

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШУМОВОЙ ДИФФУЗИИ В СИНХРОТРОНЕ У-70

С. В. Иванов¹, О. П. Лебедев

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», Протвино, Россия

В статье дано краткое физическое обоснование и представлена инженерная реализация технологических систем синхротрона У-70, основанных на контролируемой шумовой диффузии пучка. В их число входят две системы стохастического медленного вывода пучка (высокой и промежуточной энергии) и система продольной шумовой ВЧ-гимнастики, предназначенная для уплотнения функции распределения сгустка по азимуту.

The paper outlines brief physical concept for and engineering implementation of the technological systems in the U-70 synchrotron applying to controlled noise diffusion. These comprise two stochastic slow extractions (of high- and intermediate-energy beams), and a system for longitudinal noise RF gymnastics to flatten bunch distribution over azimuth.

PACS: 29.20.dk; 29.27.Eg

ВВЕДЕНИЕ

За прошедшие 10 лет в ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» разработано, испытано и введено в эксплуатацию несколько технологических систем синхротрона У-70, использующих контролируемую (намеренную) шумовую раскачку пучка. Они оказались достаточно гибкими, понятными в настройке и востребованными как оперативным персоналом, так потребителями пучка.

Основной практический интерес для У-70 представило использование тех положений и ограничений в классической стохастической динамике, что приводят к диффузионному приближению (быстрые и слабые флуктуации внешней силы). С этим приближением связано предположение о стационарности невозмущенных траекторий, по которым диффундирует функция распределения частиц в фазовом и конфигурационном пространстве. Отсюда следует важное для практики требование по обеспечению стабилизации мощных (и достаточно инерционных) электрофизических и радиотехнических систем ускорителя, задающих эти траектории. С инженерной точки зрения это более простая задача, чем обеспечение медленного и точного изменения токов и напряжений в этих системах для прецизионных манипуляций с пучком. Шум оказывается «мягким» многооборотным управляющим воздействием, направленным поверх мощных стабилизированных систем.

¹E-mail: Sergey.Ivanov@ihep.ru

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Пучок в протонном или ионном синхротроне при достигнутых ныне энергиях является консервативной динамической системой для продольной и поперечных степеней свободы (их считаем независимыми). В том случае, когда на пучок действует малая быстрая внешняя стационарная (в широком смысле) случайная сила, эволюция функции распределения частиц $F(J, t)$ по переменной действия J описывается с помощью одномерного уравнения диффузии в дивергентной форме (т. е. в виде уравнения непрерывности):

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \operatorname{div} Q = 0, \quad \operatorname{div} Q = \frac{\partial Q}{\partial J}, \quad Q = -D \frac{\partial F}{\partial J}.$$

Здесь Q — диффузионный поток; $D \geq 0$ — коэффициент диффузии. В терминах, обычных для ускорителей, действие $J = A/2\pi$, где A — площадь фазового эллипса траектории (для граничной фазовой траектории A является геометрическим эмиттансом пучка (с учетом множителя π)). Наблюдаемые функции F и Q получаются в результате двух последовательных операций усреднения — по быстрой циклической фазе, канонически сопряженной с J , и по ансамблю реализаций случайного процесса (шума).

Стохастические системы У-70 используют коэффициент диффузии вида

$$D(J, t) = D_0 G(t) S(J).$$

Амплитудный множитель D_0 пропорционален P_0 , уровню постоянной (по t) спектральной плотности мощности $P(\omega)$ внешнего шума раскачки ($P_0 \cong \max P(\omega)$). Этот шум всегда является «цветным». Верхняя и нижняя частоты среза спектра $P(\omega)$ согласованы с частотным портретом (профилем) пучка. Это условие обеспечивает резонансное взаимодействие его частиц со случайной силой в соответствии с целевым назначением системы.

Фактор форсирования шума $G(t) \geq 1$ является исполняющим фактором, управляющим, при необходимости, ходом диффузионного процесса. При $G(t) = 1$ получаем нерегулируемые (так называемые естественные) законы диффузии, не всегда удовлетворяющие запросам потребителей. Постоянная времени изменения $G(t)$ заметно превышает время автокорреляции шума раскачки. Управляемый технологический диффузионный процесс всегда остается медленным квазистационарным.

Фактор $S(J)$ описывает пространственную (радиальную на рассматриваемой фазовой плоскости) структуру коэффициента диффузии.

Для продольной диффузии сгруппированного пучка $S(J)$ — это сильно нелинейная функция, взвешенная сумма мультипольных гармоник, имеющая интегрируемую логарифмическую особенность на сепаратрисе [1, 2]. Сама сепаратриса «прозрачна» для диффузии как от центра сгустка к области гало пучка, так и в обратном направлении.

Для поперечной диффузии в У-70 достаточно учесть только дипольную (чисто отклоняющую) шумовую раскачку, когда $S(J) = J$ [3].

2. ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ДИФФУЗИОННОЙ МОДЕЛИ

Для синхротрона У-70 практический интерес представляют два аспекта решения краевой задачи диффузии с пространственно-ограниченной (локализованной по J) областью шумового разогрева пучка.

В-первых, это возможность получения однонаправленного диффузионного потока частиц к стоку, «поглощающей стенке». Роль последней выполняет апертура (точнее, ее образ на фазовой плоскости) первого по ходу пучка выводного устройства. Она должна оказаться внутри области шумового разогрева. Прочие граничные потоки аннулируются за счет быстрого спада коэффициента диффузии на кромке области шумового разогрева.

Во-вторых, используется эффект опережающей убыли мелкомасштабных (коротковолновых) составляющих начальной функции распределения частиц $F(J, t = 0)$ и асимптотическое выживание только старших членов ряда Фурье–Бесселя решения краевой задачи диффузии. Шум «стирает память пучка» о предыстории данного цикла ускорения. Происходит своего рода кондиционирование и унификация профиля пучка для последующих манипуляций с ним. Попутно размываются локальные выбросы в пиковой плотности частиц и, как правило, увеличиваются пороги возникновения когерентных неустойчивостей.

Разумеется, имеются и ограничения по практическому использованию инженерных систем, опирающихся на формализм уравнения диффузии. Действительно, наблюдаемые (регулируемые и целевые) функции, такие как распределение $F(J, t)$, его проекции на декартовы оси фазовой плоскости, поток (вывода) через апертуру $\Phi = -Q(J_A, t)$, текущая интенсивность пучка $N(t) = \int_0^{J_A} F(J, t) dJ$ и т. п., — все являются результатами статистического усреднения по ансамблю реализаций случайного процесса. Согласно эргодической гипотезе статистическое среднее по ансамблю можно заменить бегущим средним по t для данной реализации. Постоянная времени такого t -усреднения должна превышать время автокорреляции шума. Это означает, что в средствах регистрации и собственно в требованиях потребителей к качеству пучка должна наличествовать, пусть и неявно, такая процедура усреднения. Потребителю пучка должна быть безразлична или вовсе невидима быстрая случайная временная структура наблюдаемых — неизбежное следствие воздействия рабочего шума раскачки. Для стохастических систем У-70 такое требование выполнено.

3. СТОХАСТИЧЕСКИЙ МЕДЛЕННЫЙ ВЫВОД ПУЧКА ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Объектом диффузионной раскачки является непрерывный «ожидающий» пучок, движущийся вне (но вблизи) стационарных сепаратрис, поддерживаемых вспомогательной ускоряющей системой частоты 200 МГц (это 33-я гармоника частоты ускорения в У-70). Такой пучок уже не является сгруппированным, но еще и не стал однородным по азимуту. Энергия — 50–60 ГэВ (протоны). Фазовая плоскость — продольная. Однонаправленная диффузия идет в направлении увеличения импульса частиц (стохастическое доускорение). Источник шума на пучке — «цветной» шум фазы (частоты) ускоряющего напряжения 200 МГц. Расчет коэффициентов диффузии проведен в [1, 2]. Стоком является образ (на продольной фазовой плоскости) кромки полосы нелинейного горизонтального магнитооптического резонанса $3Q_x = 29$ при ненулевой хроматичности кольца У-70.

Стохастический вывод работает вблизи границы области применимости этого метода со стороны (относительно) коротких длительностей импульсов сброса пучка масштаба 0,5–3 с. Поэтому на начальном этапе разработки было уделено большое внимание экспе-

риментальной проверке линейности и достаточности динамического диапазона имеющегося модуляционного канала «внешний шум – отклик пучка» [4, 5]. Методика и средства получения длительных прямоугольных импульсов шумового вывода представлены в [6]. Более подробно этот вопрос обсуждается в разд. 5.

В настоящее время стохастический медленный вывод используется в сеансах на первой половине верхнего плато магнитного поля У-70 и обеспечивает пучком экспериментальную физическую установку ОКА [7]. Длительность вывода достигает 2 с и лимитируется только ограничениями по тепловыделению в магнитооптических элементах, задействованных на трассе вывода. Система опробована с интенсивностью $9,5 \cdot 10^{12}$ протонов в сбросе. Коэффициент прохождения выведенной фракции пучка по трассе достигает 90–94 %.

В немалой степени успешной работе с высокой интенсивностью пучка способствует благоприятная эволюция функции распределения по импульсам в «ожидающем» пучке, повышающая порог возникновения опасной для У-70 продольной когерентной неустойчивости пучка (произвольной группировки) в ходе шумового медленного вывода [8].

4. СТОХАСТИЧЕСКИЙ МЕДЛЕННЫЙ ВЫВОД ПУЧКА ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Объектом диффузионной раскачки является сгруппированный либо однородный по азимуту пучок, циркулирующий на нижнем плато магнитного поля У-70. По проекту основным является пучок ядер углерода с удельной кинетической энергией 456 МэВ/нуклон. Фазовая плоскость диффузии — поперечная горизонтальная. Источник шума на пучке — случайное напряжение на пластинах электростатического дефлектора с равномерным спектром в полосе 1,5–70 кГц (–3 дБ). Расчет коэффициента диффузии проведен в [3]. Стоком является образ кромки тонкой внутренней мишени-замедлителя, осуществляющей предписанный сброс импульса частиц (–0,7 %) за счет ионизационных потерь в веществе мишени (бериллий, толщина 4 мм, углеродный пучок). Мишень является первым по ходу пучка «оптическим» элементом трассы медленного вывода. Поперечный диффузионный поток на мишень конвертируется в продольный поток — в выводимую фракцию пучка, извлекаемую по так называемой двухкаскадной схеме Пиччиони–Райта (O. Piccioni, V. T. Wright).

Вывод обеспечивает углеродным пучком временный радиобиологический стенд ВРБС для прикладных исследований. Длительность вывода 0,6–1 с. Интенсивность выведенного пучка достигает $1,5 \cdot 10^9$ ядер в цикле (8 с). Коэффициент прохождения выведенной фракции пучка по трассе составляет 45–50 % (ожидаемый максимум около 80 %).

5. ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ ИМПУЛЬСЫ ТОКА ПУЧКА ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ МЕДЛЕННОМ ВЫВОДЕ

Получение таких импульсов является ключевым вопросом для систем шумового вывода. Работы над обоснованием методики и созданием технических средств для получения длительных прямоугольных импульсов шумового вывода были начаты при разработке медленного вывода частиц высокой энергии [6]. Полученный опыт был использован и обобщен в работе над системой вывода пучка промежуточной энергии.

Фактически, единый для обеих систем подход изложен в [9]. В них используется цепь обратной связи по току выведенного пучка, осуществляющая амплитудную модуляцию случайного несущего колебания. Анализ динамики системы и ее настройка в замкнутом состоянии осуществляются во временной области. Это связано со спецификой объекта управления — пучка, ожидающего вывода. Он представляет собой «опустошаемую» систему, не являющуюся инвариантной во времени и потому недоступную для традиционного анализа с помощью преобразования Фурье по t . Используется устройство сравнения для постоянной составляющей сигнала (оно задает уровень плоской вершины импульса сброса), а сопутствующая обратная связь по переменному сигналу успешно подавляет неприемлемые низкочастотные пульсации вывода, создаваемые сторонними помехами.

6. ШУМОВАЯ ВЧ-ГИМНАСТИКА

Объектом продольной диффузионной раскочки являются стустки, циркулирующие на нижнем плато магнитного поля У-70. Очень узкополосный (пик спектра на частоте малых синхротронных колебаний) фазовый шум подается в устройство сравнения штатной фазово-частотной цепи регулирования ускоряющей системы. Создается компактная локализованная область шумового разогрева стустка с подавленным убегающим диффузионным потоком частиц через ее границу [10]. Цель работы системы — уплощение функции $\lambda(\varphi)$ распределения частиц по ВЧ-фазе φ (она пропорциональна азимуту) и потому уменьшение (вертикального) кулоновского сдвига бетатронной частоты. В этих целях срабатывают два фактора. В-первых, обычное для протонных (ионных) пучков распределение $\lambda(\varphi) \propto 1 - \varphi^2/B^2$ («перевернутая парабола» в границах $|\varphi| \leq B$) переходит в $\lambda(\varphi) \propto (1 - \varphi^2/B^2)^{1/2}$ («половина эллипса», что соответствует асимптотической функции $F(J, t \rightarrow \infty) = \text{const}(J)$). Одно это дает 17,8 % в пиковой плотности стустка даже при его постоянном полном размере $2B$ по основанию. Во-вторых, пиковая интенсивность убывает $\propto 1/B$ из-за сопутствующего диффузионного удлинения стустка при шумовой гимнастике.

Ограничивающим фактором является трудно устранимая до конца нежелательная остаточная диффузия частиц стустка в область гало пучка. На практике удалось получить результат — 25 % в пиковой плотности стустка за счет < 1 % потерь его интенсивности [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Понята и освоена методика и создана техника для работы с внешним шумом в диффузионном приближении в трех технологических системах синхротрона У-70.

Далее, в списке литературы, перечислены только публикации авторов данной статьи. В цитируемых работах находится более полная библиография по обсуждаемому вопросу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов С. В.* Продольная диффузия стустка протонов под действием внешнего шума. Препринт ИФВЭ 92-43. Протвино, 1992. 39 с.
2. *Иванов С. В.* Продольная диффузия стустка протонов под действием внешнего шума. (Широкополосный шум). Препринт ИФВЭ 93-14. Протвино, 1993. 31 с.

3. *Иванов С. В., Лебедев О. П.* Поперечная шумовая раскачка пучка в синхротроне У-70 // ПТЭ. 2013. № 3. С. 5–11.
4. *Иванов С. В., Лебедев О. П.* Исследование возможности стохастического медленного вывода пучка из синхротрона У-70. Препринт ИФВЭ 2004-22. Протвино, 2004. 22 с.
5. *Иванов С. В., Лебедев О. П.* Экспериментальное исследование режима стохастического медленного вывода пучка из синхротрона У-70 // ПТЭ. 2006. № 2. С. 14–31.
6. *Иванов С. В., Лебедев О. П.* Цепь обратной связи для стохастического вывода протонов из синхротрона ИФВЭ. Разработка и эксперименты // Там же. № 6. С. 15–28.
7. *Иванов С. В., Лебедев О. П.* Стохастический медленный вывод из У-70 // Новости и проблемы фундаментальной физики. Т. 2(6). Протвино, 2009. С. 5–25.
8. *Иванов С. В.* Продольная неустойчивость непрерывного пучка в протонном синхротроне // АЭ. 2008. Т. 104, вып. 1. С. 26–33.
9. *Иванов С. В., Лебедев О. П.* Получение прямоугольных импульсов тока пучка при стохастическом медленном выводе из синхротрона У-70 // ПТЭ. 2015. № 4. С. 14–23.
10. *Иванов С. В., Лебедев О. П.* Изменение продольной формы сгустков в ускорителе У-70 с помощью шумовой ВЧ-гимнастики // АЭ. 2002. Т. 93, вып. 6. С. 456–460.