

## АЛГОРИТМ СОГЛАСОВАНИЯ АМПЛИТУДЫ УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТЕМПА РОСТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*О. И. Бровка, А. А. Володин<sup>1</sup>, Ф. Н. Ганюшкин,  
В. А. Лебедев, Е. М. Сыресин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Подготовка инжекционного комплекса NICA к инъекции в коллайдер требует увеличения интенсивности пучка на выходе нуклотрона. Важной частью программы увеличения интенсивности является уменьшение потерь пучка при ускорении. Это требует оптимизации работы многих систем комплекса, в том числе ВЧ-систем. Опыт, полученный в четырех пусконаладочных сеансах инжекционного комплекса, позволил выбрать основные направления для дальнейшей оптимизации работы ВЧ-систем. Измерения показали, что потери, наблюдаемые в начале цикла ускорения, как в бустере, так и нуклотроне, связаны с отсутствием согласования между темпом роста магнитного поля и возможностями существующих ВЧ-систем. Обсуждаются пути достижения такого согласования и потери в темпе ускорения, связанные с этим.

The preparation of the NICA injection complex for injection into the collider requires an increase in the beam intensity at the Nuclotron exit. Important part of the program aimed at the intensity increase is a reduction of beam loss in the course of beam acceleration. This requires an optimization of many systems of the complex, and, in particular, an optimization of operation of the RF systems. Experience gained in the course of four commissioning runs allowed us to choose major directions for further optimization of RF systems operation. The measurement showed that the beam losses observed at the beginning of accelerating cycle, in both Booster and Nuclotron, are due to the lack of matching between the magnetic field growth rate and capabilities of existing RF systems. We discuss ways of achieving this matching and corresponding loss in the accelerating rate.

PACS: 29.27.Ac; 29.20.db

### ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) создается в Объединенном институте ядерных исследований для изучения свойств плотной барионной материи. Одними из основных элементов комплекса являются синхротроны бустер и нуклотрон [1].

На комплексе были проведены четыре пусконаладочных сеанса, в ходе которых был осуществлен физический пуск синхротрона бустер и вывод ускоряющих станций

---

<sup>1</sup>E-mail: volodin-1997@inbox.ru

на проектные параметры [2]. При этом было продемонстрировано ускорение ионов гелия, углерода, железа, аргона и ксенона. Испытаны различные режимы работы ускоряющих станций. Исследована эффективность функционирования бустера и нуклотрона в тандеме [3].

Потери пучка в начале цикла ускорения, наблюдаемые как в бустере, так и в нуклотроне, требуют оптимизации работы ВЧ-систем обоих синхротронов. В работе рассматривается проблема согласования ускоряющего напряжения с магнитным полем и предлагается алгоритм согласования. Продольные профили пучка, полученные с помощью трансформатора тока, используются при анализе эффективности работы ускоряющих станций. Обработка этих сигналов для пучка ионов  $^{124}\text{Xe}^{28+}$  с начальной энергией 3,2 МэВ/нуклон позволила рассчитать динамику продольного распределения. Основные параметры бустера и его ускоряющих станций приведены в таблице.

**Параметры установки и пучка ионов**

Параметр	Значение
Энергия инъекции $E_{inj}$ , МэВ/нуклон	3,2
Критическая энергия в бустере $\gamma_{tr}$	4,43
Рабочая полоса частот ускоряющей системы бустера $f_{rq}$ , МГц	0,585–5,85
Номер гармоник опорного сигнала ВЧ $q_{rf}$	1 или 5
Периметр ускорителя $P$ , м	210,96
Радиус в поворотном магните $R_s$ или $\rho$ , м	14,09
Заряд иона $Z$	28
Число нуклонов в ядре $A_m$	124
Максимальный темп роста магнитного поля $dBdt_{max}$ , Тл/с	1
Максимальная амплитуда ускоряющей станции бустера $V_{rf}$ , кВ	5
Эффективное напряжение при группировке на столе $V_{bunch}$ , В	600

Алгоритм ускорения в предыдущих пусконаладочных сеансах состоял из следующих этапов:

1. Пучок ионов с кинетической энергией 3,2 МэВ/нуклон инжектировался в бустер в постоянное магнитное поле. Ускоряющее напряжение было выключено.

2. После разгруппировки пучка ускоряющее напряжение включалось на 5-й гармонике и увеличивалось адиабатически, вызывая группировку пучка.

3. По окончании группировки магнитное поле увеличивалось в соответствии с заданной программой, быстро переходя в линейный рост величины поля. Амплитуда ускоряющего напряжения начинала меняться в соответствии с зависимостями, определенными заранее, и пучок ускорялся.

4. При достижении промежуточного «стола» магнитного поля, соответствующего энергии 65 МэВ/нуклон, ускоряющее напряжение адиабатически выключалось и пучок разгруппировывался. По завершении «стола» пучок снова группировался, но на первой гармонике, и ускорялся до энергии перевода в нуклотрон.

Изменение амплитуды ускоряющего напряжения на зазоре, измеренное с помощью делителя, показано на рис. 1. Зависимость приведена для одной из двух ВЧ-станций, находящихся рядом друг с другом.

Функционирование ускоряющих станций бустера в соответствии с вышеуказанным сценарием сопровождалось потерями частиц при переходе от «стола» инъекции в растущее магнитное поле, которые составляли до 25 % от начальной интенсивности.



Рис. 1. Зависимости от времени ускоряющего напряжения, производной магнитного поля и показаний датчика поперечного положения пучка. Цена деления по оси времени — 200 мс, по вертикали — 1 В

Как будет видно далее, основной причиной потерь является уменьшение продольного акцептанса из-за слишком быстрого роста магнитного поля в начале цикла ускорения. Напряжение ВЧ-станций недостаточно для поддержания выбранного темпа ускорения, поэтому уменьшение акцептанса не может быть компенсировано дальнейшим увеличением напряжения ВЧ.

Зависимости от времени ускоряющего напряжения, производной магнитного поля и показаний датчика поперечного положения пучка для ускоряющего цикла бустера представлены на рис. 1. Ускоряющее напряжение резонатора измерялось с помощью емкостного делителя. В соответствии с его показаниями (без калибровки с помощью пучка) амплитуда напряжения на столе инъекции составляла 850 В (см. рис. 1). В общем случае чувствительность делителя является функцией частоты и для аккуратной оценки продольного акцептанса необходима калибровка делителя на основе изучения динамики частиц. В частности, это может быть достигнуто измерением частоты синхротронных колебаний на высокой энергии, где длина сгустка достаточно короткая, чтобы можно было пренебречь зависимостью частоты синхротронных колебаний от амплитуды.

## 1. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Используя данные, полученные с быстрого трансформатора тока, оценим эффективное напряжение и среднеквадратичный эмиттанс. В соответствии с полученными значениями рассчитаем сепаратрису ВЧ-системы и ее эволюцию в процессе ускорения.

Определим эффективное напряжение с помощью быстрого трансформатора тока, что позволит нивелировать частотную зависимость делителя. Сигнал с быстрого трансформатора тока в процессе циркуляции пучка на «столе» инъекции представлен на рис. 2. При выборке полученных данных синхронизация реализовывалась по опорному сигналу ВЧ, а время одного оборота составляло 8,5 мкс. На рис. 2 наложены друг на друга зависимости, полученные за несколько последовательных оборотов.

Выбрав любой из сгустков, можно получить зависимость положения его центра тяжести относительно фазы ВЧ от времени в течение нескольких десятков тысяч

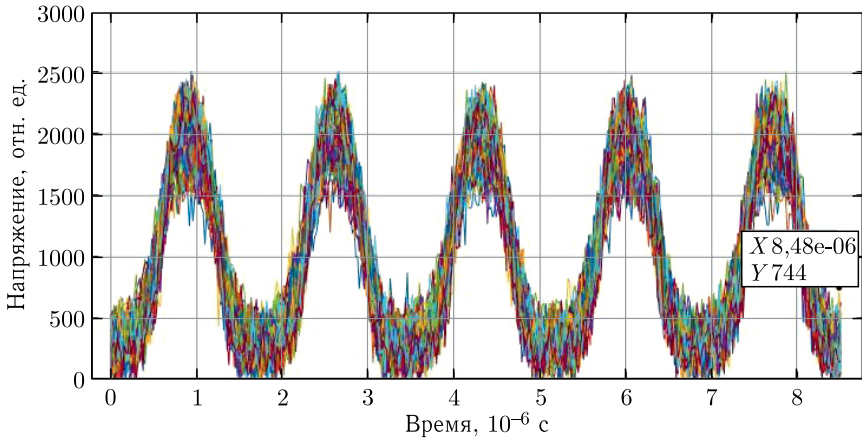


Рис. 2. Сигналы с трансформатора тока для одного оборота

оборотов. На рис. 3 представлена переменная составляющая продольного положения сгустка относительно ВЧ. Как видно из этого рисунка, ошибки при группировке пучка приводят к возникновению малых синхротронных колебаний его центра.

Частота малых когерентных колебаний равна [4]

$$\Omega_s = \sqrt{\frac{q_{rf} eZ V_{rf} |\eta| \cos \varphi_S}{2\pi A_m v_s p_s}}, \quad (1)$$

где  $\cos \varphi_S$  — косинус синхронной фазы;  $V_{rf}$  — ускоряющее напряжение;  $\eta$  — коэффициент скольжения частоты по импульсу;  $q_{rf}$  — кратность ускоряющего ВЧ-напряжения;  $A_m$  — число нуклонов в ядре;  $eZ$  — заряд ядра;  $p_s$  — импульс синхронной частицы на нуклон;  $v_s$  — скорость частицы.

Быстрое фурье-преобразование сигнала задает частоту синхротронных колебаний  $\Omega_s = 430$  Гц (см. рис. 3). При постоянном магнитном поле  $\cos \varphi_S = 1$ , и эффективное напряжение, рассчитанное по формуле (1), составляет примерно 600.

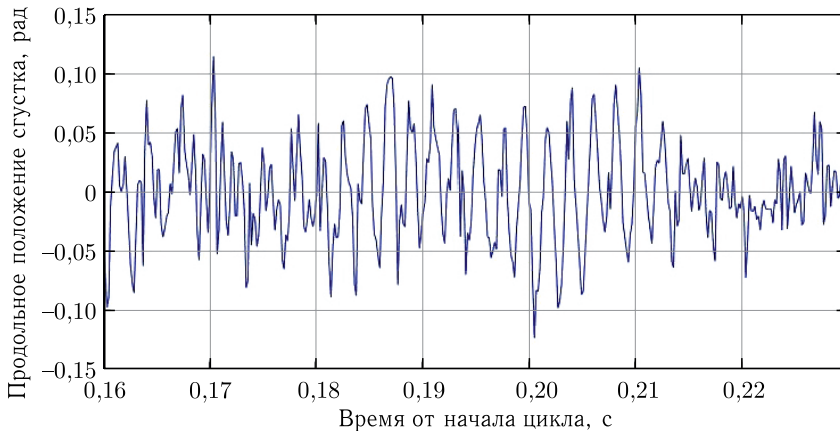


Рис. 3. Зависимость положения центра тяжести сгустка от времени

Полученное значение напряжения можно использовать при расчете продольного акцептанса ВЧ-системы бустера, используя гамильтониан

$$H(\Delta p, \varphi) = \frac{q_{rf}\eta f}{2p_S} \Delta p^2 - Ze \frac{V_{rf}}{2\pi\rho} (\cos \varphi - \varphi \sin \varphi_s). \quad (2)$$

При циркуляции пучка на поле инжекции его полная энергия остается постоянной, сепаратриса ВЧ-системы, рассчитанная с помощью (2), показана на рис. 4. Она имеет размах по фазе, равный  $2\pi$ , а размах по вертикали определяется величиной эффективного напряжения. Площадь внутри сепаратрисы, определенная на фазовой плоскости  $(\Delta E, \Delta t)$ , обычно используется в качестве меры продольного акцептанса, который в нашем случае составляет  $0,3 \text{ эВ} \cdot \text{с}$  на энергии инжекции.

Продольный эмиттанс пучка можно рассчитать, используя ту же зависимость интенсивности от времени в процессе циркуляции пучка на «столе» инжекции (рис. 5). Для получения распределения тока вдоль сгустка необходимо скорректировать сигнал

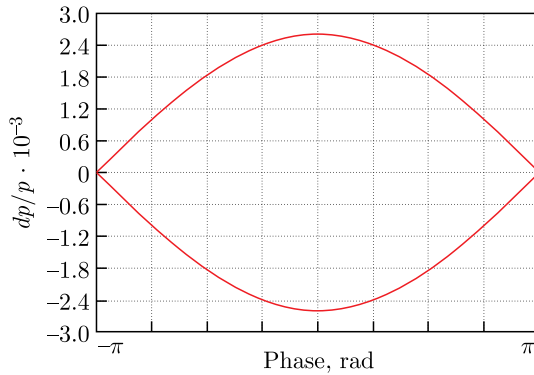


Рис. 4. Сепаратриса для первой гармоники ВЧ с напряжением 600 В



Рис. 5. Зависимость продольного акцептанса и производной магнитного поля от времени для цикла ускорения в четвертом сеансе

быстрого трансформатора тока с учетом зависимости его комплексного коэффициента передачи от частоты. Соответствующие зависимости представлены на рис. 6. Кривые получены для одного из пяти сгустков, циркулирующих в кольце.

Продольное распределение частиц в сгустке (см. рис. 6), наблюдаемое в виде сигнала быстрого трансформатора тока, является не чем иным, как проекцией распределения сгустка в продольном фазовом пространстве на ось времени. Продольное распределение частиц в фазовом пространстве восстанавливалось с помощью одномерной томографии, результаты которой представлены на рис. 7. Для этого распределение сгустка в продольном фазовом пространстве фитировалось таким образом, чтобы проекция этого распределения на ось времени совпала с продольным распределением сгустка, наблюдаемым с помощью трансформатора тока.

Среднеквадратичный продольный эмиттанс в соответствии с данными рис. 7 оценивается как  $\varepsilon_{rms} = 0,21$  эВ·с, а «хвосты» распределения тянутся примерно до 0,4 эВ·с.

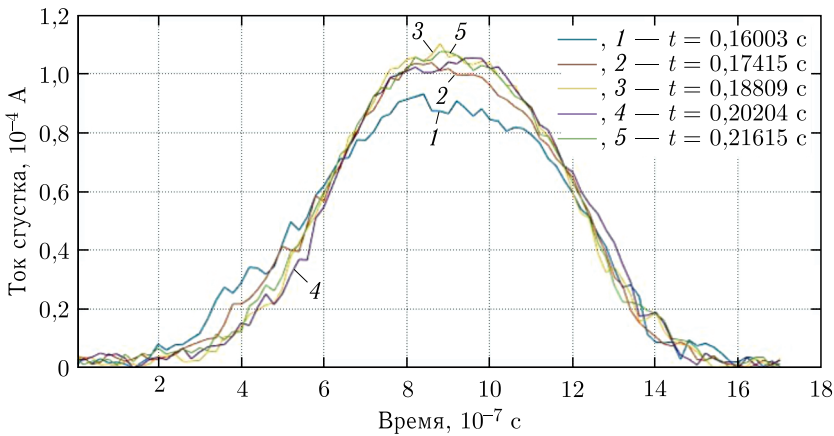


Рис. 6. Функции продольного распределения частиц

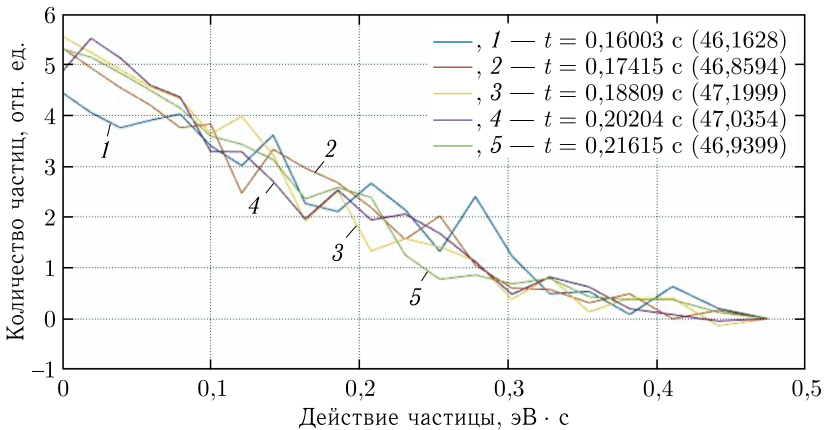


Рис. 7. Распределение частиц по действию

Расчеты показывают, что после завершения адиабатической группировки пучка частицы сгустка заполняли всю сепаратрису, а несогласованность роста амплитуды ускоряющего напряжения с магнитным полем, приводившая к уменьшению продольного акцептанса, являлась причиной потерь частиц.

## 2. МЕРЫ ПО ПОВЫШЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ

Основной задачей пусконаладочных сеансов являлось тестирование различных режимов работы нового оборудования, и детальная оптимизация динамики частиц не проводилась. Несмотря на это, в четвертом сеансе удалось достичь интенсивности выведенного из нуклотрона пучка ядер ксенона на уровне  $10^7$  частиц за цикл, что обеспечило оптимальную загрузку систем детектора при наборе статистики в эксперименте  $BM@N$  (Baryonic Matter at Nuclotron), и провести цикл работ по программе прикладных исследований. Однако для оптимального заполнения колец коллайдера NICA (первые эксперименты на котором намечены на 2025 г.) интенсивность ускоренного в нуклотроне пучка необходимо увеличить в 50–100 раз [5].

Одним из важнейших ускорительных достижений четвертого сеанса явилось детальное исследование причин потерь частиц на всех стадиях ускорения, на основе которого была выработана программа мер, необходимых для кардинального увеличения эффективности ускорения.

Исследования, проведенные с ионным источником КРИОН-6Т, показали, что не удастся достичь интенсивности пучка тяжелых ионов, ожидаемой при его проектировании. Один из путей ее увеличения — это накопление ионов в бустере при последовательно повторяемых импульсах инжекции и электронном охлаждении инжектируемых порций пучка. Наиболее эффективным методом является накопление в продольном фазовом пространстве. Такой выбор оказывается также простейшим с точки зрения технической реализации. Накопление осуществляется при ВЧ-напряжении, включенном на первой гармонике частоты обращения. Инжекция пучка длительностью около половины периода обращения происходит в неустойчивую точку продольного движения. В промежутке между импульсами инжекции электронное охлаждение группирует пучок в центре сепаратрисы, тем самым освобождая место на орбите для следующей инжекции. Экспериментально полученное характерное время охлаждения порядка 100 мс определяет период повторения импульсов инжекции. Таким образом, за секунду можно увеличить интенсивность пучка в бустере примерно на порядок, после чего он ускоряется при той же (первой) кратности ускоряющего напряжения. При этом отпадает необходимость в промежуточном «столе» поля и длительность цикла бустера оказывается практически неизменной [6, 7].

В таком режиме ускоряющие станции бустера работают за пределами проектного диапазона частот. При снижении частоты уменьшается шунтовое сопротивление, и при той же мощности оконечного каскада усилителя амплитуда напряжения оказывается заметно меньше проектного значения 5 кВ. После начала ускорения частота обращения частиц увеличивается, соответственно, увеличивается частота ускоряющего напряжения, и при той же мощности увеличивается его амплитуда из-за роста шунтового сопротивления. При этом темп роста магнитного поля можно задавать таким образом, чтобы продольный акцептанс не уменьшался, что исключит потери частиц при ускорении.

Реализация этого режима работы осуществляется в два этапа:

- на основании стендовых измерений определяется зависимость амплитуды ускоряющего напряжения от частоты при постоянной мощности усилителя;
- на основе расчета строится оптимальная зависимость магнитного поля от времени в виде таблицы, которая передается циклозадающей аппаратуре в качестве опорной функции.

В процессе работы с пучком ускоряющая система (LLRF) работает обычным образом: задающий генератор отслеживает реальное магнитное поле.

### 3. АЛГОРИТМ СОГЛАСОВАНИЯ

Алгоритм рассчитывает зависимость энергии пучка и, соответственно, магнитного поля от времени с учетом зависимости амплитуды ускоряющего напряжения от частоты обращения. Целевая функция выбрана так, чтобы продольный эмиттанс не уменьшался в процессе ускорения и оно выполнялось с максимальным темпом. Такой выбор минимизирует потери пучка при сравнительно малом удлинении цикла ускорения. Ускорение пучка на первой гармонике ВЧ на начальной стадии ускорения означает, что ВЧ-система будет работать вне номинальной рабочей полосы частот. Это уменьшает ускоряющее напряжение в начале цикла и, следовательно, средний темп ускорения. Тем не менее отсутствие перебанчировки в середине цикла компенсирует удлинение цикла. Отметим, что проектная полоса частот — 0,585–5,85 МГц, в то время как частота обращения на энергии инжекции составляет  $\sim 0,12$  МГц.

Зависимость ускоряющего напряжения от времени  $V(t)_{\text{acc}}$  состоит из следующих трех участков:

1) адиабатическое увеличение напряжения от напряжения накопления к напряжению ускорения  $V_{\text{ad}}(t)$ , при котором ускорение уже начинается;

2) начальный участок ускорения, при котором напряжение резонатора увеличивается с ростом энергии пучка из-за увеличения частоты обращения, что описывается опорной функцией  $V_f(f)$ , по которой сначала рассчитывается зависимость энергии от времени, а затем на основе полученной зависимости генерируется цифровой массив магнитного поля. Скорость роста магнитного поля выбирается такой, чтобы продольный акцептанс оставался постоянным в процессе ускорения. Этот участок заканчивается, когда скорость роста магнитного поля достигает максимальной скорости, которую поддерживает магнитно-криостатная система;

3) дальнейшее ускорение, которое осуществляется с постоянной скоростью роста магнитного поля при максимальном напряжении ВЧ.

Функция  $V_{\text{ad}}(t)$  описывает изменения амплитуды ВЧ для адиабатической группировки уже сгруппированного пучка (рис. 8) и задается аналитически:

$$V_{\text{ad}}(t) = V_{\text{inj}} + \left( \frac{V_{\text{rf}}(f) - V_{\text{inj}}}{2} \right) \left( 1 - \cos \left( \frac{\pi t}{t_{\text{ad}}} \right) \right). \quad (3)$$

Функция  $V_f(f)$  описывает максимальную амплитуду ВЧ-напряжения в нерабочей полосе частот 0,1–0,6 МГц и начинает использоваться в момент окончания функции  $V_{\text{ad}}(t)$ . Зависимость  $V_f(f)$  получена экспериментально (рис. 9). Проводились измерения амплитуды ускоряющего напряжения от частоты на обеих ВЧ-станциях бустера.



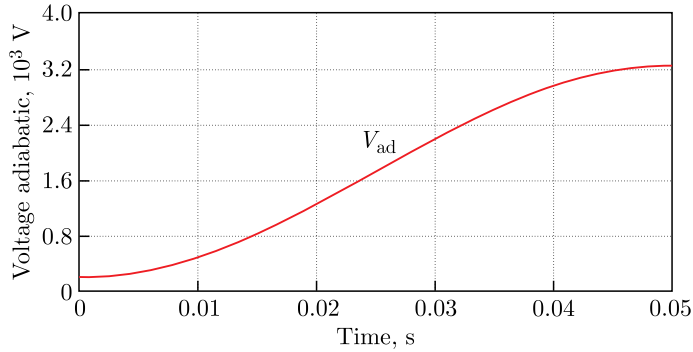


Рис. 8. Зависимость амплитуды ВЧ в начальный момент времени

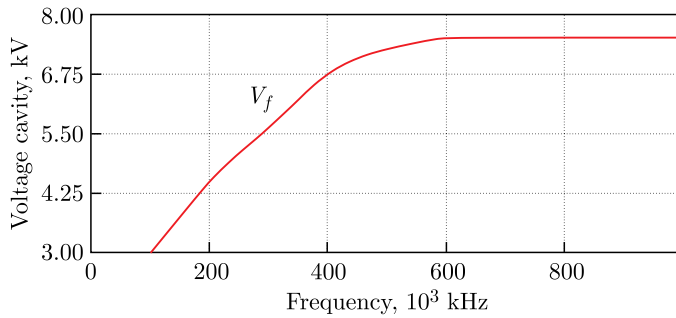


Рис. 9. Экспериментально полученная зависимость амплитуды ВЧ-напряжения  $V_f$  от частоты

Зная  $V_f(f)$ , можно рассчитать зависимость изменения амплитуды ВЧ-напряжения от времени  $V(t)_{acc}$  (рис. 10). Расчет основан на вычислении скорости и времени оборота синхронной частицы, приращения энергии за оборот, коэффициента скольжения частоты по импульсу, лоренц-фактора, синхронной фазы и продольного акцептанса. В результате мы получаем цифровые массивы зависимости энергии, магнитного поля и напряжения ВЧ от времени. При расчете учитываются ограничения на максимальный темп ускорения. На первом и третьем участках акцептанс нарастает со временем,

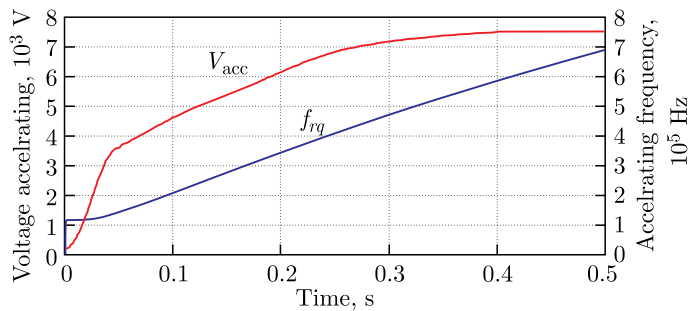


Рис. 10. Закон изменения амплитуды ВЧ-напряжения  $V_{acc}$  и частота опорного сигнала ВЧ  $f$

а на втором участке продольный акцептанс поддерживается постоянным:

$$\varepsilon = \text{const}, \quad v = \frac{c\sqrt{(E_m+E)^2 - E_m^2}}{E_m + E}, \quad t = \frac{nP}{v}, \quad f = \frac{v}{P},$$

$$\Delta E = n \frac{Z}{A_m} V_{\text{acc}}(t) \sin \varphi, \quad \gamma = \frac{A_m(E_m + E)}{A_m E}, \quad \eta = \left(\frac{1}{\gamma_{\text{tr}}}\right)^2 - \left(\frac{1}{\gamma}\right)^2. \quad (4)$$

Здесь  $E_m$  — энергия покоя нуклона,  $E$  — энергия на нуклон,  $c$  — скорость света,  $n$  — число оборотов,  $\varepsilon$  — продольный акцептанс,  $\Delta E$  — приращение энергии за  $n$  оборотов,  $\sin \varphi$  — синус синхронной фазы,  $f$  — частота обращения синхронной частицы,  $t$  — время обращения синхронной частицы за  $n$  оборотов,  $\gamma$  — лоренц-фактор. Значение  $\sin \varphi$  рассчитывалось численно из функции  $f(\sin \varphi, \gamma, V_{\text{rf}}, \varepsilon)$  при условии  $\varepsilon = \text{const}$ :

$$f(\sin \varphi, \gamma, V_{\text{rf}}, \varepsilon) = \frac{8}{\pi} \frac{E_m P}{c} \sqrt{\frac{Z V_{\text{rf}} \gamma}{2\pi A_m q_{\text{rf}} |\eta| E_m}} \frac{1 - \sin \varphi}{\left(1 + \frac{\sin \varphi}{2}\right)^2} - \varepsilon = 0,$$

где  $V_{\text{rf}}$  — ускоряющее напряжение. Полученное значение  $\sin \varphi$  необходимо подставить в выражение для приращения энергии из (4).

Закон изменения амплитуды ускоряющего напряжения и частота опорного сигнала ВЧ представлены на рис. 10.

В момент времени, когда производная магнитного поля достигает максимального темпа роста (рис. 11), условие постоянства продольного акцептанса снимается, так как дальнейшее ускорение противоречит требованиям, установленным операторами установки. Далее темп ускорения остается постоянным, следовательно, приращение энергии и скорость синхронной частицы могут быть найдены по известным выражениям [4]. Значение  $\sin \varphi$  можно рассчитать по формуле

$$\sin \varphi = \frac{E_{n+1} - E_n}{(t_{n+1} - t_n) f_{r q_{n+1}}} \frac{A_m}{Z V_{\text{acc}}(t)}. \quad (5)$$

Такой способ позволяет ускориться максимально быстро и минимизировать потери частиц при захвате и росте продольного эмиттansa. Алгоритм на основе закона изменения амплитуды ВЧ-напряжения рассчитывает выходные зависимости магнитного поля и его производной (рис. 12).

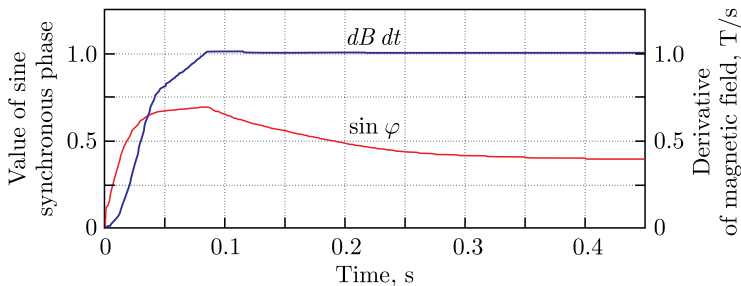


Рис. 11. Закон изменения производной магнитного поля и синуса синхронной фазы

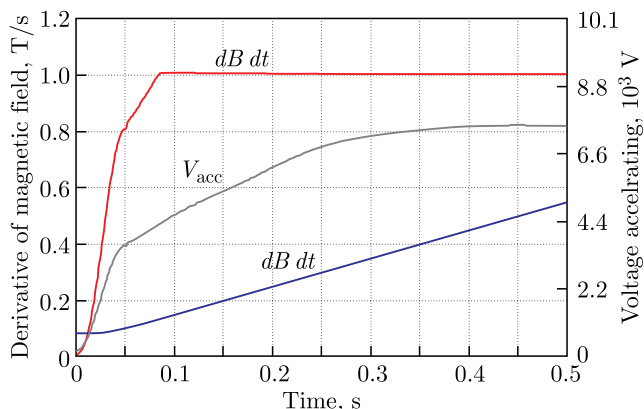


Рис. 12. Закон изменения магнитного поля, производной магнитного поля и амплитуды ускоряющего напряжения

Таким образом, на основе представленного выше алгоритма разработана программа, которая генерирует следующие зависимости от времени:

- 1) магнитное поле;
- 2) производную магнитного поля;
- 3) значение амплитуды ВЧ-напряжения.

Сгенерированные законы изменения используются для генерации магнитного цикла основного магнитного поля синхротрона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения эффективности функционирования ВЧ-систем разработан алгоритм согласования ускоряющего напряжения с темпом роста магнитного поля. На основе алгоритма написано программное обеспечение, которое передает сгенерированные зависимости управляющим системам для установки магнитного поля.

Автор приносит благодарность А. О. Сидорину и В. С. Шпакову за предоставленные экспериментальные данные и их обсуждение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sisakyan A. N.* The Nuclotron-Based Ion Collider Facility at the Joint Institute for Nuclear Research // Proc. of the 18th Intern. Conf. "PANIC08", Eilat, Israel, Nov. 9–14, 2008; Nucl. Phys. 2009. V. 827. P. 630C–637C.
2. *Grebentsov A. Yu., Brovko O. I., Butenko A. V., Gerklotts V. A., Malyshev A. M., Petrov V. D., Prozorov O. V., Syresin E., Volodin A. A., Batrakov A. M., Krutikhin S. A., Kurkin G. Y., Petrov V. M., Pilan A. M., Rotov E., Tribendis A. G., Fatkin G. A.* Booster RF System First Beam Tests // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC21), Alushta, Russia, Sept. 2021; J. Accel. Conf. Website. 2021. P. 370–372; doi: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPS14.

3. Бровко О. И., Володин А. А., Гребенцов А. Ю., Прозоров О. В., Сыресин Е. М., Сидорин А. О. Исследование режимов работы ВЧ-систем синхротронов бустер–нуклотрон при оптимизации захвата и ускорения пучков ионов углерода // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 650–656.
4. CAS CERN Accelerator School. Fifth General Accelerator Physics Course / Ed. S. Turner. CERN 94-01 Proc. V. 1. 1994.
5. Bekhtenev E. A., Karpov G. V., Kuzminykh V. S. BPM System for Transport Channel Booster–Nuclotron at NICA Complex // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15, No. 7. P. 933–936.
6. Бутенко А. В., Бровко О. И., Галимов А. Р., Горбачев Е. В., Костромин С. А., Карпинский В. Н., Мешков И. Н., Мончинский В. А., Сидорин А. О., Сыресин Е. М., Трубников Г. В., Тузиков А. В., Филиппов А. В., Ходжибагиян Г. Г. Бустер комплекса NICA: сверхпроводящий синхротрон нового поколения // УФН. 2023. Т. 193, № 2. С. 206–225.
7. Melnikov S. A., Ahmanova E. V., Butenko A. V., Kobets A. G., Meshkov I. N., Orlov O. S., Osipov K. G., Semenov S. V., Sergeev A. S., Sidorin A. A., Sidorin A. O., Syresin E. M., Ivanov A. V. Features of the Electron Cooling System of the NICA Booster // 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC2021), Alushta, Russia, 2021; J. Accel. Conf. Website; doi: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB04.

Получено 2 августа 2024 г.