

АЗИМУТАЛЬНАЯ АСИММЕТРИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ЕРЕВАНСКОГО СИНХРОТРОНА

С. К. ЕСИН, К. А. САДОЯН, А. Р. ТУМАНЯН

Определяются основные причины, приводящие к азимутальной асимметрии напряженности магнитного поля на уровне полей инжекции электромагнита кольцевого ускорителя, и описываются некоторые способы уменьшения ее величины.

Величина азимутальной асимметрии напряженности магнитного поля от блока к блоку в момент инжекции, после выполнения специальных мер по выравниванию магнитных характеристик отдельных блоков электромагнита кольцевых ускорителей, определяется, в основном, разбросом активных или реактивных составляющих токов утечек. Рассмотрим причины возникновения и возможности уменьшения величины этих токов на конкретном примере электромагнита Ереванского синхротрона [1].

Активная составляющая токов утечки в системе питания электромагнита

Величина активных токов утечки определяется, главным образом, величиной сопротивления системы водоохлаждения основных обмоток блоков электромагнита по отношению к земле. Упрощенная схема питания основных обмоток блоков электромагнита Ереванского синхротрона в ее первоначальном варианте с учетом активных и емкостных токов утечек представлена на рис. 1.

Величина тока активной утечки узла С, обусловленная переменной составляющей напряжения на блоках, определится из соотношения

$$J_{yc} = \frac{2U_{гp}}{R} \left(\frac{L_{p1}}{L_{p1} + L_{p2}} - \frac{L_l}{3L_l + L_{u1}} \right).$$

Ток в контуре изменяется по следующему закону:

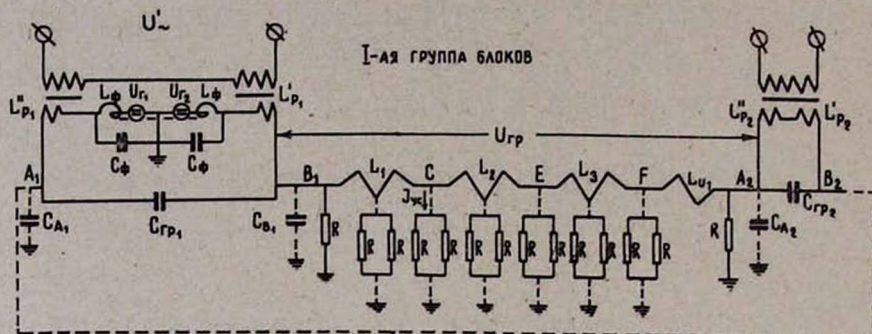
$$L_{\text{конт}} = \hat{J}_{\sim} (k - \cos \omega t),$$

где $k = \frac{J}{\hat{J}_{\sim}}$,

тогда

$$U_{гp} = L_{гp} \frac{dJ_{\text{конт}}}{dt} = \omega L_{гp} \cdot \hat{J}_{\sim} \cdot \sin \omega t = \hat{U}_{\sim} \cdot \sin \omega t.$$

Аналогично можно определить J_y и для других узлов. Из-за активных токов утечки имеется систематическая разница в напряженности магнитного поля как между блоками в группе, так и между группами



фиг. 1

C_{A1} — ПАРАЗИТНЫЕ ЕМКОСТИ КАБЕЛЕЙ
 C_{A2} — ПАРАЗИТНЫЕ ЕМКОСТИ КАБЕЛЕЙ
 R — СОПРОТИВЛЕНИЕ УТЕЧКИ БЛЮКОВ
 ПО СИСТЕМЕ ВОДООХЛАЖДЕНИЯ

L_1 — ИНДУКТИВНОСТЬ БЛОКА
 L_{u1} — ИНДУКТИВНОСТЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА

Рис. 1.

блоков. Алгебраическая сумма токов утечки одной группы блоков составляет

$$J_{y_{гр}} = \sum_{m=1}^2 J_{y_m} = \dot{U} \left[\frac{L'_{p1}}{L'_{p1} + L_{p1}} \left(\frac{12}{R} + \frac{2}{R_u} \right) - \frac{L_l}{3L_l + L_{u1}} \left(\frac{18}{R} + \frac{3}{R_u} \right) - \frac{1}{R_u} \right] \sin \omega t.$$

Из данного выражения видно, что при правильном подборе отношений $\frac{L'_{p1}}{L_{p1}}$ и $\frac{L_l}{L_{u1}}$ и при соответствующем расположении измерительного блока L_u в группе блоков можно добиться $J_{y_{гр}} = 0$. Тогда из-за активных токов утечек по системе водоохлаждения сохранится систематическая разница токов только между блоками внутри групп блоков. Из рис. 1 видно, что максимальная разница в напряженности магнитного поля внутри любой группы будет между 1 и 2 блоками и составит

$$\frac{\Delta H}{H_{инж}} = \frac{4\dot{U} \cdot \sin \omega t_{инж}}{J_{инж} \cdot R} \left(\frac{L'_{p1}}{L'_{p1} + L_{p1}} - \frac{L_l}{3L_l + L_{u1}} \right),$$

где $H_{инж}$, $J_{инж} = \dot{J} \cdot (k - \cos \omega t_{инж})$ соответственно напряженность магнитного поля и ток в электромагните в момент инжекции, $t_{инж}$ — момент инжекции.

Если же $J_{y_{гр}} \neq 0$, тогда суммарный ток всех групп блоков замкнется через заземленную шину первого реактора, создав скачок в напряженности поля между 1 и 16 группой блоков, разный

$$\frac{\Delta H}{H_{\text{ниж}}} = \frac{\sum_{l=1}^{16} J_{\text{гр}l}(t - t_{\text{ниж}})}{J_{\text{ниж}}}.$$

Параметры резонансного контура электромагнита Ереванского синхротрона оказались таковыми, что удалось легко достигнуть $J_{\text{гр}l} \approx 0$, а разница в напряженности магнитного поля при инжекции между 1 и 2 блоками в каждой группе блоков при номинальном режиме питания электромагнита ($U_{\text{гр} \sim \text{эф}} = 4400$ в, $\sin \omega t_{\text{ниж}} \approx 0,3$, $f = 47$ ц, $J_{\text{ниж}} = 20$ а) составила менее 0,013%. При этом требуется, чтобы сопротивление водяного столба R было не менее 2 Мом, что соответствует удельному сопротивлению охлаждающей воды, равному 40 ком. см. Это дает возможность отказаться от производства глубокообессоленной воды и использовать для охлаждения обмоток электромагнита обычную дистиллированную воду.

Характер распределения активных токов утечек, обусловленных наличием постоянной составляющей тока в электромагните, показан на рис. 2в, где ΔJ — изменение основного тока электромагнита в соответствующих группах, U_- — распределение постоянного напряжения по контуру электромагнита. При удельном сопротивлении охлаждающей

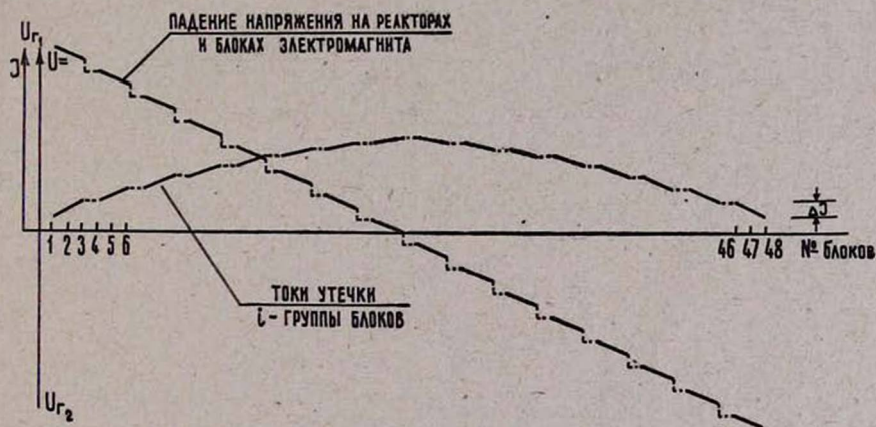


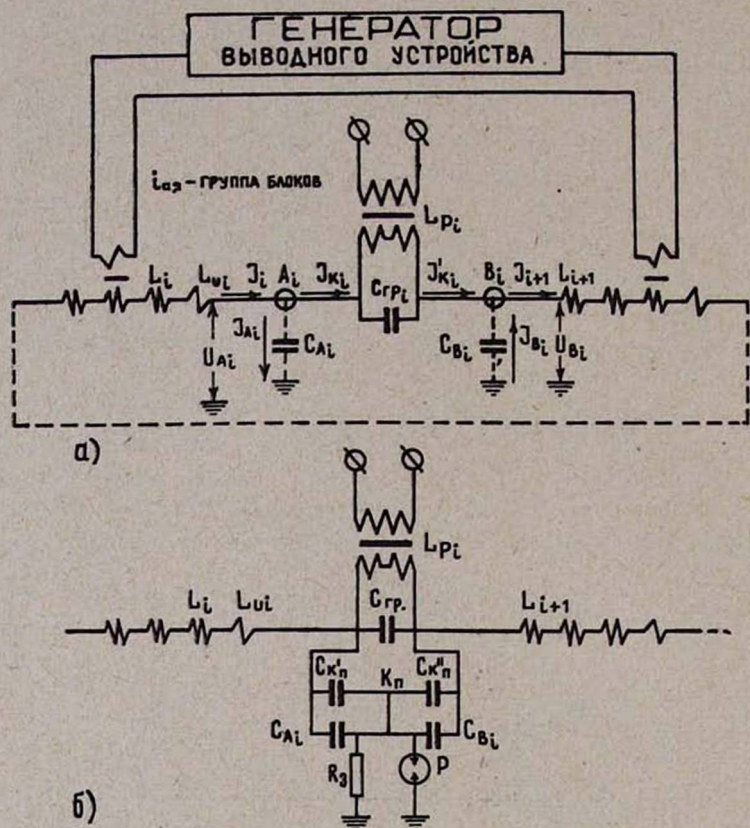
Рис. 2.

воды 40 ком. см, максимальная разница в напряженности магнитного поля, существующая между 1 и 8 или 8 и 16 группами блоков, составляет не более 0,1%, что может быть легко компенсировано оперативными системами коррекции магнитного поля.

Емкостная составляющая токов утечки в электромагните

Силовая электрическая связь между группами конденсаторных батарей и группами блоков электромагнита осуществляется кабелями типа КШВГ. Указанные кабели имеют емкость „жила-экран“ порядка 0,0015 мкф на погонный метр.

Наличие этой паразитной емкости (рис. 3а) приводит к изменению распределения токов между группами блоков (3) вследствие появления паразитных емкостных токов утечки.



- P — РАЗРЯДНИК
 R_3 — ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
 $C_{K'n}$ — КОНДЕНСАТОРЫ НУЛЕВОЙ ТОЧКИ
 $C_{K''n}$

Рис. 3.

В таблице 1 приведены значения паразитных токов, соответствующих номинальному режиму питания электромагнита. Разность токов между соседними группами имеет в основном один и тот же знак, кроме 1 и 16 групп, где контур нагрузки заземлен. Суммарный ток утечки всех кабелей возвращается в контур через заземление средней точки 1-й группы и на эту величину отличаются токи в 1 и 16 группах. Одинаковость знака разностных токов объясняется следующими причинами: а) кабели, выходящие из узлов $A_1, A_2, \dots, A$, длинее кабелей, выходящих из узлов $B_1, B_2, \dots, B$, вследствие конструкции здания

ускорителя; в) потенциал узлов $A_1, A_2 \dots A$ по отношению к земле выше потенциала узлов $B_1, B_2 \dots B$ вследствие несимметричности заземленной точки.

Таблица 1

№ групп	Паразитные емкости кабелей КШВГ в (МКФ)		Паразитные токи		Разность паразитных токов	$\frac{\Delta H}{H_{\text{ниж}}}$ (%)
	узлов A	узлов B	узлов A	узлов B		
1	0,615	0,47	0,390	0,271	0,129	0,554
2	0,615	0,395	0,340	0,227	0,163	1,255
3	0,76	0,30	0,482	0,173	0,309	2,584
4	0,605	0,31	0,384	0,178	0,206	3,460
5	0,82	0,31	0,520	0,178	0,342	4,940
6	0,73	0,335	0,463	0,193	8,270	6,101
7	0,575	0,395	0,363	0,227	0,136	6,686
8	0,60	0,526	0,381	0,303	0,078	7,021
9	0,557	0,56	0,353	0,322	0,031	7,155
10	0,52	0,59	0,331	0,339	-0,008	7,120
11	0,462	0,632	0,293	0,363	-0,070	6,819
12	0,62	0,50	0,394	0,288	0,105	7,271
13	0,62	0,58	0,393	0,334	0,059	7,525
14	0,545	0,523	0,346	0,301	0,045	7,718
15	0,634	0,596	0,402	0,343	0,069	8,015

Паразитные токи силовых кабелей составляют заметную величину по отношению к току инжекции, а по фазе совпадают с переменной составляющей тока электромагнита и, тем самым, создают сильную азимутальную асимметрию на уровне полей инжекции. Величина асимметрии поля при инжекции

$$\frac{\Delta H}{H_{\text{ниж}}} = \frac{\Delta J_{1-16}}{J_{\text{ниж}}} = \left[\frac{L_{p1}}{L_{p1} + L_{p1}} \sum_{i=2}^{16} C_i - \sum_{i=2}^{16} C_{B_i} \right] \frac{\cos \omega t_{\text{инж}}}{C_{\text{гр}} (k - \cos \omega t_{\text{инж}})},$$

где

$$\omega^2 = \frac{1}{L_{\text{гр}} \cdot C_{\text{гр}}}, \quad L_{\text{гр}} = L_{p1} + 3L_i + L_{u1},$$

зависит от конкретных величин паразитных емкостей, отношения постоянного и переменного токов в электромагните и момента инжекции. Расчетная величина азимутальной асимметрии напряженности магнитного поля на уровне малых полей при номинальном режиме питания электромагнита приведена в табл. 1.

Рассмотрим распределение токов в группах блоков электромагнита при действии устройства, возмущающего магнитное поле для вывода гамма-пучков.

Вывод ускоренного пучка осуществляется созданием локального возмущения равновесной орбиты. Для этого на дополнительные обмотки определенных блоков в конце цикла ускорения при $t = t_{\text{эжк}}$ подается импульс напряжения, форма которого описывается уравнением

$$U_b = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} U_m \sin \Omega \left(t - k \frac{2\pi}{\omega} + t_{\text{эжк}} \right) \left(1 \frac{2\pi}{k\omega + t_{\text{эжк}}} - 1 \frac{2\pi}{k\omega + t_{\text{эжк}} + \frac{\pi}{\Omega}} \right),$$

где $t_{\text{эжек}}$ — момент эжекции пучка, ω — частота резонансного контура.

Во время вывода пучка суммарный поток всех блоков не должен претерпевать изменения. Следовательно, должно иметь место условие отсутствия обмена энергией между системой питания выводных обмоток и основной системой питания через электромагнитные блоки. В первом приближении это условие обеспечивается соответствующей схемой включения выводных обмоток. Однако в реальном контуре из-за существования паразитных емкостей это условие нарушается. Рассмотрим грубо влияние паразитных емкостей кабелей КШБГ на азимутальное распределение малых полей при работе выводного устройства. Путем некоторых допущений можно привести действие выводного устройства к эквивалентной схеме, состоящей из последовательно соединенных импедансов блоков, паразитных емкостей и эквивалентного генератора. Резонансная частота такой цепочки определяется как

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\sum_{l=k}^{k+4} C_l \frac{\sum_{i=1}^k L_i \sum_{k+1}^{48} L_i}{\sum_{i=1}^{48} L_i}}} = \frac{1}{\sqrt{C_n L_{05}}} \approx 3 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{сек}},$$

где k — номер блока, зависящий от азимута вывода пучка по отношению к месту заземления контура.

Решая уравнение для такой эквивалентной схемы, можно определить ток через заземляющую шину резонансного контура [2] при

$$\frac{3}{4} \frac{\pi}{\Omega} \leq t \leq +\infty,$$

$$i = \frac{C_n \beta U_b'}{2\alpha} \cos \gamma \left\{ e^{-\alpha \left(t + \frac{3}{4\Omega} \right)} \cdot \sin \left[\beta \left(t + \frac{3\pi}{4\Omega} + p \right) \right] + e^{-\alpha \left(t - \frac{3}{4} \frac{\pi}{\Omega} \right)} \cdot \sin \left(t - \frac{3}{4} \frac{\pi}{\Omega} + p \right) \right\},$$

где

$$\gamma = \arctg \frac{\left(\alpha \frac{\pi}{\Omega} \right)^2 + \left(\beta \frac{\pi}{\Omega} \right)^2 - \left(\frac{2\pi}{3} \right)^2}{\frac{4}{3\Omega} \beta \cdot \pi^2},$$

$$p = \frac{1}{\beta} \arctg \left[\frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{\left(\alpha \frac{\pi}{\Omega} \right)^2 + \left(\beta \frac{\pi}{\Omega} \right)^2 - \left(\frac{2\pi}{3} \right)^2}{\left(\alpha \frac{\pi}{\Omega} \right)^2 + \left(\beta \frac{\pi}{\Omega} \right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\Omega} \right)^2} \right],$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \approx \omega_0; \quad \alpha = \frac{r}{2L_{05}}.$$

Для конкретных параметров Ереванского синхротрона в двух последующих циклах в момент инъекции мгновенное значение этого тока будет равно $0,35a$ и $0,12a$. Ток указанной величины будет создавать в двух последующих циклах при инъекции асимметрию поля между 1—24 и 25—48 блоками, равную соответственно $1,8\%$ и $0,7\%$. Компенсация такой азимутальной асимметрии имеющимися средствами практически невозможна ввиду относительно высокой частоты генерации паразитного тока в контуре и зависимости ее величины от момента $t_{\text{инжек}}$ и азимута сброса пучка на мишень.

Способ подавления азимутальной асимметрии

Одним из способов подавления азимутальной асимметрии является подключение к узлам $A_1 \div A_{48}$ или $B_1 \div B_{48}$ дополнительных реактансов, по которым протекает ток ΔJ_n такой, что $J_{A_i} = J_{B_i} + \Delta J_n$, либо

$$\sum_{l=1}^{16} J_{y_{rpl}} = 0. \text{ Возможно также осуществить коррекцию поля в момент}$$

инъекции путем шунтирования дополнительных обмоток блоков реактансами различной величины. Однако оба эти способа имеют тот недостаток, что токи через паразитные и корректирующие элементы имеют значительную величину и изменяются при изменении внешних условий или режима работы ускорителя.

Более эффективный способ, использованный на Ереванском синхротроне, состоит в том, что экраны кабелей КШВГ отсоединяются от заземленной шины и подключаются к искусственно созданным нулевым точкам k_n соответствующих конденсаторных батарей (рис. 3-б). При этом экраны кабелей имеют нулевой потенциал по отношению к земле и, несмотря на наличие емкости экран-земля, паразитный ток, текущий в землю, отсутствует. Этот вариант одновременно уменьшает влияние пульсации постоянного тока на азимутальную асимметрию магнитного поля, поскольку последовательно с емкостью жила-экран подключается емкость экран-земля. Уменьшение емкости жила-земля (при указанном соединении более чем на два порядка) сильно увеличивает собственную частоту эквивалентного контура, рассматриваемого при анализе работы выводного устройства, а вместе с этим и затухание амплитуды свободных колебаний в контуре к моменту инъекции в последующих циклах.

Азимутальная асимметрия напряженности магнитного поля в электромагните Ереванского синхротрона была устранена методом зануления экранов силовых кабелей. Оставшееся отличие около $0,6\%$ в напряженности магнитного поля между 1 и 16 группой блоков объясняется паразитной емкостью измерительных кабелей и легко устраняется существующими оперативными средствами коррекции. Во избежание появления высокого потенциала на экранах кабелей КШВГ, меж-

ду нулевой точкой каждой группы конденсаторов и земель подключены активное сопротивление порядка 20 ком и низковольтный разрядник.

Ереванский физический
институт

Поступила 11. XII. 1969

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ю. Г. Аїбалян, А. И. Алиханян и др. „Ереванский электронный синхротрон на энергию 6 Гэв“. Труды международной конференции по ускорителям. Дубна 1963. Атомиздат. М. 1964.
2. И. И. Теумин, Справочник по переходным электрическим процессам, Связьиздат. М. 1952.
3. Б. Н. Жуков, Влияние емкостной утечки на азимутальную неоднородность магнитного поля. Сборник Электрофизическая аппаратура, вып. 8. Атомиздат. М. 1969.

ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ԼԱՐՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ԱԶԻՄՈՒՏԱՅԻՆ ԱՍԻՄԵՏՐԻԱՆ ԵՐԵՎԱՆԻ ԱՐԱԳԱՑՈՒՑԻՉԻ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՏՈՒՄ

Ս. Կ. ԵՍԻՆ, Կ. Ա. ՍԱԴՈՅԱՆ, Ա. Ռ. ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ

Որոշվում են օղակաձև արագացուցչի էլեկտրամագնիսի ինժեկցիայի մակարդակի վրա մագնիսական դաշտի լարվածության ազիմուտային ասիմետրիայի բերող հիմնական պատճառները և նկարագրվում են նրա մեծության իշեցման մի քանի եղանակները:

AZYMUTHAL ASYMMETRY OF THE MAGNETIC FIELD STRENGTH OF THE YEREVAN SYNCHROTRON ELECTROMAGNET

S. K. YESIN, K. A. SADOYAN, A. R. TUMANIAN

Basic causes leading to azimuthal asymmetry of the magnetic field strength at the level of injection fields of the ring accelerator electromagnet are determined and certain methods of reducing its quantity are described.