

О ВОЗМОЖНОСТИ САМОСБАЛАНСИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ СИНХРОТРОНАХ

И. П. КАРАБЕКОВ, Ю. Р. НАЗАРЯН

Ереванский физический институт

Докладчик И. П. Карабеков

Устранение азимутальной неоднородности поля в рабочей области электромагнита современного сильнофокусирующего ускорителя является одной из основных задач систем коррекции и авторегулирования. При этом наиболее трудноосуществимым является устранение переменной составляющей этих неоднородностей, возникающих, в частности, из-за емкостных утечек в системе питания фазовых сдвигов тока в ячейках питающего контура фазовых сдвигов поля в отдельных блоках, возмущения внутренних параметров блоков и т. д.

В данной работе предлагается метод устранения переменной составляющей возмущений поля, введением связи между блоками по полю.

Рассмотрим магнитную систему, состоящую из n последовательно соединенных блоков (рис. 1а). Связь между блоками по полю здесь может быть осуществлена включением корректирующих обмоток в параллель. Однако эта связь должна быть пронормирована к потоку в строго заданной рабочей области зазора магнита из-за неизбежных отклонений потоков рассеяния в отдельных блоках. Поэтому в дальнейшем речь будет идти о выравнивании именно этой части магнитного потока $\Delta\Phi_i = m_i \Phi_i$.

На рис. 2 приведена эквивалентная схема такого соединения, приведенная к одному блоку и позволяющая рассчитать переменную составляющую потока в заданной части зазора. Здесь генератор тока Γ_1 создает ток, равный току в основной обмотке блока, генераторы Γ_2 и Γ_3 создают токи, равные:

$$I_2 = \frac{U_1 i}{R_1 i + R_2}; \quad I_3 = \frac{U_2}{R_1 i + R_2}. \quad (1)$$

В этих выражениях

$$R_{1i} = \frac{|U_{1i}|}{|I_{1i}|} \text{ и } R_2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{1i}}}, \quad (2)$$

где U_{1i} — напряжение на корректирующей обмотке $i^{\text{го}}$ блока, когда она не подключена параллельно ко всем остальным обмоткам и по первичной обмотке течет ток I_1 . Величина U_2 — напряжение между шинами, к которым параллельно подключены все $n-1$ блоки (кроме $i^{\text{го}}$). При достаточно большом числе блоков n величина

$$U_2 = nI_1R_2. \quad (3)$$

Величина R_0 в эквивалентной схеме определяется отношением:

$$R_0 = \frac{|U_{gi}|}{|I_1|}, \quad (4)$$

где U_{gi} — напряжение, индуцированное переменной составляющей поля $\Delta\Phi_i = m_i\Phi_{mi}\cos\omega t$ на безжелезную рамочную катушку, помещенную в рабочую область зазора блока.

Из эквивалентной схемы видно, что падение напряжения на R_0 , являющееся по определению U_g , равно:

$$I_1R_{0i} + \frac{U_2 - U_{1i}}{R_{1i} + R_2}R_{0i} = U_{gi}. \quad (5)$$

Условие равенства магнитных потоков в заданной области зазоров всех n блоков определится требованием $\frac{U_{gi}}{R_{0i}} = U_{0i} = \text{const}$. Подставив в (5) значения входящих в него компонент из (1), (2), (3), (4), получим необходимое соотношение между параметрами блока, осуществление которого позволит включить блоки в систему самосбалансировки, в которой переменная составляющая азимутальной неоднородности поля будет отсутствовать:

$$\frac{U_0 - U_{gi}}{U_{gi}} = \frac{nR_2 - R_{1i}}{R_{1i} + R_2}. \quad (6)$$

Здесь U_{gi} — есть напряжение на датчике до включения $i^{\text{го}}$ блока в систему самосбалансировки.

Соотношение (6) для отдельных блоков осуществляется введением дополнительной согласующей обмотки и потенциометра Π_i по схеме, показанной на рис. 16.

Рассмотрим устойчивость (6) к малым изменениям R_{1i} . Пусть R_{1i} изменилось на величину δR_{1i} . При этом напряжение на датчике должно

измениться на величину δU_{gi} . Покажем, что для малых δU_{gi} и δR_{1i} справедливо равенство:

$$\frac{\delta U_{gi}}{U_{gi}} = \frac{\delta R_{1i}}{R_{1i}} \quad (7)$$

Действительно, если $\Delta \Phi_i = m_i \Phi_i$, то $U_{gi} = m_i U_{1i}$. Согласно (2) можно написать:

$$\frac{\delta U_{gi}}{U_{gi}} = \frac{\delta m_i U_{1i}}{m_i U_{1i}} = \frac{\delta R_{1i} I_1}{R_{1i} I_1} = \frac{\delta R_{1i}}{R_{1i}}. \quad (8)$$

Теперь в (6) к R_{1i} и U_{gi} прибавим соответственно δR_{1i} и δU_{gi} и, разложив обе части в ряд в предположении, что $R_2 \ll R_{1i}$ и $nR_2 \approx R_{1i}$, получим:

$$\frac{U_0 - U_{gi}}{U_{gi}} = \frac{\delta U_{gi}}{U_{gi}} = \frac{nR_2 - R_{1i}}{R_{1i} + R_2} = \frac{\delta R_{1i}}{R_{1i}} \quad (9)$$

С учетом (8) можно утверждать, что при малых возмущениях R_{1i} соотношение (6) не изменится.

Величина R_2 при случайных возмущениях R_{1i} изменится на величину

$$\delta R_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \delta R_{1i}}{n^2}. \quad (10)$$

Поэтому при больших значениях n величину R_2 можно с хорошей точностью считать постоянной.

Рассмотрим фазовые соотношения между переменными составляющими магнитных потоков в блоках, включенных в систему самосбалансировки. Пусть поле в i -м блоке до включения в систему самосбалансировки было сдвинуто по фазе относительно напряжения U_2 на величину φ_i . Выражение (5) переписется в виде:

$$m_i U_{1i} \sin(\omega t + \varphi_i) + \frac{U_{2m} \sin \omega t - U_{1im} \sin(\omega t + \varphi)}{R_2 + R_{1i}} R_0 = U_0, \quad (11)$$

где $m_i = \frac{U_{gim}}{U_{1im}} = \frac{R_{oi}}{R_{1i}}$.

Отсюда видно, что фазовые сдвиги будут полностью скомпенсированы при $R_0 = 0$. Это условие может быть выполнено только при $n \rightarrow \infty$. В реальных условиях амплитуда составляющей поля, имеющая сдвиг фазы φ_i , будет равна:

$$\Delta U_0(\varphi_i) \approx \frac{U_{1im} \cdot R_0}{R_{1i} \cdot n}. \quad (12)$$

Предлагаемая система была исследована экспериментально на 8 магнитных блоках с плоскопараллельными полюсами, собранных из трансформаторной стали. Размеры полюсов и расстояние между ними были соответственно равны 53; 32; 16 мм. Все обмотки были намотаны на спинку блока. Первичная и вторичная обмотки имели по 200 витков и дополнительная 20. Сопротивление потенциометра в ~ 25 раз превышало импеданс дополнительной обмотки и было равно 10 ом. Датчиком поля служила безжелезная катушка, намотанная на плексигласовый каркас, конструкция которой позволяла фиксировать датчик в строго определенной области зазора блоков. Напряжение, индуцированное на датчике, и напряжение между шинами параллельного соединения вторичных обмоток измерялось милливольтметрами типа ВЗ-14. Схема эксперимента показана на рис. 3. Для повышения относительной точности измерения в блоках был использован дифференциальный датчик, состоящий из двух одинаковых катушек, одна из которых была стационарно установлена в девятом опорном блоке. Этот блок первичной обмоткой входил в систему питания. Вторичная обмотка его была отключена от шин параллельного соединения. Точность измерения с помощью опорного блока и дифференциального датчика была не хуже 10^{-4} .

Результаты измерений представлены в табл. 1. Напряжение на выходе датчика до включения вторичных обмоток в параллель даны в графе U_{gi} . В графах R_{0i} и R_{1i} даны значения этих параметров, установленных согласно отношению (6). Начальные отклонения поля в блоках даны в графе $U_{gi} - U_0$, нескомпенсированные возмущения после включения блоков в систему самобалансировки даны в графе ΔU_0 . В последней графе этой таблицы величины первоначальных и остаточных возмущений даны в процентах от требуемого значения поля в блоках $U_0 = 64$ мв. Измерения проводились при $I_1 = 238$ ма, $U_2 = 1,8$ в. Величина $R_2 = 0,945$ ом. Экспериментальные возможности установки позволяли определить R_{0i} и R_{1i} с точностью до $\pm 3\%$, что хорошо согласуется с результатами измерений ΔU_0 .

Для исследования компенсации сдвигов фаз магнитных потоков в отдельных блоках в систему питания вводилась емкость, как это показано на рис. 3. Величина емкости была выбрана равной 20 мкф, при которой участок магнитной системы, состоящей из трех блоков ($L = 90$ мкгн), возбуждался на второй гармонике частоты питающего тока $I(f_1 = 50$ гц). Питание же осуществлялось специально искаженной синусоидой. Результаты измерений U_0 и U_{gi} приведены в табл. 2.

Измеренные значения U_0 хорошо согласуются с расчетами по (12).

Исследование самобалансированной системы в варианте осуществления цепи питания магнитов по схеме резонансного контура в диа-

пазоне частот от 20 до 200 гц показали независимость метода от этих условий.

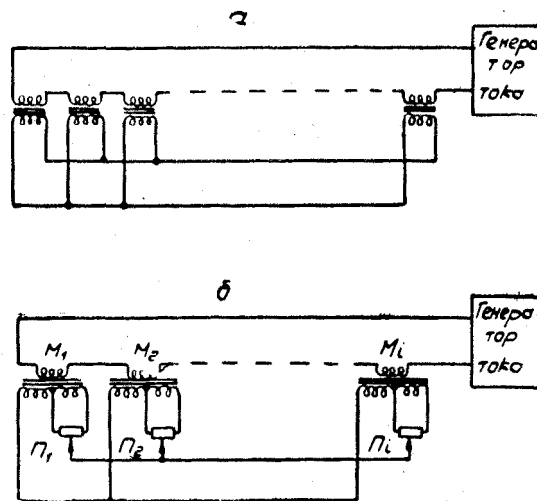
Наличие подмагничивания может привести к изменению R_{oi} и R_{ii} . Поэтому определение этих параметров в отдельных блоках необходимо производить при номинальном значении

Таблица 1

R_{oi} (ом)	1	2	3	4	5	6	7	8
бл п/п	0,275	0,260	0,272	0,291	0,243	0,265	0,26	0,292
R_k (ом)	7,67	7,31	7,68	8,35	6,79	7,54	7,34	8,32
U_{ei} (мв)	64,9	62,2	65,0	69,9	58	63,3	6,21	69,9
$U_{ei} - U_o$ (мв)	+ 0,9	- 1,8	+ 1,0	+ 5,8	- 6,0	- 1,7	- 1,9	+ 5,9
ΔU_o (мкв)	+ 30	+ 20	- 10	+ 200	+ 10	+ 20	- 40	- 60
% I % II	1,4 0,04	2,8 0,031	1,7 0,017	9,1 0,31	9,4 0,017	2,7 0,031	2,94 0,062	9,2 0,094

Таблица 2

№ бл. п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
U_{ei} (мв)	104	100	105	63,5	52	57,3	54,5	61,5
U_o (мв)	61,5	63	62,2	60,5	60,5	61,5	61,5	61,0



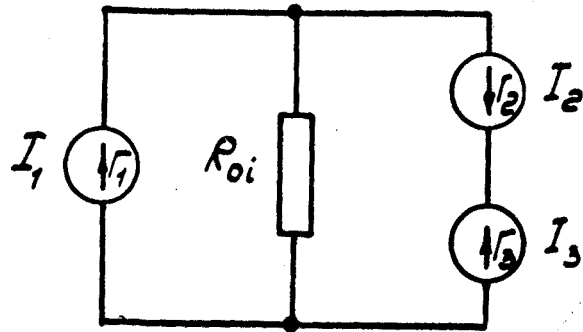


Рис. 2.

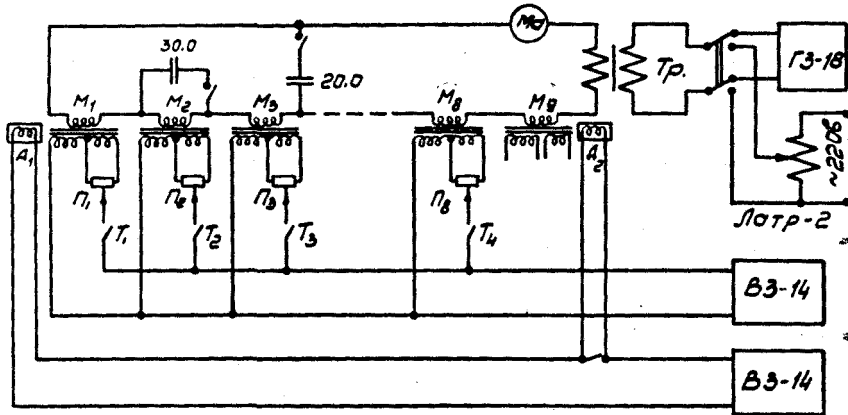


Рис. 3.

ДИСКУССИЯ

Wiederoe: What is the advantage of this scheme over back leg windings closed over adjustable resistors?

Карабков: Сопротивления предлагаемой системы введены для получения требуемого соотношения между параметрами блоков по формуле (6). Они не являются регулируемыми или компенсирующими.