

ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЯХ В СХЕМАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ УСКОРИТЕЛЕЙ С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

В. В. ИВАШИН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники).

При сооружении ускорителей заряженных частиц, например, синхротронов или бетатронов, широко применяется подпитка электромагнита ускорителя постоянным током [1, 2, 3]. Известно, что при схемах с подмагничиванием электромагнита потери энергии в стали магнита уменьшаются на 50÷65%, а потери в меди — на 25%. Значительное уменьшение потерь в стали позволяет примерно в два раза увеличивать частоту питания и, следовательно, среднюю интенсивность ускоренных частиц при прежнем тепловом режиме машины. В случае, если максимальная индукция магнитного поля ускорителя определялась не насыщением стали, а тепловым режимом, то при схеме с подмагничиванием появляется возможность увеличить максимальную индукцию и, следовательно, энергию ускоренных частиц.

Известно, что при применении подмагничивания переменная составляющая магнитного потока уменьшается в 2 раза, что приводит к резкому уменьшению компенсирующей реактивную мощность конденсаторной батареи, к уменьшению стоимости силовой системы возбуждения и ускорителя в целом.

Вместе с этим, энергетические соотношения, происходящие в схемах с подмагничиванием, не нашли в литературе сколько-нибудь полного освещения. Это приводит к тому, что при проектировании и изготовлении схем с подмагничиванием выбор элементов схемы делается не оптимальным по стоимости.

В данной работе рассматриваются энергетические соотношения в схемах питания электромагнитов ускорителей с подмагничиванием и выбор реактора в цепи постоянного тока с оптимальными параметрами.

Схемы возбуждения электромагнитов ускорителей с подмагничиванием постоянным током сложны, особенно схемы ускорителей на большие энергии. В таких схемах для снижения напряжения на обмотках применяется разделение конденсаторных батарей на отдельные части [1, 2]. Энергетические соотношения в любых схемах с подмагничиванием одинаковы, и для их рассмотрения эти схемы можно заменить простой схемой замещения (рис. 1).

Ток подмагничивания I_0 от источника постоянного напряжения протекает через обмотку ускорителя с индуктивностью L_y , обеспечивая необходимую степень подмагничивания, и через обмотку реактора с индуктивностью L_p . Переменный магнитный поток создается в ускорителе током $i_{y\sim}$ колебательного контура $L_y C_y$.

Для переменных напряжений контура с током I_0 можно записать

$$U_p + U_y = 0 \quad (1)$$

или

$$L_y \frac{di_{y\sim}}{dt} = -L_p \frac{di_{p\sim}}{dt}.$$

Из этого соотношения следует, что производные токов $i_{y\sim}$ и $i_{p\sim}$ по отношению к направлению тока I_0 имеют разные знаки. Следовательно, когда магнитный поток электромагнита ускорителя увеличи-

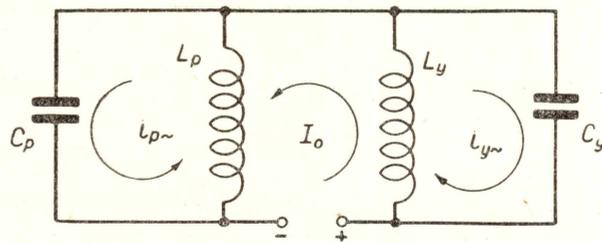


Рис. 1. Схема замещения системы питания электромагнита ускорителя с подмагничиванием: L_y и L_p — электромагниты ускорителя и реактора; C_y и C_p — компенсирующие конденсаторные батареи; I_0 — ток подмагничивания; $i_{y\sim}$ и $i_{p\sim}$ — переменные составляющие тока в ускорителе и реакторе.

вается, то есть токи I_0 и $i_{y\sim}$ направлены согласно, магнитное поле реактора уменьшается, то есть токи I_0 и $i_{p\sim}$ направлены встречно. Чтобы ток через источник постоянного напряжения не изменялся и источник не нагружался реактивной нагрузкой, параллельно реактору включается компенсирующая емкость C_p такой величины, чтобы собственные частоты колебаний контуров $L_p C_p$ и $L_y C_y$ были равны

$$C_p = C_y \frac{L_y}{L_p}. \quad (2)$$

При токе I_0 энергия, запасаемая в реакторе, равна

$$A_{po} = \frac{L_p I_0^2}{2}, \quad (3)$$

а энергия, запасаемая в магнитном поле ускорителя,

$$A_{yo} = \frac{L_y I_0^2}{2}.$$

При токе $I_0 - I_{p\sim}$, где $I_{p\sim}$ — максимальное значение переменной составляющей тока реактора, в магнитном поле реактора запасена энергия

$$A_{pk} = \frac{L_p (I_0 - I_{p\sim})^2}{2}. \quad (5)$$

При уменьшении тока через обмотку реактора энергия его магнитного поля изменяется на величину A_{pp} .

$$A_{pp} = A_{po} - A_{pk} = L_p I_0 I_{p\sim} - \frac{L_p I_{p\sim}^2}{2}. \quad (6)$$

Примем за коэффициент передачи λ отношение энергии $A_{\text{рп}}$ к энергии, запасенной в ускорителе при токе I_0 :

$$\lambda = \frac{A_{\text{рп}}}{A_{\text{ро}}}. \quad (7)$$

Учитывая, что

$$I_{\text{р}\sim} = I_{\text{y}\sim} \cdot \frac{L_{\text{y}}}{L_{\text{р}}}, \quad (8)$$

из соотношения (7) с учетом (4) и (6) получаем

$$\lambda = 2 \frac{I_{\text{y}\sim}}{I_0} - \left(\frac{I_{\text{y}\sim}}{I_0} \right)^2 \cdot \frac{L_{\text{y}}}{L_{\text{р}}} \quad (9)$$

или

$$\lambda = 2\alpha - \alpha^2 \frac{L_{\text{y}}}{L_{\text{р}}}, \quad (9, \text{a})$$

где α — степень подмагничивания ускорителя постоянным током.

Из (9) следует, что максимум передачи энергии из реактора в ускоритель будет при $L_{\text{р}} \rightarrow \infty$. При этом $\lambda = 2\alpha$, $C_{\text{р}} = 0$, то есть при условии максимальной величины передаваемой от реактора энергии, необходимость в батарее конденсаторов $C_{\text{р}}$ отпадает.

Степень подмагничивания α в ускорителях обычно близка к 1. На рис. 2 приведена функция изменения отношения индуктивностей реактора и ускорителя в зависимости от λ , построенная по уравнению

$$\frac{L_{\text{р}}}{L_{\text{y}}} = \frac{\alpha^2}{2\alpha - \lambda} \quad (10)$$

для случая $\alpha = 1$. Из рис. 2 следует, что λ может иметь не только положительные, но и отрицательные значения. Изменение знака коэффициента передачи энергии происходит при $L_{\text{р}} = 0,5 L_{\text{y}}$. Физи-

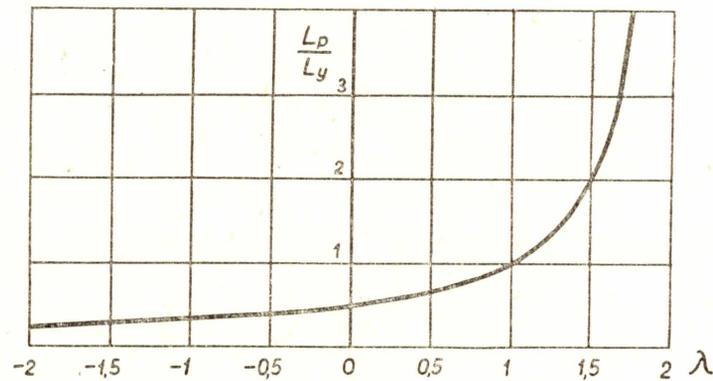


Рис. 2. Кривая зависимости отношения индуктивностей $L_{\text{р}}$ и L_{y} от коэффициента передачи λ .

чески это означает, что при $L_{\text{р}} = 0,5 L_{\text{y}}$ в момент поля с максимальной энергией в ускорителе ток в реакторе изменил направление, а его мгновенное значение равно току I_0 . Для тока в реакторе, соответствующего моменту, когда ток в ускорителе максимален, можно записать

$$I_{\text{р}} = I_0 - I_{\text{р}\sim}.$$

Учитывая соотношение (8) и (10), после преобразований имеем

$$I_p = I_y \left(\frac{\lambda - \alpha}{\alpha^2} \right).$$

при $\alpha = 1 - I_p = I_y \sim (\lambda - 1)$.

На рис. 3 приведены кривые тока реактора и ускорителя, соответствующие различным значениям λ . При $\lambda < 0$ в момент максимума тока в ускорителе энергия реактора больше, чем была при токе I_0 .

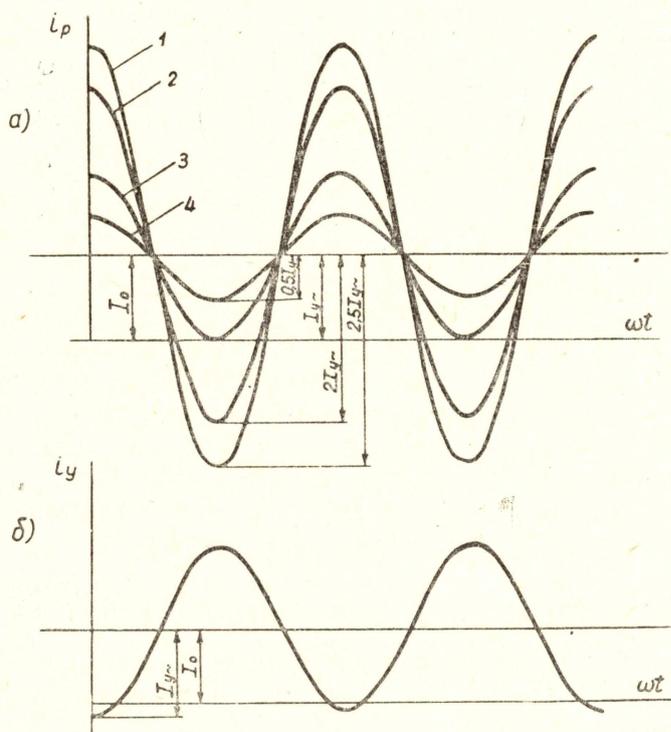


Рис. 3. Кривые токов в реакторе и в электромагните:
 а) токи реактора при $\alpha = 1$. 1. $L_p = 0,4 L_y$, $\lambda = -0,5$;
 2. $L_p = 0,5 L_y$, $\lambda = 0$; 3. $L_p = L_y$, $\lambda = 1$; 4. $L_p = 2 L_y$, $\lambda = 1,5$.
 б) ток ускорителя при $\alpha \neq 1$.

Если принять максимальную энергию в поле электромагнита ускорителя при токе $I_0 + I_y \sim$ за A , то можно показать, что между электромагнитами реактора и ускорителя и конденсаторными батареями энергия распределяется следующим образом:

$$A_{y0} = \frac{1}{(1 + \alpha)^2} A; \quad (11)$$

$$A_{yc} = \frac{\alpha^2}{(1 + \alpha)^2} A; \quad (12)$$

$$A_{pc} = \frac{2\alpha - \lambda}{(1 + \alpha)^2} \cdot A; \quad (13)$$

$$A_{pn} = \frac{\lambda}{(1 + \alpha)^2} A; \quad (14)$$

$$A_{po} = \frac{\alpha^2}{(1 + \alpha)^2 (2\alpha - \lambda)} A. \quad (15)$$

Из этих соотношений следует, что от величины λ или, что то же самое, от отношения L_p к L_y зависит только распределение энергии между реактором и шунтирующей его конденсаторной батареей. В табл. 1 приведено распределение энергии в элементах схемы питания при различных коэффициентах передачи λ в случае $\alpha = 1$.

Таблица 1

№ пп	λ	L_p/L_y	A_{p0}	A_{pc}	A_{y0}	A_{yc}	A_{p0}	$A_{pc}+A_{yc}$	A
1	-0,5	2/5	-1/8	5/8	1/4	1/4	1/10	7/8	1
2	0	1/2	0	1/2	1/4	1/4	1/8	6/3	1
3	0,5	2/3	1/8	3/8	1/4	1/4	1/6	5/8	1
4	1	1	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	4/8	1
5	1,5	2	3/8	1/8	1/4	1/4	1/2	3/8	1
6	2	∞	1/2	0	1/4	1/4	∞	2/8	1

Как видно из таблицы, с увеличением λ величина необходимой конденсаторной батареи ($A_{pc} + A_{yc}$) уменьшается, а величина реактора (A_{p0}) увеличивается. Выбор параметра λ определяется требованием минимальной величины реактора, минимальной величины конденсаторной батареи C_p или минимальной стоимостью схемы питания ускорителя в целом. Наибольший интерес обычно представляет выбор λ из условия минимальной стоимости, так как стоимость схем возбуждения управляющих магнитных полей ускорителей велика и в значительной степени определяет стоимость ускорителей.

Выбор параметра λ из условия минимальной стоимости

Стоимость реактора и батареи конденсаторов C_p

$$B = B_1 + B_2 = \kappa_1 A_{p0} + \kappa_2 A_{pc} = \frac{\alpha^2 A \cdot \kappa_1}{(1 + \alpha)^2 (2\alpha - \lambda)} + \frac{(2\alpha - \lambda) A \cdot \kappa_2}{(1 + \alpha)^2}, \quad (16)$$

где B_1 — стоимость реактора, руб.;

B_2 — стоимость батареи C_p , руб.;

κ_1 — стоимость запасаения 1 джоуля в реакторе с учетом стоимости источника постоянного напряжения, руб./дж;

κ_2 — стоимость запасаения 1 джоуля в конденсаторах, руб./дж.

Приравнявая производную выражения (16) по λ нулю, после преобразований получаем величину λ_1 , обеспечивающую минимальную стоимость схемы питания

$$\lambda_1 = \alpha \left(2 - \sqrt{\frac{\kappa_1}{\kappa_2}} \right). \quad (17)$$

Индуктивность реактора, соответствующая минимуму стоимости схемы питания, получим при подстановке (17) в (10):

$$L_{p1} = L_y \cdot \alpha \sqrt{\frac{\kappa_2}{\kappa_1}}. \quad (18)$$

Стоимость реактора и емкости C_p , соответствующая λ_1 , определится при подстановке (17) в (16):

$$B_{\min} = \frac{2A\alpha}{(1 + \alpha)^2} \sqrt{\kappa_1 \kappa_2} = 2A_{y0} \alpha \sqrt{\kappa_1 \kappa_2}. \quad (19)$$

Стоимость реактора, соответствующую λ_1 , получаем при подстановке (17) в выражение для B_1 равенства (16):

$$B_1 = \frac{A \cdot \alpha}{(1 + \alpha)^2} \sqrt{\kappa_1 \kappa_2} = A_{y0} \alpha \sqrt{\kappa_1 \kappa_2}, \quad (20)$$

то есть стоимость реактора равна половине общей минимальной стоимости реактора и батареи C_p .

Если выразить стоимости реактора и батареи C_p не в функции от λ , а в функции от L_p , то получим

$$B_1 = \frac{L_p I_0^2}{2} \kappa_1, \quad (21)$$

$$B_2 = \frac{C_p U^2}{2} \kappa_2 = \frac{\kappa_2 \alpha^2 I_0^2 L_y}{2 L_p}. \quad (22)$$

Из этих выражений следует, что стоимость реактора изменяется в функции от L_p по линейной зависимости, а стоимость конденсаторной батареи — по гиперболической. Из рис. 4 видно, что минимум

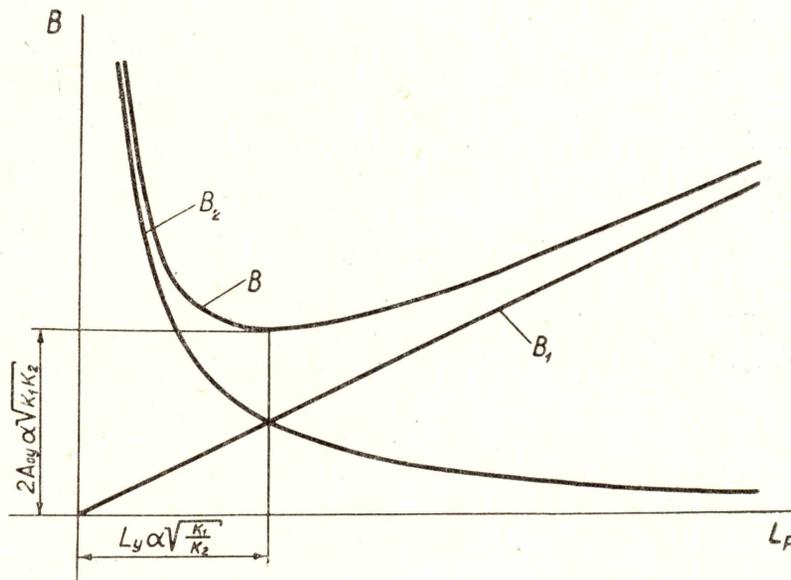


Рис. 4. Зависимости стоимости реактора (B_1), стоимости батареи C_p (B_2) и их общей стоимости (B) от индуктивности реактора.

кривой B относительно L_p выражен не четко и при изменении L_p на 10÷15% стоимость реактора и батареи C_p изменяется незначительно.

Максимальное значение тока в реакторе также можно выразить через ток подмагничивания и коэффициенты κ_1 и κ_2

$$I_{pm} = I_0 + I_{p\sim}$$

и после преобразований с учетом формул (8) и (18) получаем

$$I_{pm} = I_0 \left(1 + \sqrt{\frac{\kappa_1}{\kappa_2}} \right). \quad (23)$$

Значения оптимальной индуктивности и максимального тока в обмотке реактора определяют объем воздушного зазора реактора, запаасаемую в реакторе максимальную энергию и его размеры.

Обмотка реактора может быть рассчитана по эффективному значению тока, которое так же, как и I_{pm} , выражается только через ток подмагничивания I_0 и коэффициенты κ_1 и κ_2

$$I_{p\text{эф}} = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{p\sim}^2}{2}} = I_0 \sqrt{1 + \frac{\kappa_1}{2\kappa_2}}. \quad (24)$$

Выводы

1. При работе схемы питания бетатрона или синхротрона с подмагничиванием постоянным током происходит обмен энергиями между магнитными полями реактора и ускорителя.

2. Минимальная стоимость схемы питания определяется соотношением между коэффициентами, выражающими стоимость накопления 1 джоуля энергии в индуктивном накопителе энергии — реакторе (κ_1) и 1 джоуля энергии в емкостном накопителе — конденсаторе (κ_2). Существует оптимальная индуктивность реактора (L_{p1}) и оптимальный коэффициент передачи энергии от реактора к ускорителю (λ_1), соответствующие минимальной стоимости схемы питания в целом.

3. Максимальный ток реактора, определяющий вместе с индуктивностью L_{p1} объем его воздушного зазора, и эффективный ток реактора выражаются так же, только через коэффициенты κ_1 , κ_2 и ток подмагничивания I_0 . Этими величинами определяются все основные параметры схемы питания, критерием которой является условие ее минимальной стоимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. G. White. CERN Simposium, 1956.
2. S. Waaben. Nuclear Instrument and Methods, 9, 1960.
3. Л. М. Ананьев и др. Индукционный ускоритель электронов — бетатрон. Госатомиздат, М., 1961.