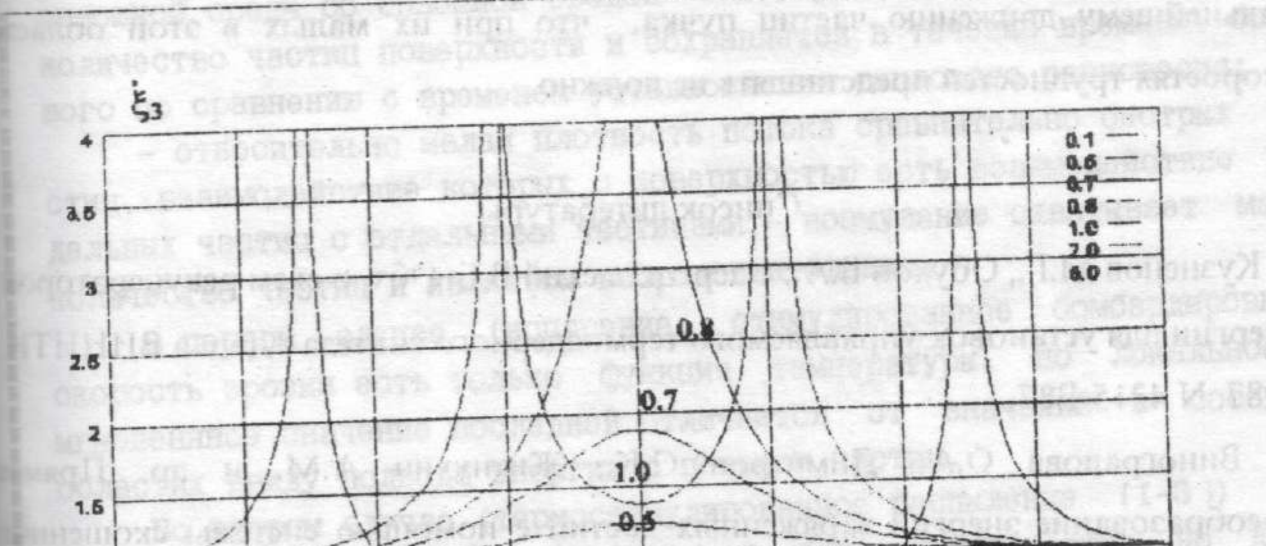

Рис.2 Относительная скорость движения пучка $\dfrac{\xi_{30}}{(\xi'_{30})}$

собственной энергии пучка в форме инерционной электромагнитной составляющей и электромагнитной энергией взаимодействия пучка и контуров с точностью до const. Процесс рекуперации энергии происходит при отрицательном значении Γ_0.

Вышесказанное иллюстрируется рис.2, на котором представлен график относительной скорости движения пучка $\frac{\xi_{30}}{(\xi_{30})}$ в зависимости от его местонахождения при различных значениях параметра γ_2.

Как и следовало ожидать, увеличение параметра γ_2 приводит к уменьшению значения скорости в экстремальной точке. Из графиков видно, что для достаточно мощных по количеству частиц пучков достижима в строго определенной области весьма высокая степень перекачки энергии частиц пучка в сверхпроводящие накопители. Необходимо только воспрепятствовать дальнейшему движению частиц пучка, что при их малых в этой области скоростях трудностей представлять не должно.

Список литературы

1. Кузнецов М.Г., Обухов В.А., Озерецковский В.Б. Обзор схем рекуператоров энергии для установок управляемого термоядерного синтеза / Деп. в ВИНИТИ, 1987, N 4215-В87.

2. Виноградова О.А., Димитров С.К., Житнухин А.М. и др. Прямое преобразование энергии заряженных частиц с помощью системы скошенных диафрагм.-Атомная энергия, 1972, т.33, вып.1, с.586-589.

3. Гусельников В.И., Мешков Н.И., Оришич Т.И., Савкин В.Я., Фунтиков В.П. Рекуперация энергии интенсивного пучка протонов, компенсированного медленными электронами.-Препринт 88. ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, 1988 г.