

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

01;10

Журнал технической физики, т. 63, в. 8, 1993

© 1993 г.

КОМПЕНСАЦИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ НА СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ИНДУКЦИОННОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ УСКОРИТЕЛЕ

В.А.Москалев, Г.И.Сергеев, В.Г.Шестаков

Успехи по ускорению килоамперных токов в модифицированном бетатроне, достигнутые в лаборатории военно-морских исследований *NRL* [1,2], значительно повысили интерес к индукционному способу ускорения электронов. Ожидается, что сильноточные индукционные ускорители, генерирующие очень мощные электронные пучки, позволят снизить стоимость единицы облучения и найдут ряд новых перспективных областей применения [2].

С решением вопроса увеличения ускоряемого в бетатроне заряда встает вопрос увеличения предельной энергии, достижимой при индукционном способе ускорения. Самый большой бетатрон был сооружен около 1950 г. на энергию в 300 МэВ [3]. Эта энергия в 300 МэВ и стала практически предельно допустимой для индукционных циклических ускорителей, так как при более высоких энергиях, как было предсказано в [4], нарушаются условия нормальной работы бетатрона вследствие потери электронами части энергии на синхротронное излучение.

Величина энергии ΔE_c (кэВ), которая уносится электромагнитным излучением при совершении электроном одного оборота по орбите, определяется выражением

$$\Delta E_c = 88.5 \cdot E^4 / R_0, \quad (1)$$

где E — энергия электронов (ГэВ), R_0 — радиус равновесной орбиты (м).

Количественные оценки показывают, что потери энергии на синхротронное излучение становятся существенными, когда энергия электронов превышает 100 МэВ. С ростом энергии электрона величина потерь на излучение может сравняться с приростом энергии ΔE , который сообщается электрону вихревым электрическим полем за один оборот. По мере приближения величины ΔE_c к значению ΔE прирост энергии электрона уменьшается по сравнению с необходимым приростом энергии для движения электрона по равновесной орбите в возрастающем магнитном

поле. Это приведет к сокращению радиуса траектории и электрон будет двигаться по сужающейся спирали, что в конце концов вызовет соударение электрона с внутренней стенкой ускорительной камеры.

С целью повышения энергии ускоренных частиц, достигаемой в индукционном циклическом ускорителе, предлагается способ компенсации потерь энергии на синхротронное излучение, заключающийся в разделении управляющего и ускоряющего электромагнитных полей и возбуждении их с разными приведенными частотами [5]. Если ускоряющее $\Phi_{\text{уск}}$ и управляющее $\Phi_{\text{упр}}$ магнитные поля возбуждать от источников с частотами $f_{\text{уск}}$ и $f_{\text{упр}}$, то практически всегда в диапазоне энергий ускоренных электронов 300–1000 МэВ можно подобрать такое соотношение частот $f_{\text{уск}}/f_{\text{упр}}$, при котором условия устойчивого движения электронов на орбите в заданных пределах будут сохраняться до конца цикла ускорения.

Наиболее просто проиллюстрировать принцип действия предлагаемого способа ускорения можно на примере циклического индукционного ускорителя электронов (рис. 1), описанного в [6]. В этом ускорителе ускоряющее поле возбуждается на оси индукторов 1 и в зазорах магнитов 2. Усредненная по орбите ускоряющая эдс описывается выражением

$$\mathcal{E} = \omega(\Phi_{\text{уск}} + \Phi_{\text{упр}}) \cos \omega t = (\mathcal{E}_{\text{уск}} + \mathcal{E}_{\text{упр}}) \cos \omega t, \quad (2)$$

где индекс “уск” относится к индукторам, а “упр” — к магнитам; $\omega = 2\pi f$; f — частота питающего напряжения; $\Phi_{\text{уск}}$ — амплитуда суммарного магнитного потока индукторов; $\Phi_{\text{упр}}$ — амплитуда магнитного потока магнитов, охватываемого орбитой 3.

На рис. 2 представлены временные диаграммы. Индуцируемые магнитными полями эдс $\mathcal{E}_{\text{уск}}$ и $\mathcal{E}_{\text{упр}}$ изменяются по косинусоидальному закону $\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \cdot \cos \alpha$ и в конце цикла ускорения $\alpha = \pi/2$ равны нулю, а потери энергии на синхротронное излучение ΔE_c возрастают с ростом энергии электронов E пропорционально E^4 и достигают максимума в конце цикла ускорения. Предел энергии, до которого можно ускорить электроны, наступает при $\mathcal{E} = \Delta E_c$.

Компенсация потерь энергии на синхротронное излучение достигается путем увеличения эдс $\mathcal{E}_{\text{уск}}$ на величину потерь энергии ΔE_c . Кривая

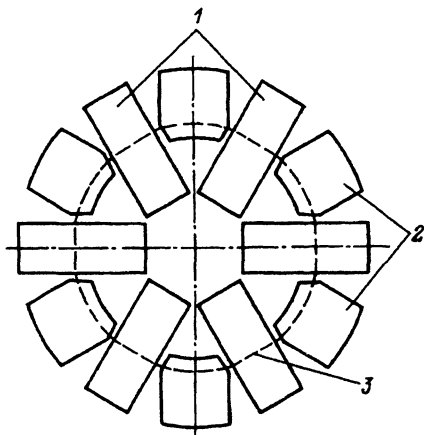


Рис. 1.

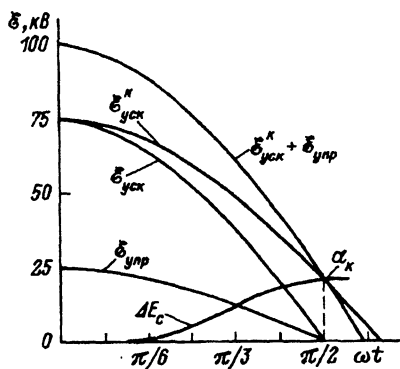


Рис. 2. Временные диаграммы.

$\mathcal{E}_{\text{уск}}^{\text{к}}$ на рис. 2 представляет собой сумму

$$\mathcal{E}_{\text{уск}}^{\text{к}} = \mathcal{E}_{\text{уск}} = \mathcal{E}_{\text{уск}} + \Delta E_c. \quad (3)$$

Усредненная по орбите ускоряющая эдс в этом случае может быть достаточно точно описана формулой

$$\mathcal{E}_{\text{к}} = \mathcal{E}_{\text{уск}}^{\text{к}} \cdot \cos(\omega_{\text{уск}} \cdot t) + \mathcal{E}_{\text{упр}} \cdot \cos(\omega_{\text{упр}} \cdot t). \quad (4)$$

Полученная новая косинусоида $\mathcal{E}_{\text{уск}}^{\text{к}} \cdot \cos(\omega_{\text{уск}} \cdot t)$ по частоте отличается от косинусоиды $\mathcal{E}_{\text{упр}} \cdot \cos(\omega_{\text{упр}} \cdot t)$, соотношение частот $\omega_{\text{уск}}$ и $\omega_{\text{упр}}$ определяется как

$$\omega_{\text{уск}}/\omega_{\text{упр}} = \alpha_{\text{к}}/(\pi/2), \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{к}}$ — угол компенсации, при котором для косинусоиды $\mathcal{E}_{\text{уск}}^{\text{к}} \cdot \cos(\omega_{\text{уск}} \cdot t)$ выполняется условие $\mathcal{E}_{\text{уск}}^{\text{к}} = \Delta E_c$.

Так как в начале цикла ускорения (при $\alpha = 0$) $\mathcal{E}_{\text{уск}}^{\text{к}} \Big|_{\alpha=0} = \mathcal{E}_{\text{уск}} \Big|_{\alpha=0}$, то угол $\alpha_{\text{к}}$ определяется из соотношения

$$\alpha_{\text{к}} = \arccos \left(\Delta E_c / \mathcal{E}_{\text{уск}} \Big|_{\alpha=0} \right). \quad (6)$$

После подстановки (6) в (5) получаем

$$\omega_{\text{уск}}/\omega_{\text{упр}} = (2/\pi) \cdot \arccos \left(\Delta E_c / \mathcal{E}_{\text{уск}} \Big|_{\alpha=0} \right).$$

Критерием компенсации потерь энергии электронами на синхротронное излучение и устойчивой работы ускорителя является допустимое отклонение мгновенной орбиты частиц от положения равновесной орбиты. Положение мгновенной орбиты R_0 определяется из выражения

$$R_0 = (E^{\text{к}} - E_{\text{сu}})/300 B_0, \quad (7)$$

где $E^{\text{к}}$ — энергия ускоряемых частиц в заданный момент времени, $E_{\text{сu}}$ — суммарные потери энергии электроном на синхротронное излучение к заданному моменту времени, B_0 — индукция на радиусе равновесной орбиты.

Значение энергии $E^{\text{к}}$ можно получить путем умножения ускоряющей эдс $\mathcal{E}^{\text{к}}$ (уравнение (4)) на число оборотов электронов на орбите и интегрирования полученного выражения от 0 до $(\pi/2)$, в результате чего имеем

$$E^{\text{к}} = \frac{c}{2\pi R_0} \left[\frac{\mathcal{E}_{\text{уск}}}{\omega_{\text{уск}}} \sin(\omega_{\text{уск}} \cdot t) + \frac{\mathcal{E}_{\text{упр}}}{\omega_{\text{упр}}} \sin(\omega_{\text{упр}} \cdot t) \right], \quad (8)$$

где c — скорость света.

Выражение для $E_{\text{сu}}$ получается после замены в уравнении (1) величины E на $E \cdot \sin(\omega_{\text{упр}} \cdot t)$, умножения этой зависимости на число оборотов и интегрирования итогового уравнения от 0 до $\pi/2$

$$E_{\text{сu}} = \frac{88.5 \cdot c \cdot E^4}{2\pi R_0 \omega_{\text{упр}}} \left[\frac{3\omega_{\text{упр}} \cdot t}{8} - \frac{3 \cdot \sin(2\omega_{\text{упр}} \cdot t)}{16} \right]$$

$$\left. \frac{\sin^3(\omega_{\text{упр}} \cdot t) \cdot \cos(\omega_{\text{упр}} \cdot t)}{4} \right]. \quad (9)$$

Текущие значения R_0 получаются после подстановки уравнений (8) и (9) в (7). Так как кривая по уравнению (3) в действительности отличается от косинусоиды, то на практике будут иметь место колебания R_0 относительно среднего радиуса равновесной орбиты $R_{0\text{ср}}$. Максимум отклонения $\Delta R = R_0 - R_{0\text{ср}}$ приходится на угол $\alpha = 50\%$. К этому моменту времени электроны ускорятся до 77% от номинальной энергии, т.е. максимум отклонения ΔR будет наблюдаться в сформировавшемся и сфокусированном пучке. А так как в сильноточных ускорителях для захвата в ускорение большего числа частиц увеличивают сечение ускорительной камеры, то незначительное отклонение радиуса R_0 относительно $R_{0\text{ср}}$ не должно приводить к потере частиц из ускорения.

Для иллюстрации эффекта от применения предложенного способа компенсации потерь энергии ускоряемыми электронами на синхротронное излучение в таблице приведены расчетные параметры разных вариантов индукционного циклического ускорителя.

В циклическом индукционном ускорителе [6] полные потери энергии на синхротронное излучение составляют чуть меньше 1.5% конечной энергии электронов, а уменьшение радиуса равновесной орбиты равно 2.3 см, что является предельным для классического индукционного способа ускорения.

Как правило, управляющее и ускоряющее магнитные поля возбуждаются путем разряда предварительно заряженного емкостного накопителя на индуктивное сопротивление обмотки ускорителя. В рассматриваемом случае управляющее и ускоряющее магнитные поля возбуждаются в каждом цикле ускорения одновременно, но каждое от своего емкостного

Параметр	Величина			
	[6]	данная работа		
Конечная энергия T , МэВ	200	400	500	1000
Ускоряющая эдс $\mathcal{E}_{\text{уск}}$, кВ	2.06	5	10	75
Эдс управляющего поля $\mathcal{E}_{\text{упр}}$, кВ	1	1.2	3	25
Приведенная частота возбуждения управляющего поля $f_{\text{уск}}$, Гц	50	50	80	190
Приведенная частота возбуждения управляющего поля $f_{\text{уск}}$, Гц	50	58	97	153
Среднее значение индукции на равновесной орбите B_0 , Тл	0.33	0.66	0.82	0.83
Средний радиус равновесной орбиты $R_{0\text{ср}}$, см	203	203	203	400
Потери энергии на синхротронное излучение $E_{\text{си}}$, МэВ	2.7	42.4	61.7	130
Отклонение орбиты ускоряемых частиц от $R_{0\text{ср}}$ ΔR , см	-2.3	±1.1	±1.4	±2.5

накопителя. Значение приведенных частот $f_{\text{уск}}$ и $f_{\text{упр}}$ при этом определяются величиной емкости соответствующего накопителя и индуктивностью обмотки, на которую разряжается данный накопитель.

Использование предложенного индукционного способа ускорения с компенсацией потерь энергии на синхротронное излучение позволяет на этом же радиусе равновесной орбиты ($R_0 = 203$ см), т.е. без существенного увеличения массогабаритных параметров ускорителя, получать энергию электронов в 400 МэВ при колебаниях ускоряемого пучка относительно R_0 $\Delta R = \pm 1.1$ см. А при увеличении частоты возбуждения ускоряющего и управляющего магнитных полей (т.е. уменьшения времени ускорения) и небольшом увеличении допуска на ΔR на этом же радиусе можно ускорять электроны до 500 МэВ, т.е. в 2.5 раза больше, чем при традиционном способе ускорения. При этом остаются в силе все достоинства циклического индукционного ускорителя, описанные в работе [6].

И наконец, вполне реальным становится проект индукционного циклического ускорителя на энергию в 1 ГэВ с радиусом равновесной орбиты $R_0 = 4$ м. По массогабаритным параметрам такой ускоритель будет незначительно отличаться от электронного синхротрона "Сириус" [7]. Учитывая прогресс в технике ускорения килоамперных токов, можно ожидать получения электронных пучков с энергией в импульсе порядка 1 МДж и выше. Среди возможных областей практического применения ускорителей такой мощности в работе [2] называются такие, как крекинг сырой нефти, вулканизация силиконов и резины, кросс-связи полимеров, бурение туннелей, сжигание ядерных отходов и др.

Способ компенсации потерь энергии можно использовать и в безжелезных бетатронах на энергию в десятки МэВ [8], в которых наблюдается интенсивное синхротронное излучение.

Список литературы

- [1] *Kapetanakov S.A., Dialetis D., Marsh S.J.* et al. // *Phys. Rev.* 1991. Vol. 44. N 6. P. 3900-3907.
- [2] *Kapetanakov S.A., Len L.K., Smith T.* et al. // *Phys. Fluids.* 1991. Vol. 3. N 8. P. 2396-2402.
- [3] *Kerst D.* et al. // *Phys. Rev.* 1950. Vol. 78. P. 297-303.
- [4] *Иваненко Д.Д., Померанчук И.Я.* // *ДАН СССР.* 1944. Т. 44. С. 343-348.
- [5] *Сергеев Г.И., Шестаков В.Г.* Способ ускорения электронов в бетатроне. А.С. СССР. № 1692297. 15.07.1991 г.
- [6] *Хвастунов М.С.* // *ПТЭ.* 1981. № 3. С. 20-23.
- [7] *Воробьев А.А., Визирь В.А., Габрусенко И.А.* и др. // *Электронные ускорители.* Тр. VI Межвузовской конф. по электронным ускорителям. М.: Энергия, 1968. С. 110-115.
- [8] *Павловский А.И., Кулешов Г.Д., Тарасов А.Д.* // *ПТЭ.* 1976. № 4. С. 58-60.

Научно-исследовательский институт интроскопии
Томского политехнического института

Поступило в Редакцию
22 июля 1992 г.
В окончательной редакции
12 января 1993 г.