



Государственный научный центр Российской Федерации –  
**Институт физики высоких энергий**  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

ИФВЭ 2014–6  
ОУК

С.В. Иванов, О.П. Лебедев

**ПОЛУЧЕНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ  
СТОХАСТИЧЕСКОГО МЕДЛЕННОГО ВЫВОДА ПУЧКА  
ИЗ СИНХРОТРОНА У-70**

*Направлено в ПТЭ*

Протвино 2014

**Аннотация**

Иванов С.В., Лебедев О.П. Получение прямоугольных импульсов стохастического медленного вывода пучка из синхротрона У-70.: Препринт ИФВЭ 2014–6. — Протвино, 2014. — 19 с., 5 рис., библиогр.: 2.

Обсуждается способ формирования прямоугольных (с плоской вершиной и малыми пульсациями) импульсов тока выведенного пучка при шумовом (стохастическом) медленном выводе частиц промежуточной энергии на нижнем плато магнитного поля в синхротроне У-70 ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт». В этих целях разработана и используется цепь обратной связи по току выведенного пучка. Спецификой цепи является ее объект регулирования — циркулирующий пучок, диффундирующий в поперечном (горизонтальном) направлении, не являющийся линейной инвариантной во времени системой. Обоснована структурная схема и методика настройки цепи обратной связи. Представлены ее технические характеристики и краткое описание инженерной реализации. Приводятся результаты успешной опытной эксплуатации системы на углеродном пучке в У-70.

**Abstract**

Ivanov S.V., Lebedev O.P. Attaining Square-Wave Stochastic Slow Extraction Spills from the U-70 Synchrotron.: IHEP Preprint 2014–6. — Protvino, 2014. — p. 19, figs. 5, refs.: 2.

The paper outlines a technique to attain square-wave (flat-topped, with a pronounced DC-content and a low AC-ripple) extraction spills under a noise (stochastic) slow extraction of intermediate-energy beam at the magnetic-field flat-bottom in the U-70 synchrotron of SRC IHEP of RNC “Kurchatov institute”. To this end, a dedicated beam feedback circuit has been developed and is employed now. The specific feature of the circuit is the object under control — a circulating beam diffusing in transverse (horizontal) direction, which does not constitute a linear invariant-in-time system. The functional block diagram and the tuning procedure of the feedback are reported. The list of technical parameters is specified and a brief description of its engineering implementation is given. Results of the successful commissioning of the system in question with a carbon-nuclei beam in the U-70 machine are presented.

## Введение

В синхротроне У-70 ГНЦ ИФВЭ НИЦ “Курчатовский институт” создаётся новая система медленного вывода частиц, циркулирующих на нижнем плато магнитного поля. Выводимый пучок имеет кинетическую энергию 1.32 ГэВ (протоны, тестовый пучок) или 456.6 МэВ на нуклон (ядра углерода  $^{12}\text{C}^{6+}$ ). По проекту системы вывода углеродный пучок является основным.

Ключевым механизмом вывода является поперечная шумовая (стохастическая) раскачка пучка, приводящая к его диффузии. Контролируемый диффузионный поток через кромку пучка формирует выводимую фракцию частиц. Описание деталей технологии и первых экспериментов по шумовому выводу пучка промежуточной энергии из У-70 изложено в [1].

До сих пор указанная система вывода испытывалась в режиме так называемых естественных сбросов, порождаемых шумом раскачки с постоянным во времени  $t$  уровнем спектральной плотности мощности. В этом случае импульс тока выведенного пучка имеет колоколообразную форму с затянутым (экспоненциальным) задним фронтом. В таком импульсе нет выраженной постоянной составляющей (плоской вершины). Зачастую он поражен низкочастотными пульсационными помехами от сторонних источников. Возникающая временная неравномерность вывода неприемлема для потребителей пучка — экспериментальных установок с неподвижными внешними мишенями.

Далее обсуждается методика и техника формирования длительных прямоугольных импульсов шумового сброса пучка с помощью цепи обратной связи, замыкаемой по каналу “поток выведенного пучка – амплитуда шума раскачки”. Подобная схема также применяется в ныне действующей системе медленного стохастического вывода пучка высокой энергии (50–60 ГэВ, протоны) на верхнем плато магнитного поля У-70 [2].

Настоящая статья обобщает опыт, накопленный при создании и эксплуатации обеих систем шумового медленного вывода пучка.

## 1. Описание процесса диффузии

Объектом управления является пучок заряженных частиц постоянной энергии, циркулирующий по орбите синхротрона. Пучок находится под действием случайной внешней отклоняющей силы, приводящей к шумовой диффузии. Диффузионный поток частиц через апертуру первого по ходу пучка оптического элемента трассы вывода формирует выводимую фракцию пучка. Поток выводимых частиц является контролируемым выходным параметром. Управляющее воздействие прикладывается путем изменения мощности (амплитуды) шума раскачки.

Пучок, ожидающий вывода, согласован с фазовыми траекториями на поперечной фазовой плоскости. Его профиль в момент времени  $t$  представляется функцией распределения  $F(E, t)$ , где независимой координатой является переменная действия  $E$ .

Пусть на пучок действует стационарная случайная отклоняющая сила с нулевым средним значением. Тогда эволюция функции  $F(E, t)$ , усредненной по ансамблю реализаций случайного процесса, описывается уравнением диффузии

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial E} \left( D(E) \frac{\partial F}{\partial E} \right) \quad (1)$$

с коэффициентом диффузии  $D(E) \geq 0$ . Это уравнение дополняется начальным условием,

$$F(E, t)|_{t=0} = F_0(E) \neq 0 \quad \text{для } E \in [0, E_0] \quad (2)$$

и парой граничных условий для  $t \geq 0$ ,

$$\Phi(E, t) = -D(E) \frac{\partial F(E, t)}{\partial E} \Big|_{E=0} = 0, \quad (3)$$

$$F(E, t)|_{E=E_A} = 0. \quad (4)$$

Здесь  $E_0$  имеет смысл начального размера пучка по основанию распределения,  $\Phi > 0$  обозначает диффузионный поток, а  $E_A$  есть координата первого по ходу пучка оптического элемента трассы вывода (апертура камеры ускорителя). Условие (3) означает, что в центре пучка нет источника частиц. Условие (4) учитывает, что частицы быстро покидают циркулирующий пучок, попадая на трассу вывода после касания (пересечения) апертуры выводного устройства. (В У-70 это тонкая внутренняя мишень-замедлитель.)

Характерный масштаб  $T$  времени протекания диффузионных процессов легко установить из уравнения (1) на основе анализа размерности,

$$T = \frac{E_0^2}{D(E_0)}. \quad (5)$$

В случае дипольной случайной отклоняющей силы  $D(E) \propto E$ .

Для начала будем считать, что стохастическая раскачка пучка осуществляется первичным внешним генератором шума вида  $A_0 \cdot u(t)$ , где  $A_0$  – постоянная амплитуда шума,  $u(t)$  – стационарный случайный сигнал с нулевым средним по ансамблю реализаций и единичной мощностью (несущее колебание, цветной шум). Коэффициент диффузии  $D$  прямо пропорционален мощности генератора шума,  $P_0 \propto A_0^2$ .

Решение краевой задачи (1)–(4) полностью описывает шумовую раскачку пучка и позволяет найти его текущий профиль  $F(E, t > 0 | P_0)$  [1]. Для целей данной работы практический интерес представляют две наблюдаемые неотрицательные интегральные функции — это число частиц в ожидающем циркулирующем пучке  $N_0(t)$  и поток выводимых частиц  $\Phi_0(t)$ . Они определены как

$$N_0(t) = \int_0^{E_A} F(E, t | P_0) dE, \quad (6)$$

$$\Phi_0(t) = \Phi(E_A, t | P_0) = -\frac{dN_0(t)}{dt}. \quad (7)$$

Индекс “0” указывает, что учитывается только первичный внешний генератор шума с мощностью  $P_0 \propto A_0^2$ .

Интенсивность  $N_0(t)$  наблюдается с помощью индукционного датчика тока или электростатического пикап электрода (для сгруппированного пучка). Поток вывода  $\Phi_0(t)$  регистрируется с помощью мониторов вторичных частиц и ионизационных камер.

Описание хода шумовой раскачки пучка в терминах диффузионного приближения и наблюдаемых  $N_0(t)$  и  $\Phi_0(t)$  подразумевает, что эти функции являются результатом усреднения по ансамблю реализаций шума  $u(t)$ . В силу эргодической гипотезы среднее по ансамблю реализаций совпадает с (бегущим) средним для данной реализации случайного процесса по времени  $t$  на интервале, заметно превышающем время автокорреляции  $u(t)$ . Поэтому законным объектом измерения, обработки и регулирования в технической системе, опирающейся на формальный аппарат уравнения диффузии, являются наблюдаемые  $N_0(t)$  и  $\Phi_0(t)$ , прошедшие через усредняющее (по  $t$ ) окно, реали-

зованное, например, в виде фильтра нижних частот. Его частота среза должна быть не менее чем на порядок меньше верхней граничной частоты спектра  $u(t)$  (для У-70 это 7 и 70 кГц соответственно).

### Неуправляемый шумовой сброс

Формулы (6) и (7) описывают естественный неуправляемый сброс, порождаемый шумом генератора с постоянной во времени мощностью  $P_0$ .

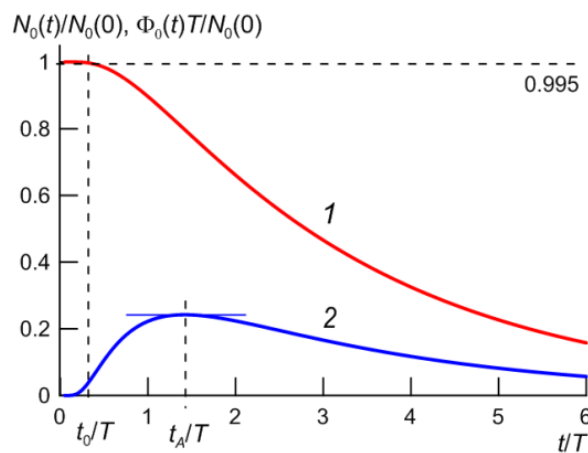


Рис. 1: Естественный шумовой сброс.

На рис. 1 для иллюстрации показан пример такого естественного сброса, получаемый в результате решения краевой задачи диффузии с поглощающей стенкой на координате  $E_A = 4E_0$ . Кривая 1 соответствует интенсивности  $N_0(t)$  пучка, ожидающего вывода, кривая 2 – потоку выводимых частиц  $\Phi_0(t)$ . Максимум диффузионного потока приходится на время  $t_A$ . Его можно назвать временем (заметной) диффузии пучка до апертуры выводного устройства. Импульс вывода задерживается на время  $t_0$  от момента включения шума  $t = 0$ . Это время требуется для того, чтобы первые частицы продиффундировали от кромки пучка  $E_0$  до, возможно удаленной, апертуры  $E_A$ . Точная дефиниция времени задержки  $t_0$  — это вопрос соглашения. На рис. 1 для определенности оно соответствует выводу первых 0.5% интенсивности пучка. При  $t \gg t_A$  кривые 1 и 2 убывают по экспоненциальному закону с одинаковой постоянной времени  $\tau/T = 0.69E_A/E_0$  [1].

### Управляемый шумовой сброс

При создании управляемых сбросов проводится амплитудная модуляция шума раскачки, когда на пучок подается случайный сигнал вида  $A(t) \cdot u(t)$ , где  $A(t) \neq A_0$  – мгновенная амплитуда шума,  $u(t)$  – то же случайное несущее колебание от генератора шума. Предполагается, что характерный временной масштаб модуляции  $A(t)$  значительно превышает время автокорреляции сигнала  $u(t)$ . Тогда коэффициент диффузии  $D$  оказывается нестационарным, прямо пропорциональным мгновенной мощности шума  $P(t) \propto A(t)^2$ .

Введем фактор модуляции мощности шума раскачки  $G(t)$  как

$$G(t) = \frac{P(t)}{P_0} = \frac{A^2(t)}{A_0^2}. \quad (8)$$

Рассмотрев задачу (1)–(4) для коэффициента диффузии  $D \propto P(t) = G(t)P_0$ , получим выражения для искомых наблюдаемых функций

$$N(t) = N_0 \left( \int_0^t G(t') dt' \right), \quad (9)$$

$$\Phi(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = G(t) \Phi_0 \left( \int_0^t G(t') dt' \right). \quad (10)$$

Отсюда видно, что функции (6), (7) — их можно рассчитать или измерить экспериментально — играют роль производящих функций для задачи стохастического вывода. Они определяют наблюдаемые решения в присутствии произвольного (но медленного) управляющего воздействия  $G(t)$ .

Возможны три способа использования представлений (9), (10):

Во-первых, с их помощью можно доказать существование идеального закона модуляции мощности  $G_{\Pi}(t)$ , трансформирующего естественный шумовой сброс (7) в прямоугольный импульс с амплитудой  $\Phi_{DC}$  [2]. Априорная информация о  $G_{\Pi}(t)$  может оказаться полезной на практике в схеме компенсации, предназначенной для поддержания постоянной составляющей тока вывода (подавления систематической части внешней ошибки регулирования) по разомкнутому контуру управления (так называемая схема “open-loop feed-forward”). Практическая реализация схемы такой компенсации запланирована на более поздней этап отработки системы шумового медленного вывода из У-70. Пока в У-70 используется только принцип замкнутой обратной связи (схема “closed-loop feedback”).

Во-вторых, уравнения (9), (10) поясняют характер изменения естественного сброса при стационарном факторе изменения шума

$$G = \frac{P}{P_0} = \frac{A^2}{A_0^2} = \text{const}(t). \quad (11)$$

Позже увидим (формула (27)), что надлежащим выбором  $G$  удастся согласовать (не-стационарную) передаточную функцию пучка с временным окном, открытым для вывода. В результате при прочих равных условиях увеличивается фактор подавления пульсаций вывода после замыкания обратной связи.

В-третьих, из уравнений (9), (10) получается передаточная функция пучка по малому сигналу. Она рассматривается в следующем разделе.

## 2. Отрицательная обратная связь

### *Цепи электроники*

Эта часть системы является линейной и инвариантной во времени. Для ее анализа используем прямое и обратное преобразования Фурье в соглашении

$$f(\omega) = \int f(t)e^{i\omega t} dt, \quad f(t) = \frac{1}{2\pi} \int f(\omega)e^{-i\omega t} d\omega. \quad (12)$$

Корректирующее воздействие (оно отмечено верхним индексом “(fb)”, сигнал обратной связи (“feed-back”)) формируется в виде

$$\delta G^{(fb)}(\omega) = K(\omega) \delta \Phi^{(tot)}(\omega), \quad (13)$$

где  $K(\omega)$  – передаточная функция электроники, верхний индекс “(tot)” указывает на суммарную (“total”) ошибку регулирования, измеренную после устройства сравнения в цепи обратной связи.

Согласно первому равенству в (10)

$$\delta \Phi(t) = - \frac{d}{dt} \delta N(t), \quad (14)$$

поэтому

$$\delta \Phi^{(tot)}(\omega) = i\omega \delta N^{(tot)}(\omega). \quad (15)$$

Входным сигналом для линеаризованной передаточной функции пучка является величина, аккумулирующая информацию о предыстории процесса коррекции мощности шума (смотри аргумент у функций (9), (10)),



$$\delta g^{(fb)}(t) = \int_0^t \delta G^{(fb)}(t') dt'. \quad (16)$$

Следовательно

$$\delta g^{(fb)}(\omega) = \frac{\delta G^{(fb)}(\omega)}{-i\omega}. \quad (17)$$

Из равенств (13), (15) и (17) сразу находим преобразование сигнала в электронике

$$\delta g^{(fb)}(\omega) = -K(\omega) \delta N^{(tot)}(\omega) \quad (18)$$

или во временной области

$$\delta g^{(fb)}(t) = - \int_0^t K(t-t') \delta N^{(tot)}(t') dt', \quad (19)$$

где  $K(t)$  – импульсная передаточная характеристика электроники,  $K(t) = 0$  для  $t < 0$ .

#### *Пучок*

Для управления передаточной функцией пучка используется поддерживающий (фоновый) немодулированный шум (11) с постоянной амплитудой  $A$ , которая отличается от амплитуды  $A_0$  шума генератора случайного несущего колебания,  $A \neq A_0$ . Из (9) и (10) получим линеаризованный по возмущению отклик пучка

$$\delta N^{(fb)}(t) = -\Phi_0 \left( \frac{A^2}{A_0^2} t \right) \delta g^{(fb)}(t). \quad (20)$$

Передаточная функция пучка при шумовом выводе не является стационарной.

#### *Внешняя ошибка регулирования*

Условие замыкания отрицательной обратной связи имеет вид

$$\delta N^{(tot)}(t) = \delta N^{(ext)}(t) - \delta N^{(fb)}(t). \quad (21)$$

Верхний индекс “(ext)” указывает на внешнюю (“external”) ошибку, вызываемую сторонними факторами. Сигнал обратной связи  $\delta N^{(fb)}(t)$  зависит от измеряемой суммарной ошибки  $\delta N^{(tot)}(t' \leq t)$ .

Целью работы системы обратной связи является получение длительных прямоугольных (с плоской вершиной) шумовых сбросов пучка  $\Phi_{\Pi}$ , имеющих вид

$$\Phi_{\Pi}(t) = \begin{cases} \Phi_{DC}, & t \in \left[ t_0, t_0 + \frac{N(0)}{\Phi_{DC}} \right], \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (22)$$

где  $t_0$  – момент начала вывода. Опорный сигнал с такой амплитудой подается в устройство сравнения цепи обратной связи. Внешняя ошибка регулирования для уравнения (21) определяется дифференциальным уравнением

$$-\frac{d}{dt} \delta N^{(ext)}(t) = \left[ \frac{A^2}{A_0^2} \Phi_0 \left( \frac{A^2}{A_0^2} t \right) - \Phi_{DC} \right] + \delta \Phi_{AC}^{(ext)}(t) \quad (23)$$

с начальным условием  $\delta N^{(ext)}(0) = 0$ , поскольку ошибки потока вывода не изменяют начальное число частиц в пучке.

Выражение в квадратных скобках можно обозначить как  $\delta \Phi_{DC}^{(ext)}(t)$  — это отклонение естественного сброса (10), (11) от предписанного закона (22) по постоянной составляющей сигнала в отсутствие регулирования.

Слагаемое  $\delta \Phi_{AC}^{(ext)}(t)$  учитывает пульсации (переменные наводки, помехи) от прочих источников и, как правило, имеет нулевое среднее значение. Эта ошибка также подлежит подавлению для улучшения качества вывода.

Для того, чтобы получить биполярную внешнюю ошибку  $\delta \Phi_{DC}^{(ext)}(t)$  и сбалансированно использовать линейный динамический диапазон цепи обратной связи, рекомендуется выбирать

$$\Phi_{DC} < \max_t(\Phi(t)) = \max_t \left( \frac{A^2}{A_0^2} \Phi_0 \left( \frac{A^2}{A_0^2} t \right) \right) \quad (24)$$

с максимумом естественного сброса (точка  $t_A/T$  на рис. 1), достигаемым внутри отрезка времени (22). Этого можно добиться выбором надлежащей амплитуды  $A$  фонового шума.

### *Интегральное уравнение*

Воспользовавшись формулами (19) и (20), запишем условие замыкания обратной связи (21) в виде интегрального уравнения Вольтерра второго рода с ядром, не являющимся разностным:

$$\delta N^{(tot)}(t) + \Phi_0 \left( \frac{A^2}{A_0^2} t \right) \int_0^t K(t-t') \delta N^{(tot)}(t') dt' = \delta N^{(ext)}(t). \quad (25)$$

Как известно, уравнение Вольтерра не имеет характеристических значений и соответствующих им собственных функций — ненулевых решений однородного уравнения. Поэтому задача управляемого шумового вывода, описываемая уравнением (25), не имеет характеристических значений коэффициентов усиления  $\propto K$  или интенсивности пучка  $N(0) \propto \Phi_0$ , при которых возможны сценарии вывода с остаточной ошибкой регуляризации  $\delta N^{(tot)}(t)$ , никак не зависящей от внешней ошибки  $\delta N^{(ext)}(t)$  (23).

Решения уравнения (25) являются “вынужденными”, и  $\delta N^{(tot)}(t)$  есть образ  $\delta N^{(ext)}(t)$  при действии некоторого линейного однородного оператора. Адекватная цепь обратной связи должна обеспечить выполнение неравенства  $\|\delta N^{(tot)}\| \ll \|\delta N^{(ext)}\|$ , где  $\|\delta N\|$  — норма функции  $\delta N$  (например,  $\max|\delta N|$  или среднеквадратичная).

### 3. Примеры решений

Для дальнейшего обоснования подходов к практической реализации цепи обратной связи рассмотрим простейшие аналитические решения уравнения (25).

#### *Широкополосная обратная связь без запаздывания*

В этом предположении

$$K(\omega) = K_0 = \text{const} > 0 \quad \text{или} \quad K(t) = K_0 \delta(t), \quad (26)$$

где  $K_0$  — коэффициент усиления,  $\delta(t)$  — дельта-функция Дирака.

В результате получим

$$\delta N^{(tot)}(t) = \frac{\delta N^{(ext)}(t)}{1 + K_0 \Phi_0 \left( \frac{A^2}{A_0^2} t \right)}. \quad (27)$$

Продифференцировав по времени обе части равенства (27), убеждаемся, что малая величина остаточной ошибки сигнала  $\delta N^{(tot)}$  означает также малую ошибку контролируемой величины  $\delta \Phi^{(tot)}$ , интересующей потребителей пучка.

#### *Широкополосная обратная связь с запаздыванием*

В этом случае

$$K(\omega) = K_0 e^{i\omega T_0} \quad \text{или} \quad K(t) = K_0 \delta(t - T_0), \quad (28)$$

где  $T_0 > 0$  — время задержки сигнала обратной связи.

В результате из (25) получим алгебраическое уравнение с запаздыванием

$$\delta N^{(tot)}(t) + K_0 \Phi_0 \left( \frac{A^2}{A_0^2} t \right) \delta N^{(tot)}(t - T_0) = \delta N^{(ext)}(t). \quad (29)$$

Допустим, что спектр  $\delta N(\omega)$  сосредоточен в области нижних частот  $|\omega| < \omega_M$ . Тогда в случае  $\omega_M T_0 < \pi/2$  допустимо разложение

$$\delta N^{(tot)}(t - T_0) \cong \delta N^{(tot)}(t) - T_0 \frac{d}{dt} \delta N^{(tot)}(t) \quad (30)$$

и от (29) можно перейти к неоднородному дифференциальному уравнению первого порядка

$$\frac{d}{d\tau} \delta N^{(tot)}(\tau) - \delta N^{(tot)}(\tau) = - \frac{\delta N^{(ext)}(\tau)}{1 + K_0 \Phi_0 \left( \frac{A^2}{A_0^2} t(\tau) \right)}. \quad (31)$$

Здесь используется новая независимая переменная  $\tau$  (безразмерное время), определенная формулой

$$\tau(t) = \int_0^t \frac{1 + K_0 \Phi_0 \left( \frac{A^2}{A_0^2} t' \right)}{K_0 \Phi_0 \left( \frac{A^2}{A_0^2} t' \right)} dt', \quad \tau(0) = 0. \quad (32)$$

Решением уравнения (31) с начальными условиями  $\delta N^{(tot)}(0) = 0$ ,  $\delta N^{(ext)}(0) = 0$  является свертка

$$\delta N^{(tot)}(\tau) = - \int_0^\tau \frac{\delta N^{(ext)}(\tau')}{1 + K_0 \Phi_0 \left( \frac{A^2}{A_0^2} t(\tau') \right)} \exp(\tau - \tau') d\tau'. \quad (33)$$

Перейдя к преобразованию Фурье по формулам (12) для времени  $\tau$  и частоты  $\Omega$  (обе величины — безразмерные), получим

$$\delta N^{(tot)}(\Omega) = H(\Omega) \left[ \frac{\delta N^{(ext)}}{1 + K_0 \Phi_0} \right](\Omega), \quad H(\Omega) = \frac{1}{1 + i\Omega}. \quad (34)$$

Множитель  $H(\Omega)$  является передаточной функцией интегрирующего звена — фильтра нижних частот с полосой пропускания  $|\Omega| \leq 1$  (по уровню  $-3$  дБ).

Предположим, что спектр  $\delta N^{(ext)}(\Omega)$  сосредоточен в области нижних частот  $|\Omega| < \Omega_M$ . При условии  $|\Omega| < \Omega_M \leq 1/5$  амплитуда  $|H(\Omega)|$  будет отличаться от единицы не более, чем на  $-2\%$ . С такой точностью можно полагать  $H(\Omega) = 1$ , что означает переход от (33) и (34) к решению (27). Проведя оценку  $\Omega_M$  сверху в терминах  $\omega_M$ , где  $\omega_M$  – верхняя граничная частота сигнала  $\delta N^{(ext)}(\omega)$ , получим

$$\Omega_M \leq \omega_M T_0 \frac{K_0 \max_t \Phi_0 \left( \frac{A^2}{A_0^2} t \right)}{1 + K_0 \max_t \Phi_0 \left( \frac{A^2}{A_0^2} t \right)} \leq \frac{1}{5}, \quad (35)$$

где максимум по  $t$  ищется на отрезке времени (22) медленного вывода. Правое неравенство является количественным критерием применимости решения (27) к системе с запаздыванием с указанной погрешностью масштаба  $2\%$ . Далее считаем этот критерий выполненным.

Необходимым условием использования решения (34) и оценки (35) является более свободное неравенство

$$\omega_M T_0 < \frac{\pi}{2}. \quad (36)$$

Оно использовалось ранее при переходе к аппроксимации (30).

#### 4. Структурная схема

*Амплитудная передаточная функция пучка*

Исполняющая электроника системы обратной связи работает как цепь линейной амплитудной модуляции. Поэтому для практического использования далее требуется амплитудное представление сигнала обратной связи

$$\delta G^{(fb)} = \frac{\delta P^{(fb)}}{P_0} = \frac{2A \delta A^{(fb)}}{A_0^2}. \quad (37)$$

Предполагается, что индекс амплитудной модуляции  $|\delta A|/A < 1$ . Тогда, воспользовавшись определением коэффициента усиления  $K$  из (13), перепишем решение (27) в виде

$$\delta N^{(tot)}(t) = \frac{\delta N^{(ext)}(t)}{1 + k_0 \phi_0(A/A_0, t)}. \quad (38)$$

Здесь

$$k_0 = \frac{K_0}{2A/A_0} \equiv \left( \frac{\delta A^{(fb)}/A_0}{\delta \Phi^{(tot)}} \right) \quad (39)$$

есть коэффициент линейного усиления амплитуды (не мощности) сигнала в электронике цепи обратной связи (де-факто, именно он подбирается при настройке системы), а

$$\phi_0(A/A_0, t) = \frac{2A}{A_0} \Phi_0 \left( \frac{A^2}{A_0^2} t \right) = \frac{2}{A/A_0} \Phi(t) \equiv \left( \frac{\delta \Phi^{(fb)}}{\delta A^{(fb)}/A_0} \right) \quad (40)$$

есть линейризованная нестационарная передаточная функция пучка по каналу “амплитуда шума раскачки – поток выводимых частиц”.

Таким образом, глубина обратной связи (знаменатель (38)) зависит от времени  $t$ , начальной интенсивности пучка  $N(0)$  ( $\phi_0 \propto N(0)$ ) и управляется двумя параметрами — коэффициентом усиления  $k_0$  и амплитудой фонового шума  $A/A_0$ . Задержка  $\phi_0$  по отношению к моменту  $t = 0$  включения шума на времена масштаба  $t_0/T$ ,  $t_A/T$  (смотри кривую 2 на рис. 1 с учетом  $T \propto (A_0/A)^2$ ) компенсируется соответствующим сдвигом окна разрешения на вывод в системе синхронизации (импульсы “старт–стоп”).

### *Структурная схема*

Изложенная специфика объекта управления учтена в принципиальной структурной схеме системы обратной связи, показанной на рис. 2. Характерными особенностями этой схемы являются:

1. Включение нестационарной передаточной функции пучка в контур управления.
2. Использование принципа линейной амплитудной модуляции случайного несущего колебания.
3. Интеграция обратных связей по постоянному и переменному сигналу в области нижних частот с применением устройства сравнения на нулевой частоте.

В звено передаточной функции пучка помимо собственно циркулирующего пучка входят еще два устройства. Это электростатический дефлектор ЭСД-2, расположенный во 2-м прямолинейном промежутке магнитной структуры У-70 (ПП-2), и монитор тока медленного вывода, роль которого выполняет монитор вторичных частиц, расположенный в промежутке ПП-28 вблизи внутренней мишени-замедлителя ВМ-28. Оба эти устройства являются быстродействующими в масштабе времени медленных ампли-

тудно-модулирующих сигналов. Поэтому их передаточные функции равны единице с точностью до коэффициентов усиления, приписанных к общему усилению  $k_0$ .

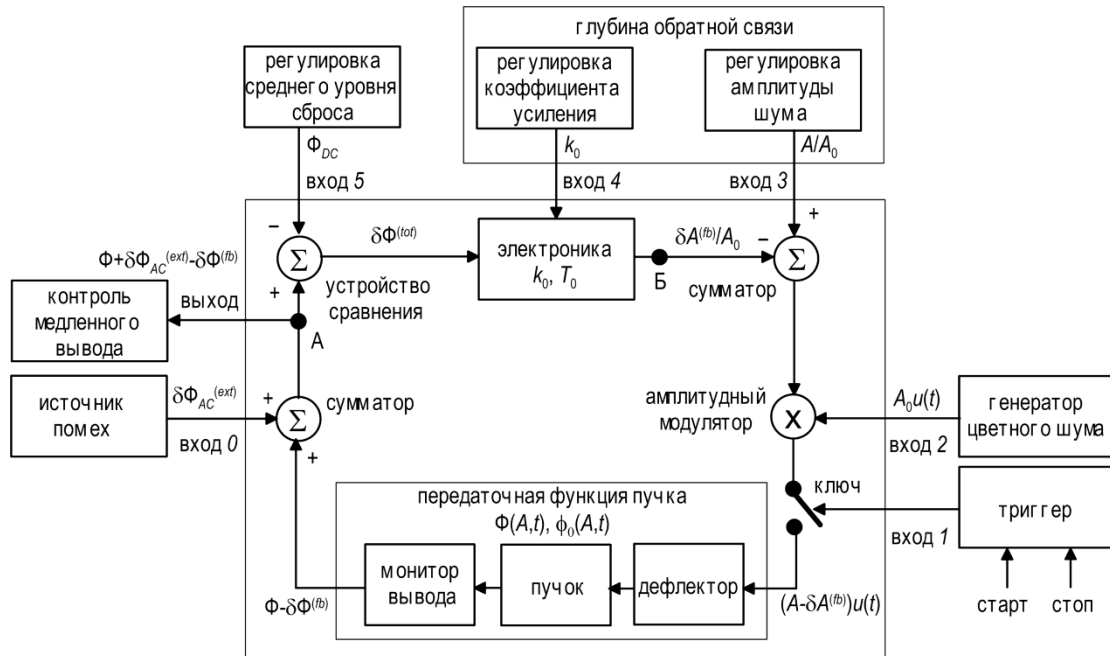


Рис. 2: Структурная схема системы обратной связи.

Электроника имеет регулировки коэффициента усиления  $k_0$  и полосы пропускания фильтра нижних частот, которая выбирается дискретно в диапазоне 10–1000 Гц. Задержка сигнала обратной связи в кабельных коммуникациях не превышает  $T_0 = 2.1$  мкс. В обслуживаемой полосе частот 0–1 кГц критерий (35) заведомо выполнен.

В целом, система обратной связи имеет один целевой (контролируемый) выход — наблюдаемый скорректированный поток (ток) медленного вывода — и шесть входов 0–5 извне (смотри рис. 2).

По неуправляемому входу 0 поступает совокупность всех внешних помех, пересчитанных к выходу из узла монитора медленного вывода. Эти помехи являются сторонними по отношению к рассматриваемой системе (сетевые гармонические наводки, нестабильности токов питания магнитной оптики, импульсные помехи от работы мощного электрофизического оборудования и др.). Их появление на контролируемом выходе в отсутствие регулирования нежелательно и приводит к ухудшению качества медленного вывода.

По входу 1 производится включение и выключение стохастического медленного вывода по сигналам системы синхронизации и блокировок ускорителя.

По входу 2 поступает цветной шум — нерегулируемое случайное несущее колебание  $A_0 \cdot u(t)$ , генерируемое в аналоговой электронной схеме со стабилитроном КС482А и активными  $RC$  фильтрами типа Sallen-Key 6-го порядка. Спектр шума — плоский в пределах полосы 1.6–70 кГц (обе частоты среза определены по уровню –3 дБ). Результаты стендовых радиотехнических измерений характеристик генератора цветного шума приведены в [1].

По входу 3 происходит регулировка амплитуды цветного шума (11), влияющая на естественный сброс  $\Phi(t)$  (10) и передаточную функцию пучка  $\phi_0(A/A_0, t)$  (40).

В будущем по входу 3 также возможна передача аддитивной компенсирующей добавки  $A_{\Pi}(t)/A_0 = G_{\Pi}(t)^{1/2}$ . Фактор  $G_{\Pi}(t)$  и его роль обсуждается в первом комментарии к формулам (9), (10).

По входу 4 подбирается величина коэффициента усиления  $k_0$ . Глубина обратной связи (знаменатель (38)) и степень подавления внешней ошибки регулирования управляются по входам 3 и 4 в совокупности и зависят также от начальной интенсивности пучка  $N(0)$ .

По входу 5 подается постоянное опорное смещение  $\Phi_{DC}$  для устройства сравнения, заказывающее ожидаемую постоянную составляющую сигнала сброса. При выборе величины  $\Phi_{DC}$  учитывается рекомендация (24).

### *Методика настройки*

Методика настройки системы обратной связи поясняется с помощью рис. 3. Площади под кривыми 1, 3 и 4 в пределах от 0 до  $\infty$  одинаковы и равны  $N(0)$ .

На первом этапе размыкается обратная связь (разрыв в точке Б на рис. 2). По входу 3 поступает единичный сигнал  $A/A_0 = 1$ . В точке А измеряется сигнал естественного сброса  $\Phi_0(t)$  (7), порождаемый собственно генератором случайного несущего колебания (цветного шума). Этот сброс показан кривой 1 на рис. 3.

На втором этапе по входу 1 выбирается интервал времени  $[t_0, t_0 + N(0)/\Phi_{DC}]$  открытия электронного ключа, в течение которого должен осуществляться медленный вывод (вертикальные линии на рис. 3). Настройкой сигнала  $A/A_0 \neq 1$  по входу 3 нетривиальная часть нестационарной передаточной функции пучка  $\phi_0(t)$  (40) сдвигается в предписанное окно вывода, кривая 2 на рис. 3. Как таковой, сигнал  $\phi_0(t)$  недоступен для



измерений. Однако согласно второму равенству из (40) он отличается всего лишь масштабным множителем  $2/(A/A_0)$  от наблюдаемого естественного сброса  $\Phi(t)$  (10), (11), измеряемого в точке А на схеме рис. 2 и показанного кривой 3 на рис. 3.

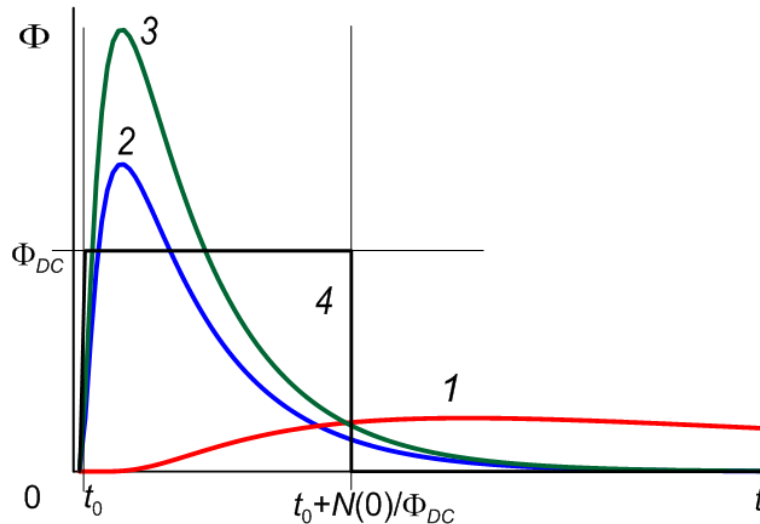


Рис. 3: Настройка системы шумового медленного вывода.

На третьем этапе по входу 5 выбирается постоянный опорный сигнал  $\Phi_{DC}$  для устройства сравнения. Он должен оказаться на уровне 0.3–0.5 от  $\max\Phi(t)$  в окне вывода, обеспечивая биполярную внешнюю ошибку регулирования по постоянному сигналу.

На четвертом, завершающем этапе в точке Б на рис. 2 замыкается обратная связь и получается прямоугольный шумовой сброс пучка. С точностью до остаточной ошибки регулирования он приближается к целевому прямоугольному импульсу  $\Phi_{П}(t)$  (22), кривая 4 на рис. 3. При этом остается возможной ограниченная автономная регулировка глубины обратной связи через усиление  $k_0$ , сохраняющая индекс амплитудной модуляции  $|\delta A|/A < 1$ . При изменении начальной интенсивности пучка  $N(0)$  произведение  $k_0 N(0)$  поддерживается неизменным.

Таким образом, выбор временных характеристик (“старт–стоп”) медленного вывода и оперативные настройки системы обратной связи по входам 3, 4 и 5 на рис. 2 оказываются взаимосвязанными и требуют выполнения изложенной выше последовательности действий.

#### 4. Результаты опытной эксплуатации

Система обратной связи по пучку для получения прямоугольных импульсов медленного стохастического вывода пучка из У-70 успешно введена в опытную эксплуатацию во время весеннего (2014 года) сеанса работы. Система показала характеристики, предусмотренные ее физическим обоснованием.

На рис. 4 приведены экспериментальные осциллограммы процесса вывода. Оси ординат указаны в произвольных единицах.

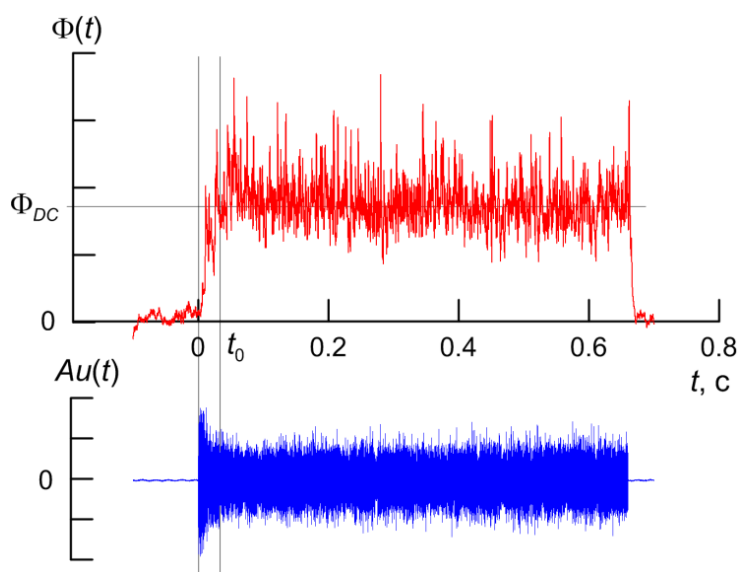


Рис. 4: Прямоугольный импульс шумового медленного вывода углеродного пучка.

Верхний луч показывает уплощенный импульс выведенного потока частиц, зарегистрированный с помощью монитора вторичных частиц и цифрового осциллографа Tektronix DPO4034B. Результат первичных измерений сглажен с помощью фильтра нижних частот с частотой среза 100 Гц, равной полосе пропускания электроники цепи обратной связи. Импульс медленного вывода имеет выраженную постоянную составляющую и достаточно малые пульсации плоской вершины в обслуживаемой полосе частот. В данном случае длительность вывода 0.6 с. Выводится пучок ядер углерода с интенсивностью около  $3 \cdot 10^9$  частиц в цикле (период следования 8.2 с) и удельной кинетической энергией 457 МэВ на нуклон.

Нижний луч показывает амплитудно-модулированный импульс шума поперечной раскачки пучка. Модуляция огибающей осуществляется цепью обратной связи.

Шум включается в момент времени  $t = 0$ . Передний фронт импульса выведенного пучка задерживается на время  $t_0$  масштаба 40 мс, из них 10 мс требуется для завершения переходного процесса в измерительном фильтре нижних частот. Форсирование амплитуды шума в начале импульса стимулирует диффузию первых частиц от кромки циркулирующего пучка до апертуры выводного устройства, удаленной от пучка в  $t = 0$ . Выключение шума отсекает сброс частиц примерно за 6 мс (900 оборотов пучка по орбите).

На рис. 5 показан еще один набор экспериментальных осциллограмм, полученных при настройке шумового медленного вывода углеродного пучка из У-70. Длительность вывода почти 1 с. Выводится  $1.3 \cdot 10^9$  ядер в цикле (8.2 с). На верхнем рисунке обратная связь разомкнута (естественный сброс), на нижнем рисунке — замкнута (прямоугольный сброс). Обозначения лучей одинаковы в обоих случаях.

Луч 1 соответствует поперечному шумовому напряжению, подаваемому на пластины электростатического дефлектора ЭСД-2. На нижней осциллограмме сигнал модулирован по амплитуде.

Луч 2 – интенсивность пучка, ожидающего вывода. Сигнал измерен с помощью индукционного датчика тока. На нижней осциллограмме интенсивность убывает по линейному закону.

Луч 3 – суммарный сигнал обратной связи по постоянной и переменной составляющим сигнала, модулирующий амплитуду шума в замкнутом состоянии (нижняя осциллограмма).

Луч 4 – ток медленно выведенного пучка. Ожидаемые расчетные кривые для лучей 4 показаны на рис. 3 кривыми 3 и 4 соответственно. (Знак экспериментальных сигналов инвертирован.)

По сути, рис. 5 иллюстрирует практическую реализацию второго, третьего и четвертого этапов методики настройки, описанной в предыдущем разделе.

Сигнал медленно выведенного пучка на рис. 5 измерен с помощью малообъемной газовой ионизационной камеры, установленной в 25-м канале транспортировки выведенного пучка у мишени экспериментальной установки. Сглаживание (усреднение) высокочастотных составляющих сигнала происходит из-за собственных инерционных свойств ионизационной камеры. Ее разрешающая способность имитирует уровень требований потенциальных потребителей пучка. Временная структура выведенного пучка адекватна целям радиобиологических исследований.

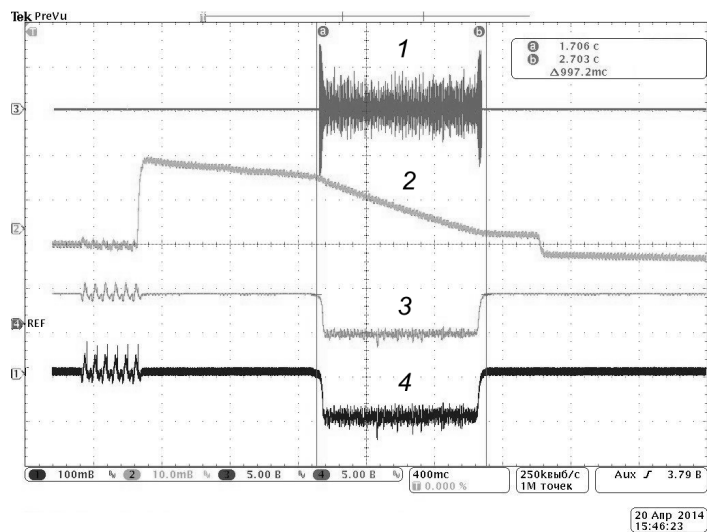
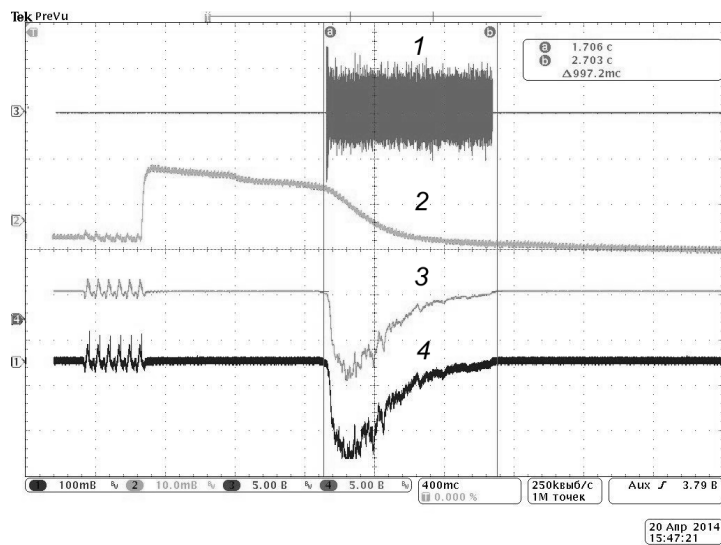


Рис. 5: Экспериментальные осциллограммы шумового медленного вывода углеродного пучка. На верхнем рисунке обратная связь разомкнута (естественный сброс), на нижнем рисунке — замкнута (прямоугольный сброс). В обоих случаях 1 – шум поперечной раскочки, 2 – интенсивность пучка, ожидающего вывода; 3 – сигнал обратной связи, модулирующий амплитуду шума в замкнутом состоянии; 4 – ток медленно выведенного пучка.

## Заключение

Обоснована, создана, проверена экспериментально и введена в опытную эксплуатацию цепь обратной связи по пучку, позволяющая получить длительные прямоугольные импульсы медленного стохастического вывода пучка заряженных частиц (протоны, ядра углерода) на нижнем плато магнитного поля синхротрона У-70. Подтверждена эффективность и гибкость этого метода управления выводом пучка на неподвижную внешнюю мишень для прикладных исследований.

Вывод осуществлялся в головную часть нового, 25-го канала транспортировки пучка до временного радиобиологического стенда, где в 2013–2014 годах начаты первые радиобиологические исследования с помощью медленно выведенного пучка ядер углерода.

## Список литературы

- [1] С.В. Иванов, О.П. Лебедев. *Поперечная шумовая раскачка пучка в синхротроне У-70*. Приборы и техника эксперимента, 2013, № 3, стр. 5–11. Также, препринт ИФВЭ ОУК 2012 – 10, Протвино, 2012.
- [2] С.В. Иванов, О.П. Лебедев. *Цепь обратной связи для стохастического вывода протонов из синхротрона ИФВЭ. Разработка и эксперименты на пучке*. Приборы и техника эксперимента, 2006, № 6, стр. 15–28. Также, препринт ИФВЭ ОУ У70 2006 – 3, Протвино, 2006.

*Рукопись поступила 1 августа 2014 г.*

С.В. Иванов, О.П. Лебедев

Получение прямоугольных импульсов стохастического медленного вывода пучка из синхротрона У-70

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати      08.08.2014.      Формат 60x84/16.      Цифровая печать.

Печ. л. 1,5.      Уч.-изд. л. 2,016.      Тираж 80.      Заказ 12.      Индекс 3649.

---

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»  
142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

