

Электронные, ионные и лазерные пучки

УДК 621.384.665

ВЧ-кикер системы подавления продольных колебаний пучка для источника синхротронного излучения

А. С. Смыгачева, В. Н. Корчуганов, Ю. Ф. Тарасов, А. В. Вернов

В НИЦ «Курчатовский институт» работает специализированный источник синхротронного излучения — накопитель электронов «Сибирь-2». Для улучшения потребительских качеств установки на накопитель установлена система подавления когерентных колебаний электронного пучка. Неотъемлемыми частями этой системы являются устройства, воздействующие на пучок посредством электромагнитных полей. Основные моменты разработки одного из таких устройств, называемого ВЧ-кикером, и результаты измерений готового изделия представлены в данной статье.

PACS: 29.27.Bd

Ключевые слова: накопитель электронов, система обратной связи, ВЧ-кикер, когерентные неустойчивости, продольная динамика пучка.

Введение

Курчатовский источник синхротронного излучения «Сибирь-2» работает в двух режимах — на энергии инжекции в 450 МэВ и рабочем уровне энергии 2,5 ГэВ. Сгустки электронов инжектируются последовательно из малого ускорительного кольца в накопитель на энергии 450 МэВ. Номинальный ток накапливаемых электронов составляет 0,2 А, а максимально возможное количество электронных сгустков равно 75. После окончания процесса накопления происходит процесс подъема энергии электронов до уровня в 2,5 ГэВ.

Вокруг накопителя располагаются экспериментальные станции, проводящие исследования в

различных областях науки. Работа источника с электронами на энергии 2,5 ГэВ с выведенными пучками синхротронного излучения на экспериментальных станциях продолжается в течение 8—12 часов. В связи с растущими требованиями к качеству фотонных пучков и, следовательно, к качеству электронного пучка на источнике синхротронного излучения проводятся работы по модернизации накопителя.

Одним из требований к улучшению потребительских качеств установки является увеличение тока накапливаемых электронов. Величину тока ограничивает развитие коллективных неустойчивостей электронного пучка, которые вызваны взаимодействием сгустков электронов с высшими модами колебаний ускоряющих резонаторов, с элементами вакуумной камеры (остаточные поля — wake-fields) и ионами остаточного газа. В накопителе «Сибирь-2» развитие неустойчивых колебаний сгустков пучка в основном можно наблюдать на энергии инжекции. Результатом такого взаимодействия является вероятность частичной и даже полной потери пучка в процессе накопления. Для борьбы с неустойчивостями на накопитель «Сибирь-2» в настоящее время установлена система подавления когерентных колебаний электронного пучка.

Работа указанной системы подавления когерентных колебаний направлена на стабилизацию движения пучка заряженных частиц и позволяет

Смыгачева Антонина Сергеевна, инженер-исследователь.

Корчуганов Владимир Николаевич, зам. руководителя ККСНИ по передовым ускорительным технологиям.

Тарасов Юрий Федорович, главный конструктор.

Вернов Александр Валентинович, начальник группы ВЧ-систем.

НИЦ «Курчатовский институт».

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

Тел.: 8 (499) 196-70-38; 8 (915) 473-11-45.

E-mail: presscentr@kiae.ru4;

sasmyga@mail.ru; vnkorchuganov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2015 г.

© Смыгачева А. Н., Корчуганов В. Н., Тарасов Ю. Ф., Вернов А. В., 2015

наглядно отслеживать и изучать его динамику. В зависимости от того, как система отслеживает и подавляет нестабильность пучка, существуют ее два основных вида: 1) система, воздействующая на каждую моду связанных колебаний сгустков; 2) система, воздействующая на каждый сгусток в отдельности. В случае накопителя «Сибирь-2» система подавления осуществляет посгустковое воздействие на пучок в трех направлениях относительно направления движения электронного пучка: вертикальном, горизонтальном и продольном [1]. Такая система состоит из четырех основных элементов: пикапа, процессора, широкополосного ВЧ-усилителя и кикера.

Электроды пикапа фиксируют пространственное положение каждого проходящего сквозь него сгустка заряженных частиц. Далее сигнал с пикапа поступает на вход сумматора, который выделяет две поперечные и одну продольную компоненты. Три сигнала, представляющие собой последовательность импульсов, соответствующих каждому сгустку, поступают в сигнальные процессоры, по одному для каждого из трех выделенных направлений. Процессор, в свою очередь, обрабатывает каждый импульс в отдельности, преобразуя его в сигнал коррекции, и с задержкой, соответствующей одному или нескольким периодам обращения сгустка в накопителе, подает на вход управляющих ВЧ-усилителей. Результирующий импульс от ВЧ-усилителей подается на электроды кикера, работающего в одном из направлений, и посредством возникающего электромагнитного поля происходит нужное воздействие на сгусток.

Разработка и расчет ВЧ-кикера

Для воздействия на пучок в продольном направлении авторами был разработан ВЧ-кикер (рис. 1). Он является объемным цилиндрическим резонатором с расположенными внутри электродами. Электроды развернуты на 90 градусов относительно друг друга для создания равномерного распределение электромагнитного поля вокруг оси устройства. Кикер имеет два входа и два выхода, образованных коаксиально-Π-волноводными переходами. Устройство работает на волне TM_{010} .

К ВЧ-кикеру предъявляются достаточно жесткие требования на рабочую частоту, рабочую полосу частот и напряжение, создаваемое на зазоре между двумя электродами. Частотные характеристики определяются условиями подавления всех связанных мод продольных колебаний электронных сгустков. Согласно теории устойчивости связанных колебаний сгруппированных пучков, частоты всех связанных мод укладываются в диапазоне от $pM\omega_0$ до $(p + 1/2)M\omega_0$, где p — любое

целое число, M — максимально возможное число сгустков в пучке, ω_0 — частота обращения сгустков [2]. Рабочая частота кикера задается в середине этого диапазона и равна $(p + 1/4)M\omega_0$. Рабочая полоса частот равна ширине этого диапазона, то есть половине рабочей частоты ВЧ-системы ускорителя. ВЧ-система ускорителя работает на 75-ой гармонике частоты обращения сгустков электронов, частота обращения одного сгустка составляет 2,415 МГц.

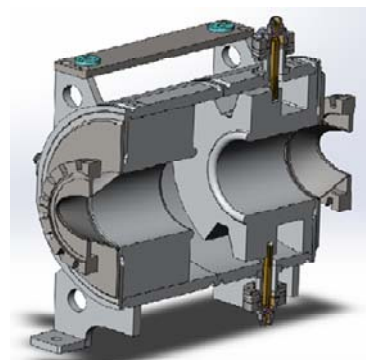


Рис. 1. ВЧ-кикер системы подавления продольных колебаний пучка

Напомним, что в накопителе «Сибирь-2» максимальное количество сгустков составляет 75. Число $p = 5$ выбрано из соображений обеспечения приемлемых геометрических размеров кикера и уменьшения спектра возбуждаемых в нем волн. Таким образом, для накопителя «Сибирь-2» частота кикера предполагается равной 950,9 МГц и рабочая полоса частот 90 МГц.

Нагруженная добротность устройства, исходя из выше приведенных частотных характеристик, приблизительно равна 10,6. Добиться такой низкой добротности и, следовательно, широкой рабочей полосы частот возможно благодаря особой конструкции кикера и схеме включения его в систему подавления. Обычно такое устройство имеет несколько входов и выходов, и чем шире рабочая полоса частот, тем их больше. На входы, связанные с одним из двух внутренних электродов, образующих ускоряющий (замедляющий) зазор, подается синфазно сигнал от ВЧ-усилителей. Оставшиеся выходы, подключенные ко второму электроду, нагружаются на согласованную нагрузку. Дополнительно отметим, что такая конструкция кикера и схема его включения обусловлены требованием значительного подавления полей, возбуждаемых в данном устройстве ВЧ-усилителем и сгустком электронов, к моменту влета следующего сгустка.

Эффективность подавления продольных колебаний сгустков также зависит от амплитуды напряжения, создаваемого на межэлектродном зазоре кикера. Напряжение задается мощностью P ,

поступающей от ВЧ-усилителей, и эффективным шунтовым импедансом кикера R_{sh} : $U_{kick} = \sqrt{2P \cdot R_{sh}}$. Оценка эффективного шунтового импеданса кикера осуществляется по формуле [3]:

$R_{sh} = \left(\left| \int_0^l E_z(z) \exp(-i\beta z) dz \right| \right)^2 / 2P_{loss}$, где P_{loss} — мощность потерь в стенках резонатора, $E_z(z)$ — амплитуда продольной составляющей напряженности электрического поля на оси устройства, β — волновое число. Оценка мощности ВЧ-усилителей приводится в статье [4]. Немного повысить амплитуду напряжения на зазоре устройства позволяют выступы, расположенные на электродах и направленные к центру зазора.

Электродинамический расчет кикера был проведен в программе трехмерного моделирования СВЧ-устройств. При расчете с учетом конструкции вводов мощности рабочая частота устройства составила 951,2 МГц, рабочая полоса частот — 89,2 МГц. Эффективное шунтовое сопротивление равно 760 Ом.

Специально для ВЧ-кикера был разработан высоковакуумный ввод мощности (рис. 1). Это устройство является высоковакуумным переходным адаптером коаксиального типа с разъемом N-типа под кабель. Контакт с электродами кикера осуществляется за счет центрального проводника с цанговым окончанием. Диэлектрик из оксида алюминия отделяет высоковакуумную часть устройства от атмосферы. Корпус переходного адаптера выполнен из сплава Ковар, центральный проводник из меди, для улучшения электропроводности внутренние поверхности ввода мощности покрыты золотом. Отметим, что сам кикер изготовлен из алюминия.

Измерения рабочих характеристик ВЧ-кикера

Готовое устройство было установлено в кольце накопителя «Сибирь-2», после чего были проведены измерения частотных характеристик ВЧ-кикера. В качестве измерительного устройства и задающего генератора использовался широкополосный (до 6 ГГц) анализатор спектра FSH6 (Rohde&Schwarz). Данный анализатор спектра имеет следящий генератор (100 мВт) и позволяет проводить измерение передаточной характеристики и коэффициента отражения в любом выбранном рабочем диапазоне частот. Дополнительно использовались кабели равной длины с волновым сопротивлением 50 Ом, резистивный сплитер и нагрузки в 50 Ом.

Результаты измерения ВЧ-кикера, включенного по схеме на рис. 2, показали хорошее соответствие частотных характеристик изготовленного устройства расчетным данным. Измеренная рабочая частота кикера составила 954,7 МГц и полоса рабочих частот равна 104,7 МГц (рис. 3).

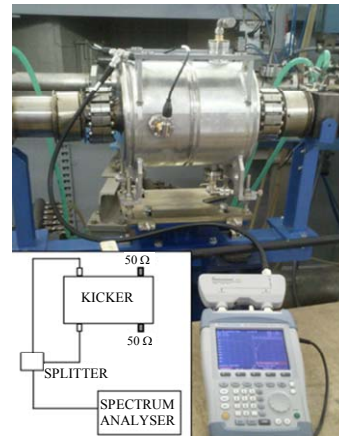


Рис. 2. Схема измерений ВЧ-кикера

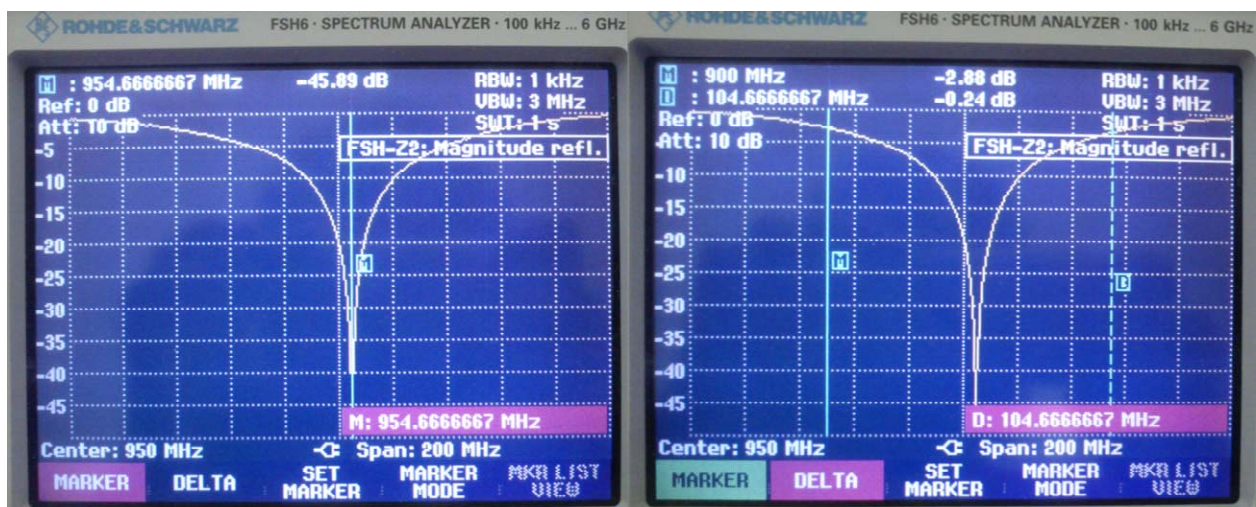


Рис. 3. Измеренные частотные характеристики ВЧ-кикера

Также представляет интерес сигнал, который формируется на выходах кикера при пролете через него сгустков электронов. По форме сигнала и его временным характеристикам можно судить о правильности расчета кикера, кроме того, наблюдать нестабильность колебаний сгустков. Для этого свободный конец кабеля, идущего от одного из входов устройства к ВЧ-усилителю, был подключен к цифровому осциллографу DPO70604В фирмы Tektronix, работающему в диапазоне частот до 6 ГГц. Оставшиеся выходы кикера были нагружены на согласованную нагрузку. В накопитель «Сибирь-2» на энергии 450 МэВ были инжектированы последовательно пять сгустков. Ток пучка

составил 11,3 мА. Измеренная при этих условиях осциллограмма представлена на рис. 4. На ней хорошо видно, что стабильность сохраняет только первый сгусток, сигнал от которого имеет четкие контуры.

Далее в процессе подъема энергии электронного пучка от 450 МэВ до 2,5 ГэВ амплитуда продольных колебаний сгустков стабилизируется. Это отражено на осциллограмме, представленной на рис. 5. Более того, на осциллограмме видно, что к приходу следующего сгустка сигнал от предыдущего в значительной степени затухает. Это также служит подтверждением соответствия готового устройства требуемым параметрам.



Рис. 4. Последовательность из пяти сгустков при энергии 450 МэВ



Рис. 5. Последовательность из пяти сгустков при энергии 2,5 ГэВ

Заключение

Система подавления когерентных колебаний для накопителя «Сибирь-2» находится на стадии ввода в эксплуатацию. Мы надеемся, что на энергии инжекции система обратной связи поможет нам решить проблему частичной и полной потери пучка в процессе накопления и увеличить значение максимального накапливаемого тока электронов. А на рабочем уровне энергии 2,5 ГэВ позволит улучшить стабильность положения электронного пучка, а, значит, и пучков синхротронного излучения во времени и по координатам, что необходимо для работы пользователей на экспериментальных станциях. Более того, система даст возможность численно оценивать динамику электронного пучка:

рассчитывать времена затухания и развития колебаний, амплитуду колебаний каждого сгустка, выявлять неустойчивую моду колебаний и пр., что необходимо для дальнейшего улучшения потребительских качеств установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Valentinov A., Korchuganov V., Moseiko N., et al.* / Proc. ICALEPCS2013, 2013, THPPC128. P. 1359—1361.
2. *Chao A. Wu.* Physics of collective beam instabilities in high energy accelerators. — John Wiley & Sons Inc., 1993.
3. *Григорьев А. Д., Янкевич В. Б.* Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. Численные методы расчета и проектирования. — М.: Радио и связь, 1984.
4. *Smygacheva A., Vernov A., Korchuganov V.* / Proc. RUPAC2012, 2012, TUPPB035. P. 394—396.

The RF kicker cavity for the longitudinal feedback system of the SR source «Siberia-2»

A. S. Smygacheva, V. N. Korchuganov, Yu. F. Tarasov, and A. V. Vernov

National Research Center «Kurchatov Institute»
1 Akademika Kurchatova pl., Moscow, 123182, Russia
E-mail: presscentr@kiae.ru

Received February 3, 2015

The dedicated synchrotron radiation source «Siberia-2» is operated in the NRC «Kurchatov Institute». To improve consumer qualities of the facility the feedback system for dumping electron beam coherent oscillations was installed at the storage ring. Important part of this system is a device, which impacts beam due to electromagnetic fields. The basic points of the development of this device, so-called the RF kicker cavity, and measurement results are present in the article.

PACS: 29.27.Bd

Keywords: electron storage ring, feedback system, RF kicker cavity, coherent instabilities, longitudinal beam dynamics.

REFERENCES

1. A. Valentinov, V. Korchuganov, N. Moseiko, et al. in Proc. ICALEPCS2013 (2013, THPPC128), p. 1359—1361.
2. A. Wu Chao, *Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators* (John Wiley & Sons Inc., 1993).
3. A. D. Grigor'ev and V. E. Yankevich, *Resonators and Microwave Resonator Decelerating Systems* (Radio Svyaz', Moscow, 1984) [in Russian].
4. A. Smygacheva, A. Vernov, and V. Korchuganov, in Proc. RUPAC2012 (2012, TUPPB035), p. 394—396.