

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОЙ ВЕРШИНЫ ВО ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИНХРОТРОНА

О. А. ГУСЕВ, С. К. ЕСИН, А. П. ЛЕБЕДЕВ, Г. А. МАРТИРОСЯН,
А. Г. НЕЧАЕВ, К. А. САДОЯН, А. Р. ТУМАНЯН

Рассматриваются возможные варианты схем для формирования плоской вершины магнитного поля в синхротроне. Результаты расчетов иллюстрированы количественными данными применительно к Ереванскому синхротрону. Приведены результаты моделирования рассматриваемых схем на ЭВМ.

Реактивная энергия электромагнитов электронных синхротронов на энергию 4—6 Гэв составляет 70—100 Мва, а активные потери 300—600 квт. Для питания магнитов электронных синхротронов применяется схема, в которой индуктивность магнита компенсируется конденсаторной батареей, составляющей с индуктивностью магнита резонансный контур [1].

Резонансная схема позволяет потреблять от источника переменного тока энергию, необходимую только для компенсации активных потерь, обеспечивает требуемую скорость нарастания направляющего магнитного поля и удовлетворяет всем условиям, необходимым для быстрого вывода электронов из ускорителя.

Растянутый во времени вывод электронов, который необходим для целого ряда физических экспериментов, при использовании простого резонансного контура обладает тем недостатком, что из-за изменения величины напряженности направляющего поля за время вывода будут выводиться частицы с различными энергиями. Это сильно затрудняет проведение экспериментов с пучком.

Для обеспечения медленного вывода электронов с постоянной энергией в кривой напряженности направляющего поля, при максимальном ее значении, требуется плоский участок, в котором значение производной поля равно нулю.

Система формирования плоской вершины должна обеспечивать стабильность энергии выводимого пучка частиц $\frac{\Delta E}{E} \leq 0,25\%$. Отношение длительности плоской вершины к продолжительности периода магнитного поля должно быть по возможности большим.

Для частоты повторения циклов 50 Гц технические и экономические соображения ограничивают длительность растяжки величиной 3—4 мсек при вышеуказанных требованиях к стабильности энергии.

В настоящее время опубликован ряд работ [2, 3, 4], в которых определена принципиальная возможность создания плоской вершины в магнитных полях синхротронов.

В этих работах рассматриваются следующие способы получения плоской вершины:

а) Закорачивание конденсаторных батарей резонансного контура при достижении током магнита максимального значения с помощью вентильных выключателей. В ряде случаев, при высоких требованиях к неравномерности поля на плоской вершине, для компенсации активных потерь в магните последовательно с электромагнитом включают источники компенсации потерь.

б) Включение последовательно с конденсаторной батареей импульсных источников, напряжение которых повторяет закон изменения напряжения конденсаторной батареи на ограниченном участке (вблизи нуля), а полярность противоположна напряжению на емкости. За время работы импульсных источников суммарное напряжение на электромагните поддерживается равным нулю, а в кривой тока магнита формируется плоский участок.

в) Введение в ток магнита гармонических составляющих более высокого порядка по сравнению с основной частотой от независимого источника повышенной частоты.

Для получения плоской вершины требуется введение одной или нескольких гармоник в зависимости от требуемой неравномерности площадки поля.

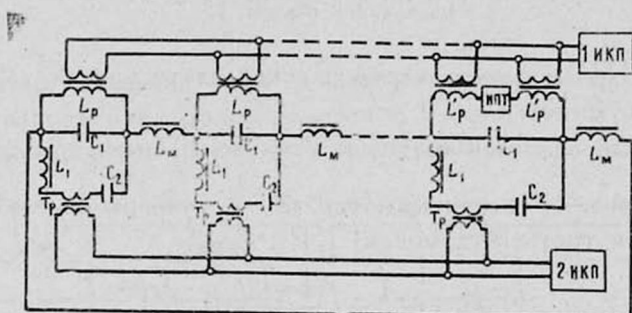


Рис. 1. Схема формирования периодической кривой тока с плоским участком с помощью введения дополнительных гармонических составляющих.

Авторами применительно к Ереванскому синхротрону рассмотрены дополнительно два способа формирования периодической кривой поля с плоскими участками.

Первый способ эквивалентен введению в ток магнита гармонических составляющих более высокого порядка по отношению к основной частоте.

Отличие состоит в том, что гармонические составляющие вводятся не от независимого источника, а с помощью подключения параллельно

основной конденсаторной батарее последовательной LC -цепочки (рис. 1), что исключает необходимость применения специальных источников повышенной частоты и синхронизации их с основным полем. Совместно с основной батареей конденсаторов LC -цепочка образует двухзвенную линию, с помощью которой формируется периодическая кривая тока с плоской вершиной. Полупериод рассматриваемой кривой тока представляет сумму двух гармонических составляющих:

$$i(t) = I_A (\sin \omega_0 t + k \sin n \omega_0 t), \quad (1)$$

где I_A — амплитуда тока первой гармоники,

ω_0 — круговая частота первой гармонической составляющей,

k — коэффициент, определяющий амплитуду высшей гармоники,

n — порядок высшей гармонической составляющей.

Величина „ k “ определяется из условия равенства нулю первых трех производных выражения (1), а „ n “ — из допустимой величины нерав-

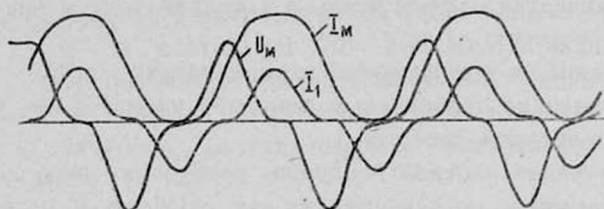


Рис. 2. Осциллограмма, снятая при исследовании схемы, показанной на рис. 1.

номерностей „ δ “ и длительности плоской части кривой „ τ “ (при заданном периоде основной частоты $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$). Параметры схемы, приведенной на рис. 1, рассчитываются по следующим выражениям (для сумм первой и третьей гармоник) [5]:

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_0} \left(\frac{1 + 3k}{1 + 27k} \right), \quad (2)$$

$$C_2 = C_1 \frac{64k}{3(1 + 3k)^2}, \quad (3)$$

$$L_1 = L_0 \frac{(1 + 27k)^2}{192k}, \quad (4)$$

$$U_{c_1} = U_{c_2} = L_0 \omega_0 I_0 \frac{(1 + \delta)(1 + 3k)}{1 - k}, \quad (5)$$

где

$$L_0 = \frac{L_M \cdot L_P}{L_M + L_P}; \quad I_0 = I_M + I_P.$$

I_M — амплитуда тока магнита,
 I_P — амплитуда тока реактора.

Для компенсации активных потерь в такой схеме целесообразно использовать два источника питания, один из которых 1ИКП включается параллельно емкости C_1 , а второй 2ИКП — последовательно с емкостью C_2 .

Мощность источника 1ИКП определяется величиной активных потерь в магнитах L_M и реакторах L_P , а источника 2ИКП в реакторах L_1 . Для определения величины требуемой мощности необходимо рассчитать величины эффективных токов в этих элементах по следующим формулам:

$$I_0 \text{ эфф} = \frac{I_0 \max}{1-k} \sqrt{\frac{(1+k^2)}{2}}, \quad (6)$$

$$I_1 \text{ эфф} = \frac{I_0 \max 24k \sqrt{5}}{(1-k)(1+27k)}. \quad (7)$$

При заданных параметрах τ и T величина неравномерности плоской вершины определяется из выражения

$$\delta = \frac{\sin \omega_0 \frac{\tau}{2} - k \sin n \omega_0 \frac{\tau}{2}}{\sin \omega_0 \frac{T}{4} - k \sin n \omega_0 \frac{T}{4}}. \quad (8)$$

Характер изменения токов в электромагните синхротрона, реакторе L_1 и напряжения на электромагните U_M для суммы первой и третьей гармоник показан на осциллограмме рис. 2.

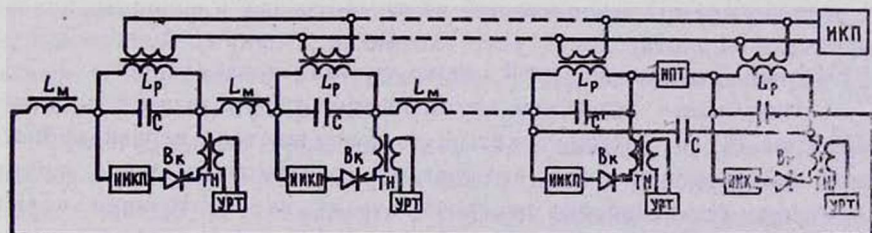


Рис. 3. Схема формирования периодической кривой тока с плоским участком с помощью закорачивания конденсаторных батарей вентильными ключами.

Из приведенной осциллограммы видно, что частота изменения токов и напряжений равна частоте первой гармоники. Это позволяет в качестве источника 1ИКП использовать существующую систему питания, а для источника 2ИКП использовать подобную систему на соответствующую мощность.

Параметры рассмотренной схемы для обеспечения требуемой величины и формы тока в электромагните Ереванского синхротрона таковы:

$$C_1 = 0,33 C_{\text{рез}}; \quad C_2 = 0,44 C_{\text{рез}};$$

$$L_1 = 0,75 L_0; \quad U_{c_1} = U_{c_2} = 1,5 U_{\text{рез}}.$$

Здесь $C_{\text{рез}}$ и $U_{\text{рез}}$ — параметры резонансной схемы, существующей в настоящее время для каждой группы магнитов.

Для $\tau = 2$ мсек схема обеспечивает неравномерность вершины $\delta = \pm 0,07\%$; для $\tau = 3$ мсек — $\delta = 0,5\%$.

Величины параметров L_1 и $U_{c_1} = U_{c_2}$ могут быть значительно уменьшены при использовании суммы первой и пятой гармонических составляющих.

Неравномерность вершины для суммы первой и пятой гармоники составляет $\delta = \pm 0,13\%$ при $\tau = 2$ мсек.

Второй способ формирования плоской вершины магнитного поля, который может быть применен для Ереванского синхротрона, аналогичен рассматриваемому в [4] и состоит в шунтировании конденсаторных батарей резонансного контура в момент перехода напряжения на контуре через ноль.

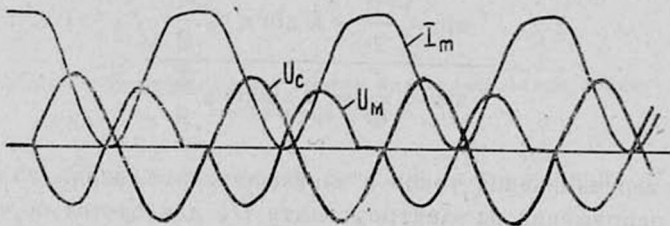


Рис. 4. Осциллограмма, снятая при исследовании схемы, показанной на рис. 3.

Отличие рассматриваемой схемы состоит в следующем:

1. Импульсные источники компенсации потерь в электромагните ИИКП (рис. 3), с помощью которых уменьшается неравномерность плоской части кривой тока, включаются последовательно с вентильным ключом, что позволяет рассчитывать их на протекание полного тока магнита только во время формирования площадки.

2. Длительность замыкания конденсаторных батарей контура регулируется с целью обеспечения синхронизации ускорительных циклов с частотой питающей сети U_c .

Поскольку ряд устройств в ускорительном комплексе, в том числе и инжектор ускорителя, получает питание от промышленной сети, синхронизация ускорительных циклов с частотой сети обеспечивает постоянные начальные условия инжекции и захвата частиц в ускорителе, что позволяет ликвидировать биения интенсивности пучка на вы-

ходе ускорителя (наблюдались на ряде работающих синхротронов с разными частотами контура и промышленной сети).

Регулировка длительности площадки может быть осуществлена привязкой момента времени выключения вентильного ключа к моменту перехода через ноль напряжения промышленной сети.

Величина изменения длительности плоской части магнитного поля при изменении частоты сети определяется пределом изменения частоты питающей сети и не превышает 200 мксек.

Выключение вентильного ключа производится размагничиванием насыщающегося трансформатора ТН от специального устройства размагничивания УРТ.

На осциллограмме рис. 4. показан характер изменения напряжения и тока в магните при формировании плоского участка кривой поля вторым способом.

Следует отметить, что при формировании плоской вершины с помощью закорачивания конденсаторных батарей возможна компенсация активных потерь от одного источника постоянного тока.

В такой схеме мощность источника постоянного тока должна быть увеличена для компенсации потерь от постоянной и переменной составляющих, причем быстродействие источника должно быть достаточно высоким для регулирования тока магнита за время формирования плоской части кривой тока.

Такой метод компенсации активных потерь может быть предложен при проектировании новых синхротронов на большие энергии 50 — 60 Бэв, в которых величина активных потерь должна составлять не более 1% полной энергии, запасаемой в электромагните синхротрона. Неравномерность плоской вершины при такой добротности контура составит $\delta \leq \pm 0,3\%$ без дополнительных мер уменьшения неравномерности.

Рассмотренные схемы могут быть использованы для создания плоской вершины в магнитном поле синхротрона. Преимуществом схемы, показанной на рис. 1, является отсутствие активных элементов в главных токовых цепях электромагнита. Недостатком является существенное увеличение энергоемкости оборудования.

Схема, представленная на рис. 3, позволяет получить меньший уровень неравномерности плоской части поля и обеспечивает синхронизацию кривой тока магнита с сетью, однако включение активных элементов в резонансный контур снижает надежность системы.

Выбор той или иной схемы следует делать, исходя из конкретных условий после тщательного анализа стоимости изготовления оборудования и надежности его работы в существующей системе питания.

Ереванский физический
институт

Поступила 17.III.1971

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В. П. Борисов, Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (М., 9—16 октября 1968 года). М., 1970.
2. J. Riedel, Magnet Flat Topping Symposium Summary, PPAD—581—D, Princeton University, USA, February 9, 1966.
3. D. Huttar, PPAD—597—D, Princeton University, USA, August 17, 1966.
4. N. Marks, Preprint EL/TM—25.
5. В. И. Беспалов, А. М. Кубарев, Радиотехника. 17, № 7 (1962).

ՍԻՆԽՐՈՏՐՈՆԻ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ԿԱԽՎԱԾՈՒԹՅԱՆ
ՀԱՐԹ ԳԱԳԱԹԻ ԿԱԶՄԱՎՈՐՄԱՆ ՄԻ ՔԱՆԻ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ,

Օ. Ա. ԳՈՒՍԵՎ, Ս. Կ. ԵՍԻՆ, Ա. Պ. ԼԵԲԵԴԵՎ, Հ. Ա. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ,
Ա. Գ. ՆԵՉԱԵՎ, Ա. Ռ. ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ

Դիտարկվում են սինխրոտրոնի մագնիսական դաշտի հարթ զազաթի կազմավորման սխեմաների հնարավոր մի քանի տարբերակներ: Հաշվումների արդյունքները ցուցադրված են նրկվանյան սինխրոտրոնի նկատմամբ կիրառելի քանակական տվյալներով: Բերված են դիտարկված սխեմաների մոդելների հաշվումների արդյունքները՝ ստացված էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի միջոցով:

SOME POSSIBILITIES OF FLAT TOP FORMATION IN TIME DEPENDENCE OF THE SYNCHROTRON MAGNETIC FIELD

O. A. GUSEV, S. K. YESIN, A. P. LEBEDEV, G. A. MARTIROSSIAN,
A. G. NECHAEV, K. A. SADOYAN; A. R. TUMANIAN

The possible versions of the schemes for flat top formation of the magnetic field in a synchrotron have been considered. The results of calculations are illustrated with quantitative data for the Yerevan synchrotron. The results of modelling of the considered schemes on a computer are given.