

Экспериментальное изучение влияния пульсаций поля кольцевого электромагнита на динамику пучка в бустере ИФВЭ

С.В. Васин, А.С. Гуревич, В.С. Маршанский, И.Ю. Почуев, А.В. Столяров
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

Быстроциклический протонный синхротрон (бустер ИФВЭ) является инжектором пучка в ускоритель У-70. Конечная энергия ускоренных в нем протонов составляет 1,32 ГэВ. Бустер работает в пакетно-импульсном режиме с частотой повторения импульсов 16,6 Гц при частоте следования пакетов $\sim 0,1$ Гц. Количество импульсов в пакете может изменяться, но не превышает 32. Первые три импульса служат для тренировки и выхода на стационарный режим ряда технологических систем, остальные используются для ускорения пучка. В зависимости от режима работы в бустере может быть ускорено за один цикл от $2,0 \cdot 10^{11}$ до $9,0 \cdot 10^{11}$ протонов.

Исследование пульсаций

В течение ряда лет на бустере ИФВЭ ведется изучение пульсаций поля в кольцевом электромагните (КЭМ). Электромагнит состоит из 12 периодов, в каждом из которых размещены 2 заворачивающих магнитных блока и триплет [1]. Величина поля в рабочей части магнитного цикла изменяется от 1390 Гс (ток 400 А) до 12000 Гс (ток 3,6 кА). Форма магнитного цикла показана на рис. 1. Существование пульсаций было обнаружено по измерениям динамики орбиты в начальной части ускорения в интервале $\sim 1 \div 5$ мс от инжекции пучка. На этом временном интервале происходят основные потери частиц, до 35% (рис. 2). Возможность вести измерения орбиты появляется после группировки пучка в сгусток к 1-й мс.

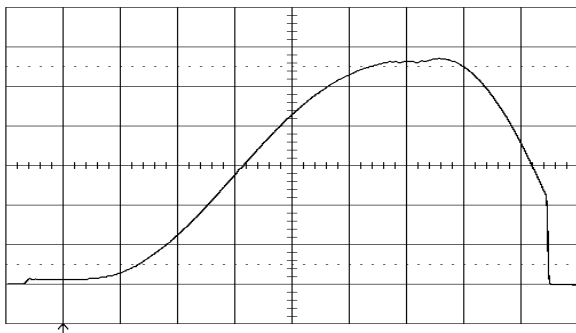


Рис. 1. Форма магнитного цикла (стрелкой указан момент инжекции пучка, развертка 5 мс/дел.).

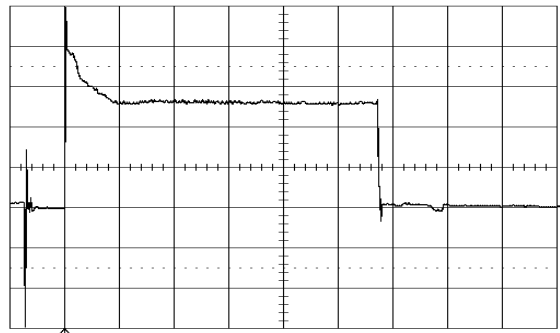


Рис. 2. Типичный характер потерь пучка при ускорении; выводимая интенсивность $9 \cdot 10^{11}$.

Выяснилось, что в искажениях горизонтальной орбиты присутствует 2-я азимутальная гармоника, процесс развития которой имеет колебательный характер с частотой около ~ 700 Гц и нарастающей амплитудой. Похожим образом ведет себя и средний радиус орбиты пучка $\langle R \rangle$.

Результаты наблюдений показали, что поведение пульсаций от сеанса к сеансу носит устойчивый характер. На рис. 3 представлены данные по измерениям среднего радиуса орбиты пучка (1), синусной (3) и косинусной (2) компонент 2-й гармоники орбиты.

На рис. 4 показана, за вычетом постоянной составляющей, разность ΔX орбит X_1 и X_2 , измеренных через полволны на времени $T_1 = 4,0$ мс и $T_2 = 4,7$ мс. Вертикальные линии сетки (рис. 4) нанесены в соответствии с размещением пикап-электродов по азимуту ускорителя. В каждой из орбит дополнительные искажения составляют $\sim \pm 4$ мм, но за счет изменения фазы колебания на $\sim 180^\circ$ в разности ΔX искажения удваиваются. Свободная полуапертура камеры имеет при инжекции величину $40 \div 45$ мм, таким образом, пульсации приводят к потере $\sim 10\%$ в полуапертуре и соответственно к $\sim 20\%$ – в горизонтальном акцептансе.

Существование столь большой по амплитуде 2-й гармоники орбиты нельзя объяснить разбросом магнитных характеристик заворачивающих блоков. При случайном распределении ошибок поля амплитуды гармоник, вызываемые целыми резонансами, падают с расстоянием от рабочей точки до резонанса. В данном случае рабочая точка ускорителя на протяжении цикла поддерживается в области бетатронных частот $Q_x = 3,80 \div 3,94$ и $Q_z = 3,70 \div 3,80$. Амплитуда 4-й гармоники, которая корректируется, составляет $10 \div 12$ мм, а 3-й гармоники – $1 \div 1,5$ мм.

Было высказано предположение, что источником “незаконных” искажений орбиты является разбаланс токов в четвертях кольцевого электромагнита, а распределение добавок поля ΔB , связанных с разбалансом, имеет вид, указанный штриховкой в нижней части рис. 4. Каждая четверть включает в себя три последовательных периода основной структуры. В I четверть входят периоды 1÷3, во II входят периоды 4÷6 и так далее.

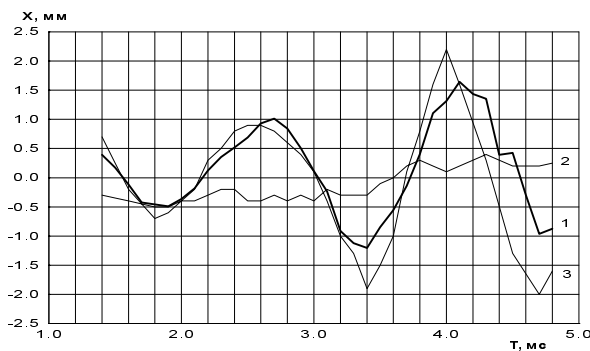


Рис. 3. Поведение $\langle R \rangle$ (1), косинусной (2) и синусной (3) компонент 2-й гармоники орбиты.

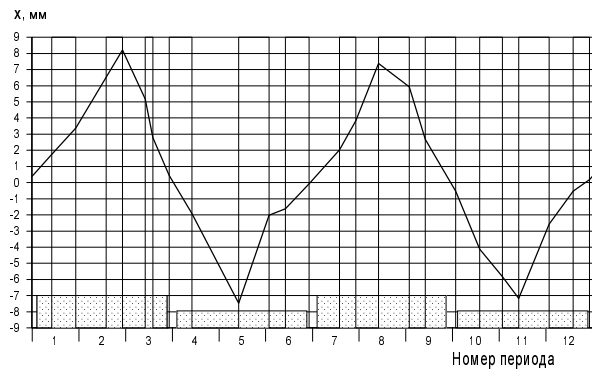


Рис. 4. Разность орбит $\Delta X = X_1 - X_2$, измеренных на временах $T_1 = 4,0$ мс и $T_2 = 4,7$ мс.

Представление КЭМ как нагрузки, состоящей из 4 эквивалентных элементов, не случайно и соответствует структуре системы питания [2]. Только в пределах четвертей отсутствуют схемные разветвления, по которым возможна утечка тока.

Для проверки гипотезы на шинах силовой цепи в отдельных четвертях КЭМ были установлены проектные датчики тока (пояса Роговского), разработанные для контроля тока до уровня 4 кА. Измерения подтвердили, что на исследуемом интервале времени в контролируемых точках имеется разбаланс токов. Причем в нечетных четвертях протекает один ток, а в четных другой. Разбаланс токов имел колебательный характер с ранее обнаруженной (в экспериментах на пучке) частотой. Однако абсолютной точности измерений, позволяющей провести сравнение амплитуды колебаний тока с искажениями орбиты, достичь не удалось. Из расчетов, выполненных для определения соотношения между величиной искажения орбиты $\delta X = X_{max} - X_{min}$ и разбалансом тока δI в четвертях, было получено $\delta X / \delta I = 6,0$ мм/А при уровне поля $B = 1400$ Гс, что давало на времени $T = 4$ мс значение $\delta I \sim 1,3$ А. Заметим, что относительное отклонение тока в каждой четверти от среднего составило по такой оценке $\delta I / I = \pm 1,4 \cdot 10^{-3}$ при проектных требованиях на стабильность тока $\pm 5 \cdot 10^{-4}$.

Несмотря на то, что возникновение 2-й гармоники искажений орбиты было увязано с разбалансом токов, причину самого разбаланса не удавалось установить в течение нескольких лет. При этом на системе питания продолжались экспериментальные исследования. В частности, изучалась работа выпрямителей подпитки (ВП), входящих в систему стабилизации формы магнитного цикла и обеспечивающих компенсацию активных потерь за цикл. По схеме питания 4 таких выпрямителя, охваченных обратной связью, включены последовательно с четвертями КЭМ. В порядке эксперимента был сформирован режим системы питания из восьми последовательных циклов в пакете, при котором в последнем цикле выпрямители не включались. В таком цикле поле не достигало максимального значения, но пучок ускорялся до ~ 15 мс, пока справлялась обратная связь по частоте ускоряющего напряжения. Оказалось, что без ВП пульсации поля не возникают, а следовательно, источник разбаланса можно искать и в работе системы стабилизации.

Все более расширяющаяся область поиска источника пульсаций требовала системного изучения и моделирования схемы питания. Заметный шаг вперед был сделан в начале текущего года при подготовке бустера к работе в первом сеансе. Во-первых, сложились условия, при которых стало возможным приступить

к моделированию схемы питания КЭМ. Во-вторых, было принято решение установить дополнительный датчик магнитного поля и включить его в работу задающего генератора (ЗГ).

Соображения по использованию дополнительного датчика сводились к следующему. Средний радиус орбиты в начальной части ускорения, пока обратная связь по частоте ЗГ не работает (она включается на 5-й мс), определяется формированием частоты ЗГ по сигналу производной поля $\partial B/\partial t$ с индукционного датчика, установленного в IV четверти (блок 12M2). В аппаратуре ЗГ сигнал с датчика интегрируется, и в зависимости от величины приращения поля вырабатывается частота ускоряющего напряжения. В случае разбаланса токов в четвертях КЭМ сигнал, взятый с блока 12M2, не отражает среднего поля на орбите пучка, что и приводит к колебаниям среднего радиуса. Если же использовать суммарный сигнал с двух датчиков, расположенных в соседних четвертях КЭМ, то колебания можно существенно подавить. Естественно, что искажения орбиты по 2-й гармонике при этом не устраняются. Второй индукционный датчик аналогичной конструкции был установлен в I четверти в заворачивающем магните 1M1 и был изготовлен блок обработки сигналов. На вход блока поступают сигналы с двух датчиков, а на выходе формируются полусумма сигналов и их разность. Отличие в чувствительности датчиков корректировалось весовыми соотношениями сигналов. После отладки аппаратуры и подстройки закона изменения частоты ЗГ были выполнены измерения на пучке. На рис. 5 показаны колебания среднего радиуса орбиты при работе с одним и с двумя датчиками.

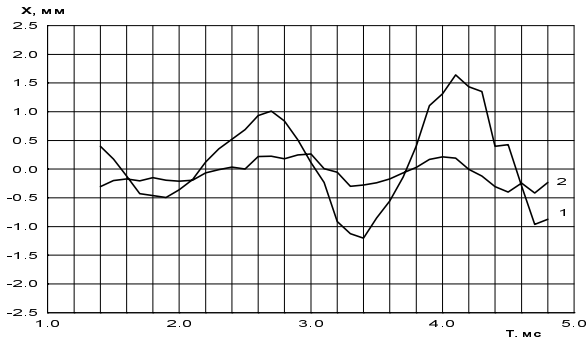


Рис. 5. Колебания среднего радиуса при работе с одним (1) и с двумя (2) датчиками.

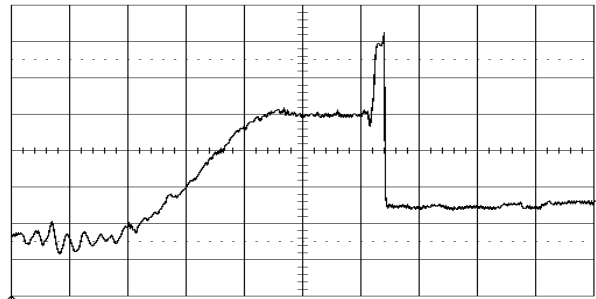


Рис. 6. Пульсации ΔU в штатном режиме (развертка 5 мс/дел, чувствительность 5 мВ/дел).

Кроме заметного подавления колебаний среднего радиуса, введение дополнительного датчика оказалось исключительно полезным для оперативного наблюдения пульсаций тока и абсолютных измерений их амплитуды. Калибровка дает для разностного сигнала ΔU , измеряемого в милливольтках, соотношение $\delta I/\Delta U = 0,4$ А/мВ. На рис. 6 показана разность ΔU для штатного режима работы системы питания. Максимальная амплитуда разбаланса токов вблизи $T = 4$ мс составляет $\delta I \sim 1$ А.

Поскольку разбаланс токов мог быть связан с неправильной работой каналов управления ВП, на что указывали результаты моделирования схемы питания [3], то проверялась идентичность каналов. Оказалось, что каналы неодинаковы, и при перестановки блоков регулировки напряжения (БРН) из одного канала в другой характер пульсаций изменяется. При этом был получен промежуточный результат, показанный на рис. 7 (развертка 1 мс/дел, чувствительность 2 мВ/дел) с заметно пониженным уровнем пульсаций. Измерения орбиты (рис. 8) подтвердили факт уменьшения разбаланса токов.

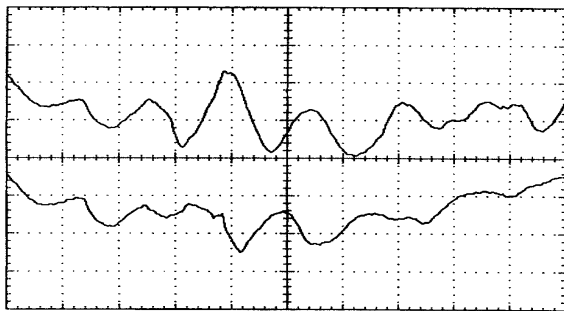


Рис. 7. Пульсации в штатном (верхний сигнал) и экспериментальном (нижний сигнал) режимах.

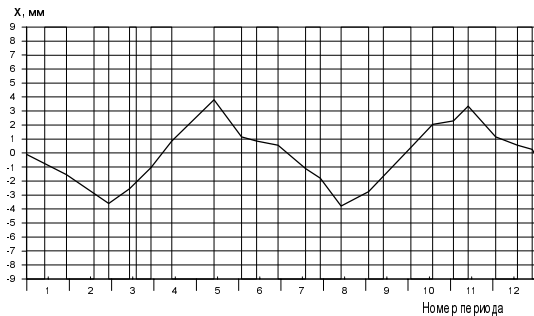


Рис. 8. Разность орбит $\Delta X = X_1 - X_2$, измеренных на времени $T_1 = 4,2$ мс и $T_2 = 3,3$ мс.

Следует отметить, что имело место полная повторяемость изменения вида пульсаций при неоднократной перестановке блоков БРН, и, следовательно, дело не в контактных явлениях. К сожалению, электронная часть схемы в системе стабилизации, связанная с работой обратной связи, не имеет контрольных выходов и не позволяет снимать информацию при работе ускорителя. В то же время стандартные характеристики блоков, проверенные на стенде после остановки, не выходили за проектные допуски.

Эксперименты, в которых был получен режим питания КЭМ с пониженным уровнем пульсаций, проводились в самом конце сеанса. Бустер работал согласно программе в ненапряженном режиме с интенсивностью выводимого пучка $5 \cdot 10^{11}$. Времени на перестройку в режим с предельной интенсивностью не оставалось, поэтому влияние снижения пульсаций на максимальную интенсивность и эффективность ускорения не проверено.

Заключение

Изучение пульсаций поля показало, что поиск причин нестабильности тока на уровне $\sim 10^{-3}$ в сложной электротехнической схеме мало перспективен без схемотехнического моделирования. Пульсации, хорошо видимые в измерениях на пучке и, безусловно, влияющие на эффективность ускорения, трудно сопоставить с конкретными “дефектами” в системе питания. Обнаружение источника пульсаций стало реально при численном анализе процессов, протекающих в разных точках силовой цепи КЭМ [3].

Кроме того, для устранения пульсаций необходимо с нужной точностью диагностировать работу системы стабилизации и уметь ее настраивать по проверенному на модели алгоритму. Начаты работы по переводу электроники системы стабилизации на современную элементную базу с созданием расширенных возможностей оперативного контроля.

Авторы признательны О.П. Лебедеву за полезные обсуждения, способствовавшие получению положительных результатов, В.И. Столповскому за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] Алеев Е.А., Брук В.Л. и др. – В сб.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. – Дубна, 1985, т. 1, с. 14.
- [2] Васин С.В., Кузнецов Г.Ф. и др. – В сб.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. – Дубна, 1985, т. 1, с. 391.
- [3] Гуревич А.С., Лебедев О.П. Схемотехническое моделирование системы питания электромагнита бустероциклического бустера ИФВЭ. Настоящее совещание.