

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОЙ ДЛИНЫ СГУСТКА ПРИ ИНЖЕКЦИИ В БУСТЕРНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СИНХРОТРОН КОМПЛЕКСА NICA

*В. М. Жабицкий*¹

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Обсуждаются методы контроля среднеквадратичной длины сгустка при инжекции в бустерный сверхпроводящий синхротрон комплекса NICA. Используется метод моментов функции распределения заряженных частиц в сгустке при обработке цифрового сигнала для импульсной составляющей тока, пропорционального продольной интенсивности ионов, циркулирующих в синхротроне. Приводятся примеры применения предлагаемых методов при инжекции короткого сгустка ионов углерода в бустерный сверхпроводящий синхротрон в постоянное магнитное поле, а ускоряющее ВЧ-поле включается позднее.

Methods for monitoring the root-mean-square bunch length during injection into the booster superconducting synchrotron of the NICA complex are discussed. The method of moments of the distribution function of charged particles in a bunch is used when processing a digital signal for the pulsed component of the current proportional to the longitudinal intensity of ions circulating in the synchrotron. Examples of the application of the proposed methods are given when injecting a short bunch of carbon ions into the booster superconducting synchrotron into a constant magnetic field, and the accelerating RF field is turning on later.

PACS: 29.20.-c; 29.27.-a

ВВЕДЕНИЕ

В Объединенном институте ядерных исследований реализуется проект ускорительного комплекса NICA [1], в котором используются линейный ускоритель ионов и сверхпроводящие синхротроны. При инжекции ионного сгустка из линейного ускорителя в бустерный сверхпроводящий синхротрон [2] в постоянное магнитное поле необходимо обеспечить захват заряженных частиц без потерь с сохранением продольного импульсного разброса. ВЧ-система при этом выключена, однако включается через некоторое время после разгруппировки пучка. Происходит ВЧ-захват, формируются сгустки и осуществляется ускорение заряженных частиц.

¹E-mail: V.Zhabitsky@jinr.ru

В настоящей работе обсуждаются методы контроля среднеквадратичной длины сгустка с целью настройки инжекционной системы и ВЧ-системы. Используется метод моментов функции распределения заряженных частиц в сгустке при обработке цифрового сигнала для импульсной составляющей тока, пропорционального продольной интенсивности ионов, циркулирующих в синхротроне [3, 4].

НАБЛЮДАЕМЫЕ СИГНАЛЫ

В бустерном сверхпроводящем синхротроне ОИЯИ ионы инжектируются в постоянное магнитное поле. Импульсная система инжекции обеспечивает захват заряженных частиц на замкнутую орбиту. ВЧ-система при этом выключена. В работе [5] приведено описание методов обработки цифрового сигнала с быстрого трансформатора тока FCT, измеряющего импульсную составляющую тока циркулирующих частиц. Пример цифрового сигнала с FCT при инжекции ионов C^{4+} в бустер в постоянное магнитное поле (ВЧ-система выключена) приведен на рис. 1. Измеряемый аналоговый сигнал $I(t)$ с FCT преобразуется в последовательность цифровых отсчетов $n[i] \triangleq I(t_i)$, соответствующих моментам времени $t_i = iT_{clk}$ с постоянным периодом дискретизации $T_{clk} = 20$ нс. Длительность инжектируемого сгустка меньше периода обращения частиц $T_{rev} \approx 8,58$ мкс в постоянном магнитном поле синхротрона (см. рис. 1, а). После завершения работы импульсных устройств инжекционной системы ионы вращаются с постоянной продольной скоростью (v для равновесной частицы) вдоль равновесной орбиты, периметр которой C , так что $T_{rev} = C/v$. Одновременно протекают процессы, приводящие к потере части циркулирующих частиц и к небольшому сокращению длины сгустка. Затем происходит разгруппировка пучка и, следовательно, показания импульсного тока с FCT уменьшаются (практически до нулевых значений: см. рис. 1, б, $t \in [0, 10]$ мс).

Высокочастотная ускоряющая система включается через некоторое время после разгруппировки пучка. Вследствие этого формируются сгустки. Затем осуществляется ускорение заряженных частиц. Процесс группировки пучка после включения ВЧ-системы сопровождается увеличением показаний импульсного тока с FCT (см. рис. 1, б): группировка частиц начинается примерно через 70 мс после инжекции.

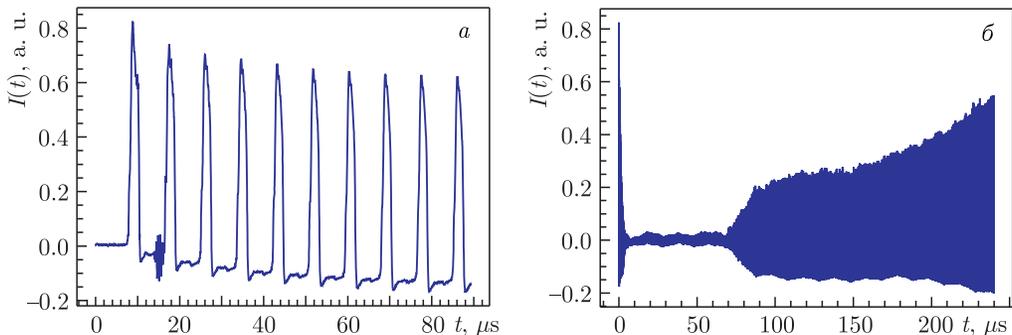


Рис. 1. Сигнал с FCT после инжекции (а) и в течение 240 мс после инжекции (б)

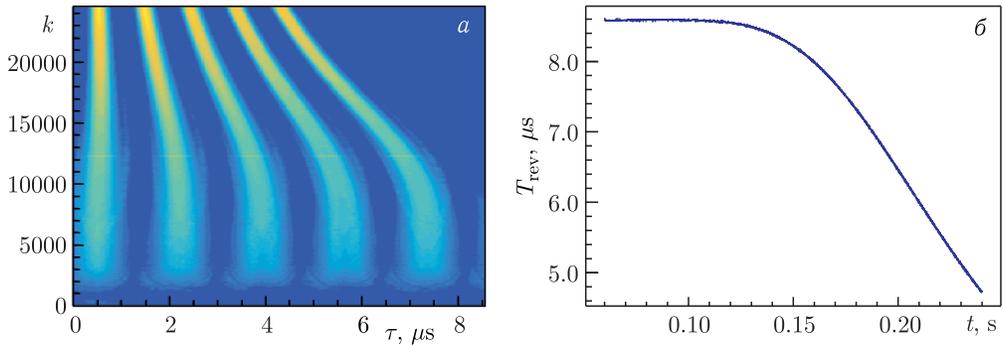
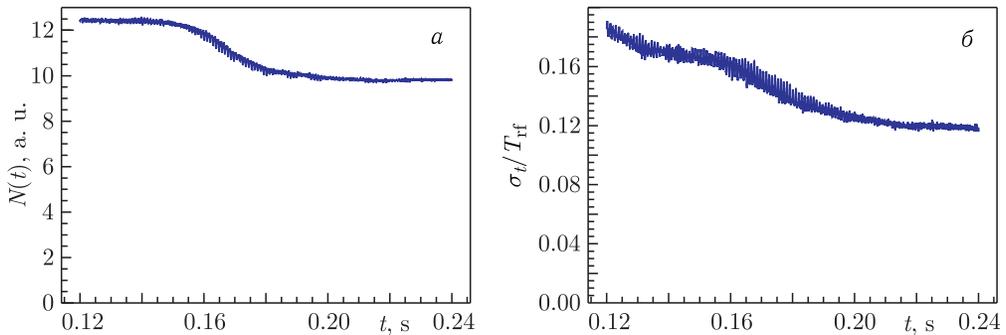
Для подтверждения указанных выше закономерностей удобно использовать методы обработки цифровых сигналов, приведенные в работе [3]. Для перехода от одномерной последовательности цифровых отсчетов $n[i]$ для измеряемого сигнала к двумерной последовательности следующих друг за другом сигналов сгустков синхронно с оборотами можно использовать, в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [4], синхронизирующий ВЧ-сигнал с частотой следования сгустков T_{rf} по оборотам с периодичностью $T_{rev} = h_{rf}T_{rf}$, где $h_{rf} = 5$ — кратность частоты ускоряющего поля в бустере. В результате одномерная зависимость $n[i]$ преобразуется в последовательность функций $f[i, j, k]$, характеризующих распределение частиц по отсчетам i в пределах сгустка j на обороте k . На каждом обороте также осуществляется смещение уровня измеренного сигнала с ФСТ относительно нулевого уровня на величину отрицательного смещения $n_{min}[j, k]$ (см. рис. 1, б), обусловленную индукционным характером сигнала на измерительном датчике [4]. Построенная таким образом цифровая положительно определенная финитная функция $f[i, j, k]$ характеризует дифференциальный закон распределения частиц по дискретным отсчетам i в конкретные моменты времени $t_i(j, k)$ в пределах сгустка j на заданном обороте k . Применяя метод моментов для функции распределения $f[i, j, k]$, можно вычислить функциональные зависимости изменения числа частиц в сгустке $N(t)$ и наблюдаемой среднеквадратичной длительности сгустка $\sigma_t(t)$ в процессе группировки и ускорения ионного сгустка в соответствии с результатами работы [4].

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящем разделе приведены некоторые результаты применения предложенных выше методов обработки цифровых сигналов, наблюдавшихся на бустерном сверхпроводящем синхротроне [2] в сентябре 2021 г. – первом квартале 2022 г. Использовалась технология TANGO для наблюдения и записи цифровых сигналов on-line [6]. При этом применялись 16-разрядные аналого-цифровые преобразователи и был выбран интервал дискретизации $T_{clk} = 20$ нс. Разбиение наблюдаемой цифровой последовательности $n[i]$ по оборотам начиналось через 60 мс после инжекции синхронно с ВЧ-сигналом (использовался задающий ВЧ-сигнал, непрерывно формируемый в соответствии с величиной индукции магнитного поля в дипольных магнитах синхротрона).

Пример графика зависимости $n[i]$ с учетом разбиения на обороты и сгустки приведен на рис. 2, а. Использовался 2D-график — проекция 3D-графика $f[i, j, k]$ на плоскость (k, τ) в соответствии с рекомендациями, изложенными в работах [3, 4]. Здесь k — номер оборота, а τ — максимальная величина $T_{rev}(t)$ в окне обработки сигнала $n[i]$. На рис. 2, б приведен график для периода обращения $T_{rev}(t)$ сгустков, который служит дополнительным подтверждением процесса группировки частиц и последующего ускорения в окне обработки сигнала $t \in [0,06, 0,24]$ с. Представленные графические зависимости наглядно характеризуют процесс группировки пучка в синхротроне.

В качестве количественной характеристики изменяющейся длины сгустка удобно использовать среднеквадратичные размеры сгустка [3, 4], в частности отношение наблюдаемой среднеквадратичной длительности сгустка σ_t к T_{rf} . Вычисление σ_t осуществляется для функции распределения $f[i, j, k]$ на каждом обороте k для

Рис. 2. 2D-сигнал после включения ВЧ-системы (а) и график зависимости $T_{\text{rev}}(t)$ (б)Рис. 3. $N(t)$ (а) и σ_t/T_{rf} (б) для сгустка № 1

конкретного сгустка $j \in [\text{№ } 1, \text{№ } 5]$ в соответствии с правилами, приведенными в работе [4]. Следует также отметить, что расчет σ_t осуществляется с учетом нормализации (см. [4]) на функцию распределения на каждом обороте k . График зависимости σ_t/T_{rev} (для первого сгустка № 1 на рис. 2, а) представлен на рис. 3, б. График зависимости $N(t)$ представлен на рис. 3, а. Видно, что непосредственно после формирования ионного сгустка некоторое число частиц гибнет. Длина сгустка уменьшается вследствие его ускорения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтверждена работоспособность метода компьютерной обработки экспериментальных данных для анализа зависимостей числа циркулирующих ионов и среднеквадратичной длины сгустка после инжекции в процессе группировки пучка при включении ВЧ-системы в бустерном сверхпроводящем синхротроне ОИЯИ.

Автор благодарен сотрудникам ЛФВЭ ОИЯИ О.И.Бровко, А.В.Бутенко и Е.В.Горбачеву за полезные обсуждения, деловые предложения и интерес к настоящей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Syresin E., Brovko O., Butenko A., Galimov A., Gorbachev E., Kekelidze V., Khodzhibagiyan H., Kostromin S., Lebedev V., Meshkov I., Philippov A., Sidorin A., Trubnikov G., Tuzikov A. NICA Ion Collider and Plans of Its First Operations // Proc. of the 13th Intern. Part. Accel. Conf. "IPAC-2022", Bangkok, June 12–17, 2022. JACoW Publ., 2022. P. 1819–1821; <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2022/papers/wepopt001.pdf>.
2. Butenko A., Khodzhibagiyan H., Kostromin S., Meshkov I., Sidorin A., Syresin E., Trubnikov G., Tuzikov A. The NICA Complex Injection Facility // Proc. of the XXVII Russ. Part. Accel. Conf. "RuPAC-2021". Alushta, Russia, Sept. 27 – Oct. 1, 2021. JACoW Publ., 2021. P. 7–11; <https://accelconf.web.cern.ch/rupac2021/papers/moy01.pdf>.
3. Жабицкий В. М. Методы компьютерной обработки экспериментальных данных об интенсивности сгустков в синхротронах // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 7(205). С. 1294–1299; http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2016_7/15_zhabitsky.pdf.
4. Жабицкий В. М. Цифровые методы диагностики продольных параметров сгустков в синхротронах // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 1(199). С. 199–207; http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2016_1/16_zhabit.pdf.
5. Жабицкий В. М. Методы контроля продольного импульсного разброса ионов в сгустке при инжекции в синхротрон // Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т. 19, № 6(245). С. 636–642.
6. Gorbachev E. V., Andreev V. A., Kirichenko A. E., Monakhov D. V., Romanov S. V., Rukoyatkina T. V., Sedykh G. S., Volkov V. I. The Nuclotron and NICA Control System Development Status // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 5(203). P. 905–912; http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2016_5/10_Gorbachev.pdf.

Получено 18 ноября 2022 г.