

Опыт эксплуатации и модернизации источников питания септум-магнитов для вывода пучка из У-70

Г.Т.Кузьмин, В.В.Лапин

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Источники питания (ИП) септум-магнитов (СМ или ОМ) для медленного вывода (МВ) пучка из У-70 были разработаны в НИИЭФА им. Д.В.Ефремова в соответствии с требованиями, изложенными в [1]. Проект предусматривал стабильность токов на плато $\pm 0.1\%$, допустимую амплитуду пульсаций 0.1% в диапазоне регулировки $(0.25 \div 1)I_{max}$ (I_{max} равнялся 16 кА для ОМ-20 и 16,8 кА для ОМ-22 и ОМ-28, замененного позднее на ОМ-26). В качестве силового регулирующего элемента был применен тиристорный выпрямитель, выполненный по эквивалентной 24-фазной параллельной схеме. В проектной схеме использовался фазосдвигающий автотрансформатор АТФ-250/10, имеющий два выходных напряжения 10 кВ, сдвинутых относительно сетевого на ± 7.5 эл.градуса, и две группы силовых трансформаторов (СТ) 10/0.037 кВ со сдвигом ± 15 эл.градусов.

В ходе пуско-наладочных работ проектная схема подверглась вынужденным изменениям. Основное изменение заключалось в отказе от 24-фазной схемы, поскольку оказалось, что ток короткого замыкания за автотрансформатором превышает допустимый по динамической и термической устойчивости для АТФ-250/10. В результате при к.з. в силовом трансформаторе ИП ОМ-28 автотрансформатор АТФ-250/10 был разрушен без возможности восстановления. В связи с этим было принято решение о построении ИП с параллельным включением двух эквивалентных 12-фазных схем с непосредственным подключением к сети 10 кВ. Кроме того, была изменена схема и конструкция обмоток 10 кВ, поскольку их изоляция оказалась недостаточной для реальных перенапряжений в системе электроснабжения. При этом выходное напряжение СТ было увеличено до 51 В, поскольку в системе питания ОМ-28 с максимальной длиной шинпровода от ИП до СМ проектное напряжение было недостаточно для получения максимального тока. Одновременно с перечисленными техническими решениями разработчиками системы был увеличен допуск на амплитуду пульсаций токов до 0.2% в диапазоне регулировки токов $(0.5 \div 1)I_{max}$.

Допуск на пульсации токов в СМ выбирался исходя из их влияния на размер и расходимость пучка в точке промежуточного фокуса и сохранения выбранного резерва свободной апертуры в канале транспортировки с учетом возможной практической реализации допуска [2]. Однако после модернизации СМ [3] была обнаружена сильная модуляция выведенной интенсивности пульсациями токов в СМ. На рис. 1 дана осциллограмма пульсаций тока в ОМ-20, выведенной интенсивности МВ (1а) и полный сигнал выведенной интенсивности (1б).

Анализ этой ситуации показал следующее. Максимальное воздействие на интенсивность выведенного пучка оказывают пульсации ОМ-20. После указанного выше изменения сильноточной схемы ИП основная частота пульсаций стала равной 600 Гц вместо 1200 Гц в проектной схеме. Модернизация СМ проводилась в два этапа. После первого этапа ОМ-20 был оставлен одновитковым, и амплитуда пульсаций тока 600 Гц в нем практически не изменилась и была равна 14.4 А, что составляет $1.05 \cdot 10^{-3}$

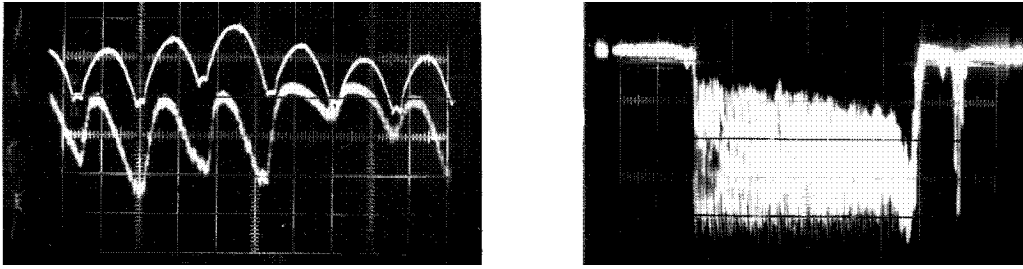


Рис. 1: (1а) Пульсации тока в ОМ-20 (верхний луч, 40 А/дел) и выведенной интенсивности (нижний луч, 1 В/дел), 1 μ сек/дел. (1б) Сигнал выведенной интенсивности 1 В/дел; 0.1 сек/дел.

от рабочего тока ($I_{раб} = 13.6$ кА). После установки двухвиткового септума рабочий ток уменьшился вдвое, а активное сопротивление цепи из СМ и шинпровода увеличилось только в 1.6 раза. В итоге амплитуда пульсаций стала равной 17.1 А, что равно $2.5 \cdot 10^{-3} I_{раб}$ ($I_{раб} = 6.8$ кА). Воздействие на выведенную интенсивность пульсации тока оказывают через рассеянное поле с внешней стороны септума, расположенное в зоне прохождения циркулирующего пучка. В [4] показано, что при расположении внешней стенки септума вровень с лицевой поверхностью магнитопровода поле рассеяния при постоянном токе в основном определяется наличием зазоров между септумом и магнитопроводом и конечной магнитной проницаемостью материала сердечника. Там же выведены формулы для истоковых значений составляющих рассеянного поля:

$$B_{уст.расс.1} = \frac{g}{G} \cdot B_{ид}, \quad (1)$$

где $B_{уст.расс.1}$ — истоковое значение, т.е. значение на внешней стенке септума составляющей, обусловленной зазорами между септумом и магнитопроводом; g — величина зазора; G — высота апертуры магнита; $B_{ид}$ — поле в апертуре идеального магнита.

$$B_{уст.расс.2} = -K \frac{b_{Fe} \mu_0}{G^2 \mu_{Fe}} I, \quad (2)$$

где $B_{уст.расс.2}$ — истоковое значение, т.е. значение на внутренней стенке септума составляющей, обусловленной конечной магнитной проницаемостью магнитопровода; K — геометрический коэффициент; b_{Fe} — длина силовой линии в железе, μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость; μ_{Fe} — относительная магнитная проницаемость магнитопровода; I — ампервитки в обмотке.

При расчетах магнитных систем на переменном токе, когда существенно влияние поверхностного эффекта, пользуются понятием эффективной магнитной проницаемости

$$\mu_{эф} = \frac{|\dot{B}_{срм}|}{\mu_0 |\dot{H}_{ам}|}, \quad (3)$$

где $|\dot{B}_{срм}|$ — усредненное значение амплитуды магнитной индукции по толщине листа; $|\dot{H}_{ам}|$ — амплитуда напряженности поля на границе листа.

$$\mu_{эф} = \frac{\mu_{Fe}}{ab\sqrt{2}} \left(\frac{\cosh 2ab - \cos 2ab}{\cosh 2ab + \cos 2ab} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где a — полутолщина листа; b — величина, обратная глубине проникновения поля. СМ конструкции НИИЭФА имели магнитопровод из стальных листов толщиной 3 мм, а модернизированные — 9.5 мм с изоляцией через два листа. Для параметров магнитопровода модернизированных СМ [3,5] при рабочем поле в апертуре магнита $B=0.68$ Тл на частоте 600 Гц $\mu_{эф} \approx 0.02\mu_{Fe}$, что означает увеличение $B_{уст.расс.2}$ в 50 раз. В итоге за счет увеличения пульсаций в токе при замене одновиткового магнита на двухвитковый и увеличения толщины листов магнитопровода, поле рассеяния возрастает приблизительно в 15 раз.

Для оценки воздействия пульсаций поля рассеяния в линейном приближении на модуляцию пучка при МВ нужно найти величину поля рассеяния, его распределение в медианной плоскости СМ в функции расстояния x от септума, силу паразитной квадрупольи и, в итоге, скорость изменения частоты бетатронных колебаний \dot{Q} . Используя приведенные в [4] графики функций $F(x/G)$, описывающих распределение $B_{расс1}$ и $B_{расс2}$, из экспериментальной кривой поля рассеяния [5] на постоянном токе находим относительную величину $B_{уст.расс2}$, и $dB_{расс2}/dx$. После умножения на $\mu/\mu_{эф}$ получаем, что $B_{уст.расс2}$ при $f=600$ Гц равно 30% от поля пульсаций в апертуре.

$$\dot{Q} = \frac{f}{2} \cdot \beta_{20} \cdot \Delta K \cdot l, \quad (5)$$

где ΔK — сила паразитной квадрупольи на расстоянии 30 мм от септума (расстояние до циркулирующего пучка около ОМ–20). Получаем $\dot{Q} \approx 0.5$.

Из экспериментальных частотных характеристик систем, влияющих на частоты бетатронных колебаний, известно, что при $f=600$ Гц происходит ослабление воздействия на пучок приблизительно в 10 раз [6], поэтому для сравнения с минимальной скоростью наведения на резонанс примем $Q = 0.05$. Минимальная же скорость наведения на резонанс равна 0.01 [7]. Отсюда видно, что пульсации поля рассеяния недопустимо велики и, пользуясь принятой нормой [7], пульсации следует уменьшить не менее чем в 50 раз.

Уменьшение рабочего тока ОМ в два раза позволяет перекомпоновать сильноточную схему ИП так, как показано на рис. 2, применив дополнительную фильтрацию. Фильтр дает подавление на частоте 600 Гц в 80 раз, приводя пульсации к требуемому уровню. Фильтр имеет частоту сопряжения 70 Гц, что позволяет выбрать частоту среза токового контура равной 30 Гц при запасе по фазе не менее 60 эл.градусов, что в свою очередь обеспечивает приемлемый переходный процесс при включении и достаточную стабильность тока на плато. Аналогичное решение применено в ИП ОМ–22 и ОМ–26. Но поскольку в районе ОМ–22 и ОМ–26 центр пучка находится от септума на расстоянии $50 \div 60$ мм, где вследствие нелинейности поля рассеяния величина dB/dx уменьшается, влияние этих магнитов на модуляцию существенно меньше.

Авторы выражают благодарность О.В.Галендеру, В.А.Новикову, А.В.Дукину, В.И.Гальцеву, Л.В.Васильеву, А.В.Кутвинову за выполнение монтажных работ и измерений.

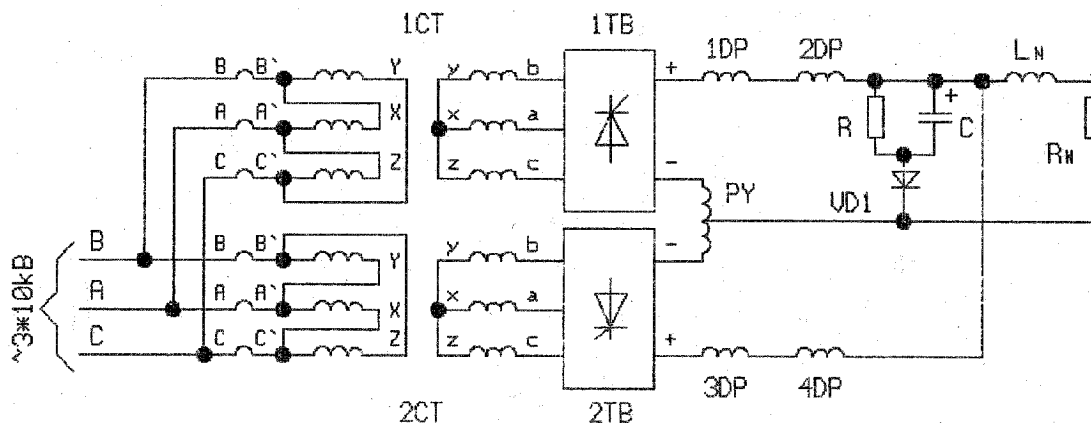


Рис. 2: Схема сильноточных цепей ИП с дополнительной фильтрацией. VD1 В-200, R=0.28 Ом, C=16500 мкF.

Список литературы

- [1] Мызников К.П. и др. – Препринт ИФВЭ 70-51. Серпухов, 1970.
- [2] Татаренко В.М. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. – ИФВЭ, Серпухов, 1983.
- [3] Адо Ю.М., Людмирский Э.А. – Препринт ИФВЭ 84-89. Серпухов, 1984.
- [4] Keizer R.L. Dipole septum magnets. CERN 74-13 (1974).
- [5] Людмирский Э.А. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. – ИФВЭ, Серпухов, 1988.
- [6] Мызников К.П. Труды 5-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, том 2, стр.86.
- [7] Федотов Ю.С. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. ИФВЭ, Серпухов, 1980.