

## МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ОБ ИНТЕНСИВНОСТИ СГУСТКОВ В СИНХРОТРОНАХ

*В. М. Жабицкий*<sup>1</sup>

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Обсуждаются методы компьютерной обработки экспериментальных данных об интенсивности сгустков в синхротронах с целью получения функциональных зависимостей от времени в течение ускорительного цикла для числа циркулирующих частиц и среднеквадратичной длины сгустка. Приводятся примеры таких зависимостей для пучка в нуклотроне (ОИЯИ) и PSB (ЦЕРН).

Methods of computer processing of experimental data on the intensity of bunches in synchrotrons for the purpose of obtaining functional dependences on time during the accelerating cycle for number of circulating particles and mean-square length of a bunch are discussed. Examples of such dependences for the beam at the Nuclotron (JINR) and PSB (CERN) are presented.

PACS: 29.20.-c; 29.27.-a

### ВВЕДЕНИЕ

При ускорении заряженных частиц в синхротроне используются различные методы диагностики состояния пучка в течение ускорительного цикла. Обычно в режиме реального времени измеряется функциональная зависимость  $N_b(t)$  числа ускоряемых частиц от времени. Данные для  $N_b(t)$  в корреляции с величинами индукции ведущего магнитного поля используются для настройки ускорителя с целью минимизации потерь частиц. Широко распространенным диагностическим устройством также является многоэлектродный датчик для измерения положения центра тяжести сгустка. Суммарный сигнал с электродов такого устройства зависит от числа частиц в сгустке. Он используется для выявления продольного профиля интенсивности сгустка, т. е. для идентификации зависимости  $n(t)$  — числа частиц в последовательных по времени пролета датчика сечениях сгустка. Измеряемый аналоговый сигнал обычно преобразуется в последовательность цифровых отсчетов  $n[i]$ , соответствующих моментам времени  $t_i = i \cdot T_{\text{clk}}$  с постоянным периодом дискретизации  $T_{\text{clk}}$ . В работе [1] приведены методы обработки цифрового сигнала  $n[i]$  в процессе ускорения сгустка в корреляции с величинами ускоряющего напряжения  $V_{\text{rf}}(t)$ . В настоящей работе даются примеры использования приведенных в [1] методов обработки экспериментальных данных для  $n(t)$  с целью получения функциональных зависимостей от времени в течение ускорительного цикла для числа циркулирующих частиц и среднеквадратичной длины сгустка. При этом используются экспериментальные

---

<sup>1</sup>E-mail: V.Zhabitsky@jinr.ru

данные, полученные на нуклотроне (ОИЯИ) и PSB (ЦЕРН). В этих двух синхротронах сгустки формируются после инъекции пучка из линейного ускорителя. Бустерный синхротрон PSB имеет периметр  $C_0 \approx 157$  м, а в нуклотроне  $C_0 \approx 251$  м. В PSB ускоряются протоны, кинетическая энергия которых при инъекции  $W(t_{inj}) = 50$  МэВ, а при выводе  $W(t_{out}) = 1,4$  ГэВ. В результате период обращения протонов изменяется от  $T_{rev}(t_{inj}) = 1,67$  мкс до  $T_{rev}(t_{out}) = 0,57$  мкс. Кратность ускорения  $h = 1$ , так что период  $T_{rf}$  изменения гармонического закона для ускоряющего напряжения  $V_{rf}(t)$  совпадает с  $T_{rev}$ . Сгусток из PSB выводится в PS. При ускорении дейтронов в нуклотроне  $W(t_{inj}) = 5$  МэВ/нуклон, а после ускорения  $W(t_{out}) > 2$  ГэВ/нуклон. Кратность ускорения  $h = 5$ , так что  $T_{rf}(t_{inj}) = 1,63$  мкс. Таким образом, сгустки в PSB и нуклотроне имеют примерно одинаковые характеристики.

### ПРИМЕРЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА PSB (ЦЕРН)

Цикл ускорения протонов в PSB имеет продолжительность около 530 мс [2]. При формировании файла цифровых данных для  $n(t)$  и  $V_{rf}(t)$  использовались два канала одного цифрового осциллографа. Был выбран постоянный период дискретизации  $T_{clk} = 20$  нс. На рис. 1 представлены фрагменты графиков для сигнала пучка  $n(t)$  и ускоряющего напряжения  $V_{rf}(t)$ . На рис. 2 представлен график для сигнала пучка  $n(t)$ , сжатого по времени всего ускорительного цикла продолжительностью 530 мс (от момента инъекции протонов в синхротрон до вывода ускоренных частиц из ускорителя).

Чтобы использовать изложенный в [1] метод, необходимо перейти от одномерной последовательности цифровых отсчетов  $n[i]$  для измеряемого сигнала интенсивности сгустков к трехмерной последовательности  $f[i, j, k]$ , характеризующей дифференциальный закон распределения частиц по отсчетам  $i$  в пределах сгустка с номером  $j \leq h = 1$  на обороте  $k$ . С этой целью используется сигнал ускоряющего напряжения  $V_{rf}(t)$ , который однозначно синхронизован со сгустками (см. рис. 1). Поскольку измеряемое напряжение  $V_{rf}(t_i = i \cdot T_{clk})$  в точках дискретизации  $t_i$  имеет ошибки по амплитуде и времени, для вычисления конкретных значений для точек пересечения кривой  $V_{rf}(t)$ , в окрестности ее отрицательного наклона, с осью времени использован метод наименьших квадратов

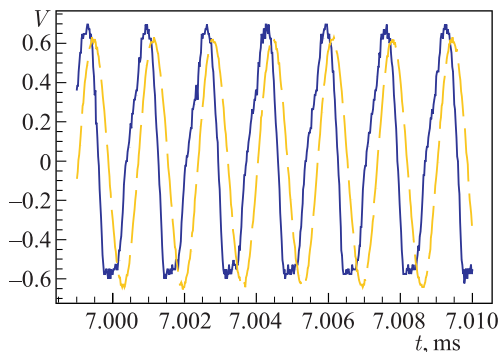


Рис. 1. Фрагменты графиков сигналов пучка (сплошная линия) и ускоряющего напряжения (штриховая)

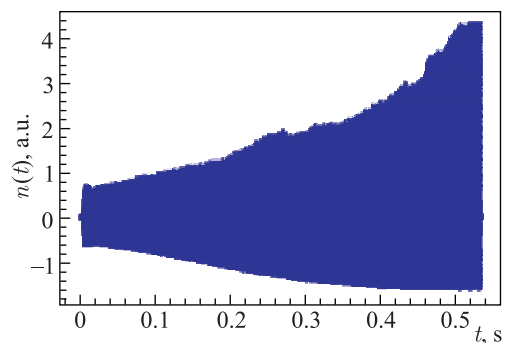


Рис. 2. График сигнала пучка  $n(t)$  в течение ускорительного цикла

(подробное описание процедуры вычисления для точек разбиения сигнала  $V_{rf}$  на обороты приведено в [1]). Пример трехмерного графика зависимости  $n(t)$  с учетом разбиения на обороты представлен на рис. 3. Использован фрагмент сигнала длительностью около 30 мс после инжекции протонов в PSB. В результате разбиения этого сигнала образуется массив данных для  $k < 14\,500$  оборотов. Величина начальной периодичности следования сгустков есть  $T_{rf} = T_{rev} = 1,66$  мкс. Видно, что сгусток синхронизован с ускоряющим полем (отсутствуют или крайне невелики когерентные продольные колебания сгустка как целого, поскольку колебания сгустка по основанию незаметны), однако отчетливо проявляются колебания формы сгустка (изменения в верхней части импульса по амплитуде и длительности). Следует также отметить, что для уменьшения влияния кулоновских полей расталкивания протонов после инжекции в PSB используется способ расщепления исходного сгустка на два мини-сгустка за счет электромагнитного поля дополнительной ускоряющей секции, где кратность ускоряющего напряжения в два раза выше основной гармоники ускоряющего напряжения [2]. На рис. 3 видно, как из исходного сгустка формируются два мини-сгустка, которые, однако, имеют область взаимного пересечения внутри сепаратрисы, формируемой основной ускоряющей секцией. В [2] приведен аналогичный график, характеризующий процесс формирования мини-сгустков, который был получен с помощью специализированной электроники.

На рис. 4 приведен расчет числа частиц в сгустке в соответствии с методикой, изложенной в [1]. Все величины  $N_b(t)$  для пучка представлены в масштабе, соответствующем масштабу для  $n(t)$ . Данные для  $N_b(t)$  могут быть прокалиброваны при их сопоставлении с данными измерений стандартного датчика интенсивности пучка. Видно, что основные потери частиц (менее 15%) происходят в процессе формирования сгустка после инжекции примерно в течение 90 мс. Этот результат согласуется с данными по измерению числа частиц в PSB с помощью стандартного токового датчика [2].

В течение цикла ускорения, который имеет продолжительность около 530 мс, сгусток совершает более 718 200 оборотов согласно данным расчета по расщеплению сигнала  $V_{rf}$  на обороты. Перед выводом дополнительная ускоряющая секция отключается и формируется сгусток, который пересылается в следующий синхротрон PS. На рис. 5 представлен график этого процесса, который является проекцией трехмерного графика распределения интенсивности сгустка на плоскость  $k, t$  (пример трехмерного графика с осями координат  $n(t), k, t$  был приведен выше на рис. 3).

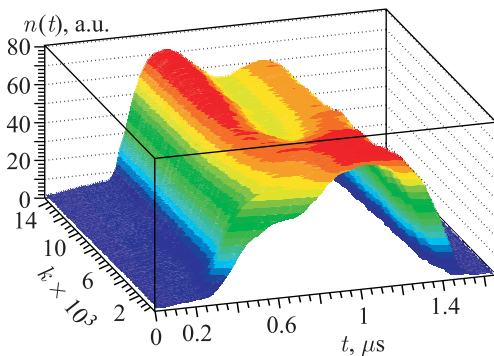


Рис. 3. Формирование сгустка после инжекции

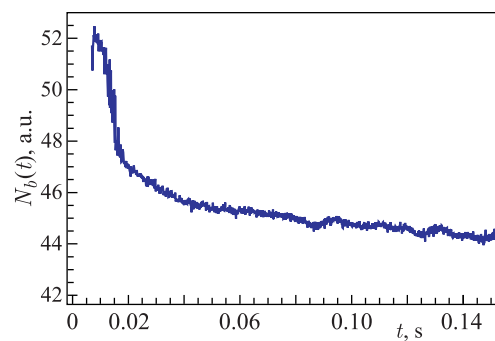


Рис. 4. График зависимости  $N_b(t)$  после инжекции

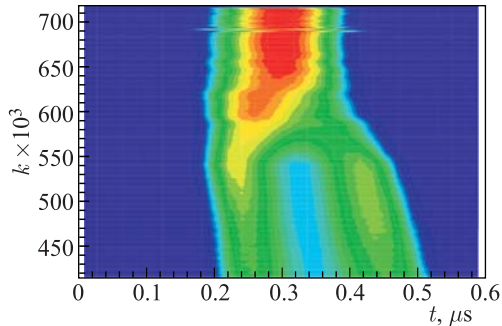


Рис. 5. Формирование сгустка перед выводом

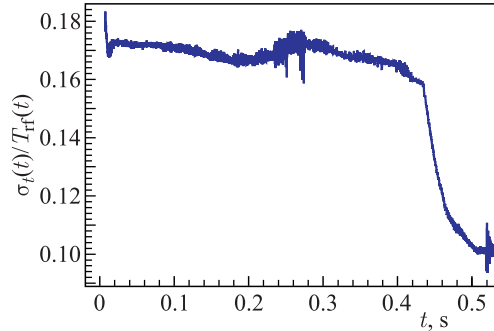


Рис. 6. График зависимости  $\sigma_t(t)/T_{rf}(t)$

Среднеквадратичная длина сгустка  $\sigma_t(t)$  рассчитывается в соответствии с методикой, описанной в [1]. График для среднеквадратичной длины сгустка  $\sigma_t(t)$ , отнесенной к периоду ускоряющего напряжения  $T_{rf}(t)$ , представлен на рис. 6. Видно, что перед выводом сгустка  $\sigma_t < T_{rf}$ , что соответствует применяемым оценкам для продольного эмиттанта пучка (заполнение на 95 %) и является подтверждением высокой продольной плотности пучка на фазовой плоскости.

### ПРИМЕРЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА НУКЛОТРОНЕ (ОИЯИ)

Цикл ускорения пучка дейтронов на нуклотроне составляет около 1 с. Кратность ускорения  $h = 5$ . После инжекции дейтронов из линейного ускорителя формируется пучок из пяти циркулирующих сгустков. Заметные потери частиц происходят в течение нескольких сотен микросекунд после инжекции. Через 3 мс после инжекции пучок становится стабильным как структура из пяти сгустков. Однако каждый сгусток заполняет сепаратрису не полностью. В результате форма профиля сгустка осциллирует во времени, что проявляется в импульсном сигнале интенсивности сгустка (рис. 7). Интенсивность пучка невелика, так что маловероятно возникновение когерентных продольных неустойчивостей вследствие осцилляций формы сгустков. Поэтому формирование синхроимпульсов, необходимых для разбиения сигнала  $n(t)$  интенсивности сгустков по оборотам, может быть реализовано за счет компьютерной обработки цифрового сигнала  $n(t)$ . Используемый алгоритм заключается в следующем. Потери частиц за оборот крайне незначительны, и изменение формы импульса, соответствующего профилю интенсивности конкретного сгустка, за оборот также невелико. Поэтому разбиение сигнала  $n(t)$  по сгусткам и оборотам можно осуществлять в два этапа. Сначала делается предварительное предсказание для суммарного числа цифровых отсчетов, покрывающих  $h$  сгустков. При этом для каждого сгустка определяются точка начала формирования импульса (локальный минимум, предшествующий фронту импульса) и позиция центра импульса в статистическом смысле (как средневзвешенное значение в соответствии с формой профиля интенсивности сгустка). Данные этих вычислений для  $h + 1$  последовательных во времени импульсов, отвечающих циркулирующим сгусткам, являются нулевым приближением для предсказания интервала между хвостом  $h$ -го сгустка на  $k$ -м обороте и фронтом первого сгустка на  $(k + 1)$ -м обороте, внутри которого лежит точка разбиения сигнала на обороты. Затем вычисляется средневзвешенное значение для этого интервала (вновь в статистическом смысле). Эта величина объявляется точкой разбиения сигнала  $n(t)$  на обороты. Такая процедура

позволяет нивелировать влияние изменения формы импульсного сигнала интенсивности сгустков на длину оборота. В результате возникают данные о точках разбиения исходного сигнала по оборотам. Каждый оборот затем разбивается на  $h$  сгустков. Данный алгоритм работает устойчиво в отсутствие когерентных продольных колебаний сгустков. При этом, однако, отсутствует возможность расчета фазы сгустка относительно фазы ускоряющего напряжения. Разработанная в [1] методика основана на восстановлении проекции (на ось времени) функции распределения частиц в сгустке на основе данных о его интенсивности. Такая функция, как указано в [1], зависит только от отклонений частиц по фазе и энергии от их стационарных значений. Поэтому изложенный в [1] метод можно использовать для расчетов числа циркулирующих частиц и среднеквадратичной длины сгустка с учетом данных по разбиению сигнала  $n(t)$  по оборотам и сгусткам и в случае, когда применяется описанная выше процедура формирования синхроимпульсов.

Для формирования требуемого цифрового сигнала  $n(t)$  с длительностью 1 с использовался дигитайзер с периодом дискретизации  $T_{\text{clk}} = 10$  нс. Длина файла с данными соответствовала 100 млн отсчетов. После разбиения цифрового сигнала на сгустки и обороты в течение интервала времени от 3 мс до 1 с расчетный массив данных для синхроимпульсов отвечал 687934 оборотам.

График для интенсивности пучка  $N_b(t)$  как совокупности пяти циркулирующих сгустков представлен на рис. 8 (вертикальный масштаб соответствует  $n(t)$  на рис. 7).

Среднеквадратичная длина сгустка  $\sigma_i(t)$  рассчитывается в соответствии с методикой, описанной в [1]. Графики для  $\sigma_i(t)$  и для длины сгустка, отнесенной к периоду ускоряю-

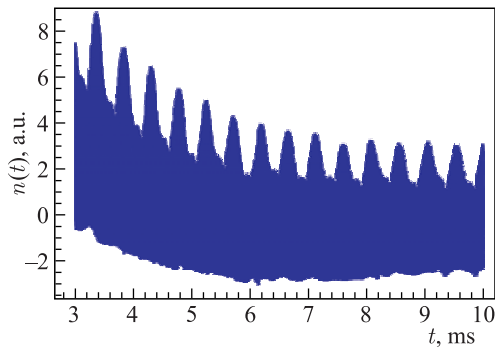
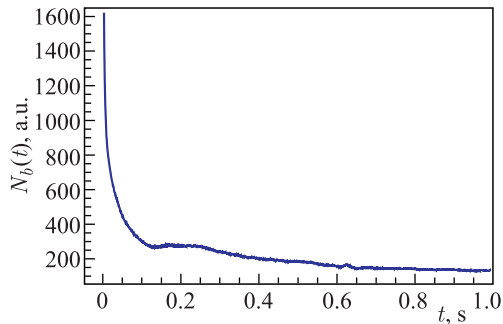
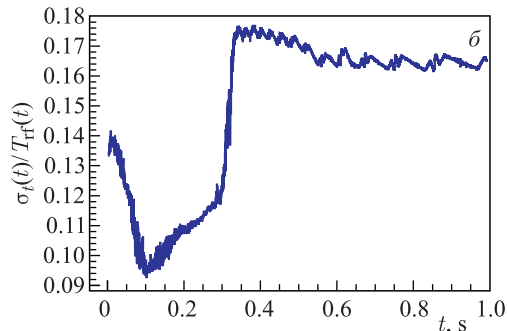
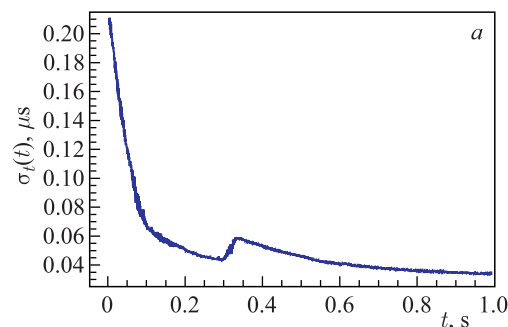


Рис. 7. Фрагмент графика сигнала пучка

Рис. 8. График зависимости  $N_b(t)$ Рис. 9. Графики зависимостей для  $\sigma_i(t)$  (а) и  $\sigma_i(t)/T_{\text{rf}}(t)$  (б)

шего напряжения  $T_{if}(t)$ , представлены на рис. 9 для первого сгустка. В рассматриваемом примере среднеквадратичная длина сгустка заметно уменьшается в соответствии с закономерностями адиабатического изменения длины сгустка при ускорении. Однако происходящее, кажущееся незначительным, увеличение длины сгустка после 0,3 с ускорения приводит к значительному изменению фазовой плотности сгустка.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты по методам компьютерной обработки экспериментальных данных об интенсивности сгустков в синхротронах подтверждают работоспособность изложенной в [1] методики расчета числа циркулирующих частиц и среднеквадратичной длины сгустка.

Автор благодарен А. Бласу (ЦЕРН) и Е. В. Горбачеву (ОИЯИ) за предоставленные экспериментальные данные.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жабицкий В. М.* Цифровые методы диагностики продольных параметров сгустков в синхротронах // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 1(199). С. 199–207.
2. *Angoletta M. E. et al.* PSB Beam Longitudinal Blow-Up by Phase Modulation with the Digital LLRF Prototype System. CERN-ACC-Note-2014-0007. Geneva, 2014. 23 p.