

УДК 621.384.634

СИСТЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПУЧКА В СОВРЕМЕННЫХ СИНХРОТРОНАХ

*В. М. Жабицкий*¹

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Для предотвращения развития поперечных неустойчивостей и для демпфирования остаточных колебаний пучка после инжекции в современных синхротронах используются системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка. Приводятся данные по проектам систем подавления для сооружаемого коллайдера LHC (CERN, Женева) и для проектируемого ускорительного комплекса FAIR (GSI, Дармштадт). Проект для LHC выполняется в Лаборатории физики частиц ОИЯИ совместно с CERN. Приводятся данные о состоянии дел и планы по завершению проекта на LHC. Представлены результаты первых проектных работ по системам подавления поперечных колебаний пучка на синхротронах SIS100 и SIS300, которые будут создаваться в рамках нового международного проекта FAIR.

Transverse damping systems for suppression of transverse beam instabilities and for damping of residual oscillations of a beam after injection are used in modern synchrotrons. Damper systems for the LHC (CERN, Geneva) and for the accelerating complex FAIR (GSI, Darmstadt) are considered. The LHC Damper project is carried out at the Laboratory of Particle Physics (JINR) together with CERN. Status of the project and plans for its completion are presented. Results of the first design works on damper systems in SIS100 and SIS300 synchrotrons, which will be created within the framework of the new international project FAIR, are discussed.

ВВЕДЕНИЕ

Системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка (СП) в современных синхротронах используются для предотвращения развития поперечных неустойчивостей и для демпфирования остаточных колебаний пучка после инжекции. Как правило, эти системы строятся по одноканальной схеме и в них применяются активные способы воздействия на пучок в соответствии с его состоянием в предшествующие моменты времени [1, 2]. Для этого в СП (см. рис. 1) в каждом из поперечных направлений колебаний частиц для измерения отклонения пучка от равновесной орбиты используется датчик положения центра тяжести пучка (ДП), а для изменения угла наклона траектории — дипольный отклоняющий дефлектор-толкатель (ДК). ДП и ДК соединены цепью обратной связи (ЦОС), в состав которой включены усилители, фильтры, блок задержек и другие радиотехнические элементы. Сигнал с ДП по кабельным линиям передается навстречу движению пучка в электронные блоки ЦОС, здесь проводится его обработка, он усиливается и передается с задержкой τ на дефлектор ДК, осуществляющий коррекцию поперечного импульса той же группы частиц, которые инициировали сигнал в ДП.

¹E-mail: V.Zhabitsky@jinr.ru

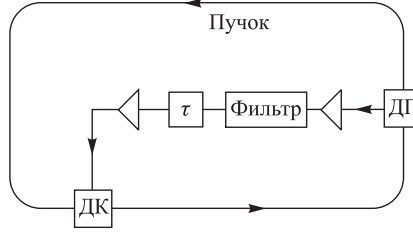


Рис. 1. Схема системы подавления поперечных когерентных колебаний

Пусть передаточная функция ЦОС $f(x[n, s])$ является линейной функцией отклонений пучка $x[n, s]$ от равновесной орбиты в точке s на n -м обороте. В этом случае величина удара $\Delta x'[n, s_K]$ в дефлекторе ДК прямо пропорциональна смещению центра тяжести сгустка от равновесной орбиты $x[n, s_P]$ в месте расположения датчика положения ДП:

$$\sqrt{\beta_P \beta_K} \Delta x'[n, s_K] = g f(x[n, s_P]) = g x[n, s_P]. \quad (1)$$

Здесь β_P и β_K — значения β -функций магнитной системы синхротрона в местах расположения ДП и ДК; g — коэффициент передачи ЦОС. При оптимальном расположении ДП и ДК, когда набег фазы бетатронных колебаний между ними ψ_{PK} равен нечетному числу $\pi/2$ радиан, амплитуда поперечных когерентных колебаний затухает с декрементом $g/2$ [2]. Для предотвращения развития когерентных поперечных неустойчивостей необходимо, чтобы декремент затухания колебаний превосходил инкремент неустойчивости:

$$\frac{T_{\text{rev}}}{\tau_d} = \frac{g}{2} > \frac{T_{\text{rev}}}{\tau_{\text{inst}}}, \quad (2)$$

где T_{rev} — период обращения частиц в ускорителе; τ_d — постоянная времени затухания колебаний пучка, обусловленная воздействием системы подавления; τ_{inst} — постоянная времени развития неустойчивости.

Для резистивной неустойчивости, возникающей при движении частиц в камере ускорителя с поперечным импедансом $Z_T(\omega)$, имеем [3, 4]:

$$\tau_{\text{inst}} = \frac{2C_0 mc^2 \gamma_r}{qI \beta_{\text{av}} \text{Re} Z_T(\omega)}, \quad (3)$$

где C_0 — периметр равновесной орбиты; $mc^2 \gamma_r$ — полная энергия частицы с зарядом q ; β_{av} — среднее значение β -функции; I — ток пучка:

$$I = qK_b N_b / T_{\text{rev}}. \quad (4)$$

Здесь K_b — число сгустков; N_b — число частиц в сгустке. Низшая частота развития резистивной неустойчивости есть

$$f_{\text{min}} = \frac{1}{2\pi} \omega_{\text{min}} = \min |k - Q| f_{\text{rev}}, \quad (5)$$

где Q — число бетатронных колебаний частицы за оборот; k — ближайшее целое к Q число; $f_{\text{rev}} = 1/T_{\text{rev}}$ — частота обращения частиц в ускорителе. Типичная зависимость

действительной части поперечного импеданса Z_T от частоты, вычисленная в соответствии с формулой для $\text{Re } Z_T(\omega)$ из [3], приведена на рис. 2. Для высокочастотных мод когерентных колебаний, электромагнитные поля которых экранируются металлическими стенками вакуумной камеры, $\text{Re } Z_T \sim 1/\sqrt{\omega}$. Однако для низкочастотных мод эти поля проникают сквозь стенки камеры и $\text{Re } Z_T \sim 1/\omega$. Поэтому резистивные неустойчивости особенно опасны для больших ускорителей, в которых минимальная частота неустойчивости ниже 10 кГц.

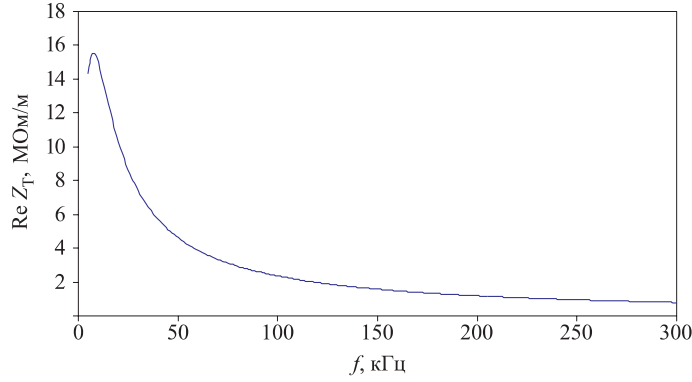


Рис. 2. Зависимость действительной части поперечного импеданса от частоты

Величина превышения декремента затухания колебаний над инкрементом неустойчивости может быть определена из данных о росте эмиттанса пучка после подавления остаточных когерентных колебаний частиц после инжекции. В [5] показано, что этот рост эмиттанса обусловлен процессами перехода когерентных колебаний пучка в некогерентные вследствие разброса частиц в пучке по частотам бетатронных колебаний и равен

$$\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} = \frac{e_{inj}^2}{2\sigma^2} \left(1 + \frac{\tau_{dec}}{\tau_d} - \frac{\tau_{dec}}{\tau_{inst}} \right)^{-2}, \quad (6)$$

где σ — среднеквадратичный размер инжектируемого пучка с эмиттансом ϵ ; τ_{dec} — постоянная времени перехода когерентных колебаний в некогерентные. В (6) принято, что в точке инжекции амплитуда когерентного колебания пучка равна e_{inj} , а β -функция постоянна: $\beta'(s_{inj}) = 0$. Таким образом, для заданного допуска роста эмиттанса пучка $\Delta\epsilon/\epsilon$ и значений τ_{inst} и τ_{dec} из (6) можно вычислить τ_d и, учитывая (2), g .

Зная величину максимальных колебаний пучка после инжекции e_{inj} и коэффициент передачи ЦОС g , нетрудно получить из (1) максимальный угол отклонения пучка в дефлекторе:

$$\theta_{max} = \frac{ge_{inj}}{\sqrt{\beta_P\beta_K}}. \quad (7)$$

Угол отклонения, в свою очередь, зависит от величин электрического и магнитного поля в дефлекторе:

$$\int_0^{l_k} (E_{\perp} + \beta_{rc}B_{\perp}) ds = \frac{ge_{inj}}{\sqrt{\beta_P\beta_K}} \frac{m\gamma_r\beta_r^2 c^2}{q}, \quad (8)$$

где β_{rc} — скорость частицы.

1. СИСТЕМА ПОДАВЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПУЧКА В ЛНС

Для системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка в ЛНС [6] выбрана величина $\tau_d = 40 T_{\text{rev}}$. График зависимости роста эмиттанса $\Delta\epsilon/\epsilon$ от τ_{inst} приведен на рис. 3. При расчете этой зависимости учитывалось, что $\tau_{\text{dec}} = 750 T_{\text{rev}}$. Амплитуда когерентных колебаний пучка после инжекции e_{inj} равна 4 мм и складывается поровну из величин, связанных с неоднородностью поля инжекционного ударного магнита и с несогласованностью выводного ведущего магнитного поля SPS и ведущего магнитного поля в ЛНС в момент инжекции. Среднеквадратичный размер инжектируемого пучка σ соответствует нормализованному эмиттансу пучка $\epsilon_{n0} = 3,5$ мкм ($\gamma_r = 479,6$, $\beta(s_{\text{inj}}) \approx 183$ м). Из рис. 3 вытекает, что при номинальной интенсивности пучка в ЛНС, когда $\tau_{\text{inst}} = 308 T_{\text{rev}}$, относительный рост эмиттанса $\Delta\epsilon/\epsilon$ равен 2 %. При предельной интенсивности пучка в ЛНС, когда $\tau_{\text{inst}} = 208 T_{\text{rev}}$, этот рост составляет 2,3 %. Для энергии протонов 450 ГэВ при инжекции и величин β -функций в местах расположения датчиков положения и дефлекторов $\beta_P = \beta_K = 100$ м имеем из (8) для электростатического дефлектора

$$U_K = \int_0^{l_K} E_{\perp} ds = 900 \text{ кВ.}$$

При использовании 4-х дефлекторов с длиной пластин $l_K = 1,5$ м и апертурой $d_K = 52$ мм расчетная величина U_K достигается при максимальном напряжении на пластинах 7,5 кВ.

Для системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка в ЛНС используется традиционная схема СП (см. рис. 1). Всего будет установлено 16 каналов СП. Оконечным устройством каждого канала является мощный широкополосный усилитель, нагруженный на дефлектор. Таким образом, в одном направлении поперечных колебаний пучка используются 4 дефлектора для каждого из двух встречных пучков. Блок-схема одного из каналов СП приведена на рис. 4. Подробное описание узлов СП приведено в [7]. Следует только отметить, что с учетом неравномерности частотной характеристики мощного широкополосного усилителя в области низших частот минимальная частота выбрана

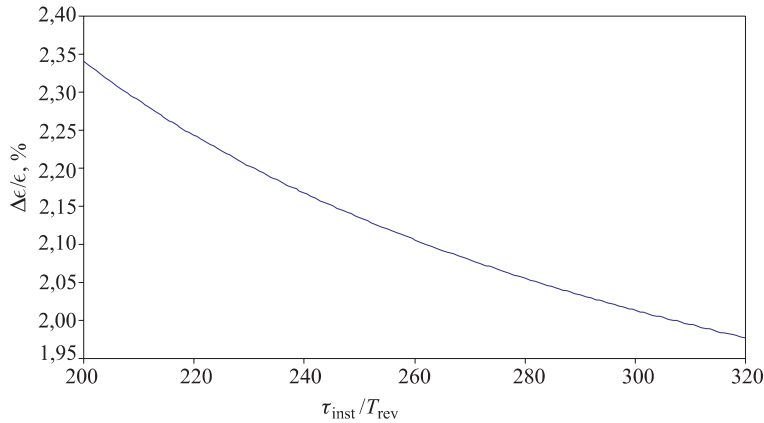


Рис. 3. Зависимость $\Delta\epsilon/\epsilon$ от $\tau_{\text{inst}}/T_{\text{rev}}$

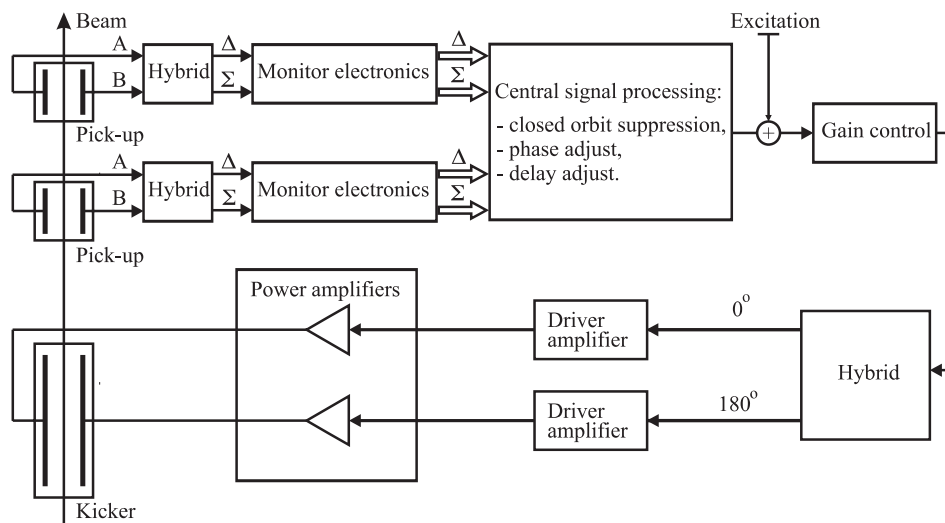


Рис. 4. Блок-схема одного канала системы подавления на LHC

равной 1 кГц, что с некоторым запасом обеспечивает линейность частотной характеристики на минимальной частоте неустойчивости ($f_{\min} \approx 3$ кГц; $f_{\text{rev}} = 11,245$ кГц). Мощные широкополосные усилители и deflectоры являются уникальным нестандартным оборудованием, они были спроектированы в Лаборатории физики частиц ОИЯИ совместно с отделом АВ-RF CERN. В настоящее время завершено изготовление всех deflectоров и завершаются работы по серийному производству усилителей. Запуск СП в туннеле LHC без пучка планируется начать в конце 2006 г.

2. О ПОДАВЛЕНИИ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПУЧКА В СИНХРОТРОНАХ SIS100 И SIS300

В рамках нового международного проекта FAIR (GSI) [8] ведутся работы по проектированию синхротронов SIS100 и SIS300, для которых специалистами Лаборатории физики частиц ОИЯИ подготовлено предложение по созданию систем подавления поперечных когерентных колебаний. Особенностью этих новых синхротронов является высокая интенсивность пучков ускоряемых частиц. Так, для протонного пучка при инжекции в SIS100 с энергией 2,78 ГэВ ожидается интенсивность $2,5 \cdot 10^{13}$ частиц, а для пучка ионов урана $^{238}\text{U}^{28+}$ с энергией 92 МэВ/нуклон — $1 \cdot 10^{12}$ частиц [9]. Из (3) следует, что для таких параметров инжектируемых пучков наибольший инкремент неустойчивости следует ожидать при инжекции ионов $^{238}\text{U}^{28+}$ в SIS100. Поэтому далее основное внимание будет уделено системе подавления поперечных когерентных колебаний пучка ионов урана в SIS100.

Следует отметить, что синхротрон SIS100 является быстроциклирующим ускорителем. Поэтому для уменьшения токов Фуко, возбуждаемых магнитной системой синхротрона, предполагается использовать тонкостенную вакуумную камеру из нержавеющей

стали. Поскольку минимальная частота поперечной неустойчивости в соответствии с (5) составит около 15 кГц, то при толщине стенок камеры менее 0,3 мм магнитное поле, соответствующее поперечным когерентным колебаниям пучка на этой частоте, будет проникать сквозь стенки вакуумной камеры, что приводит к росту поперечного импеданса. С другой стороны, предсказывается развитие поперечной неустойчивости на высоких частотах, вплоть до 20 МГц. Поэтому с учетом неравномерности частотной характеристики мощного широкополосного усилителя в области низших частот предполагается обеспечить работоспособность системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка в SIS100 в области частот от 10 кГц до 20 МГц.

Для системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка в SIS100 используется традиционная схема СП (см. рис. 1). Предполагается использовать для SIS100 систему подавления колебаний с темпом, соответствующим $\tau_d = 40T_{\text{rev}}$, что приводит к относительному росту эмиттанса $\Delta\epsilon/\epsilon = 1,3\%$ при величине ошибок при инжекции пучка ионов урана 6 мм ($\beta_{\text{inj}} = 19,1$ м; $\sigma = 18$ мм). Эти параметры СП могут быть обеспечены с помощью электростатического дефлектора с максимальным напряжением на пластине $U_K = 2,4$ кВ при длине пластин $l_K = 1$ м и апертуре $d_K = 100$ мм, если величина β -функций в местах расположения датчика положения и дефлектора равна 19,1 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание системы подавления поперечных колебаний пучка в рамках проекта по сооружению ЛНС находится в завершающей стадии. Один из последних замыслов В. П. Саранцева, реализация которого была начата вместе с И. Н. Ивановым, его коллегой в течение 35 лет, близок к воплощению. Эти работы также стали основой для разработки систем подавления поперечных колебаний пучка на синхротронах SIS100 и SIS300, которые будут создаваться в рамках нового международного проекта FAIR. Проекты систем подавления поперечных колебаний пучка сегодня реализуют сотрудники, многие из которых не один десяток лет работали в тесном контакте с В. П. Саранцевым и хорошо помнят о его подходах к решению поставленных задач.

Владислав Павлович всегда стремился проникнуть в существо решаемой проблемы, заряжая при этом всех своей убежденностью в возможности ее воплощения. Он имел обширные знания по теоретическим аспектам решаемых проблем в области ускорительной техники, поразительными знаниями деталей их экспериментальной реализации; он удивительно легко вычленил главный аспект решаемой задачи, требуя ясного и качественного ее объяснения — на базе простых и легко воспринимаемых теоретических выкладок. Регулярные оперативки между сменами на модели коллективного ускорителя, участником которых мне довелось быть, всегда сопровождались обсуждением деталей вопросов по динамике пучка в различных системах. В ходе этих обсуждений В. П. Саранцев с мелом в руке у доски напористо отстаивал свое видение проблемы. В то же время он обладал поразительным умением понять быстрее собеседника всю глубину возникающих идей, что завораживало и было фантастическим по силе воздействия на окружающих. Это качество, несомненно, присуще только великим ученым. Владислав Павлович обладал этим даром.

Благодарности. Автор выражает благодарности всем коллегам-участникам работ по созданию систем подавления поперечных когерентных колебаний пучка на синхротронах CERN и GSI, в особенности Н. И. Лебедеву (ОИЯИ), В. Хёфле и Т. Линнекеру (CERN), У. Беллелу и П. Шпиллеру (GSI) за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vos L.* Damping of Coherent Oscillations // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 391. P. 56–63.
2. *Zhabitsky V. M., Korenev I. L., Yudin L. A.* Transverse Feedback System with Digital Filter // Proc. of PAC'1993, Washington, USA, May 17–20, 1993; IEEE. 1993. P. 2543–2545; <http://www.JACoW.org>
3. *Балбеков В. И.* Эффекты пространственного заряда в УНК // Тр. IX Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 16–18 окт. 1984 г. Дубна, 1985. Т. 2. С. 360–367.
4. *Zotter B., Sacherer F.* Transverse Instabilities of Relativistic Particle Beams in Accelerators and Storage Rings // Theoretical Aspects of Behaviour of Beams in Accelerators and Storage Rings. CERN 77-13. Geneva, 1977. P. 175–218.
5. *Vos L.* Transverse Emittance Blow-up from Double Errors in Proton Machines // Proc. of EPAC'98, Stockholm, Sweden, June 22–26, 1998. IOP Publ. Ltd., 1998. P. 1365–1367; <http://www.JACoW.org>
6. The LHC Design Report. V. I. Ch. 6, Sec. 6.4: Transverse Damping and Feedback System (ADT). Ch. 5, Subsec. 5.5.1: Emittance growth caused by transverse injection oscillations. CERN. 2004.
7. *Gorbachev E. et al.* Transverse Damping Systems for the Future CERN LHC // Proc. of PAC'2001, Chicago, USA, June 18–22, 2001; IEEE. 2001. P. 1237–1239; <http://www.JACoW.org>
8. *Henning W. F.* FAIR — An International Accelerator Facility for Research with Ions and Antiprotons // Proc. of EPAC'04, Lucerne, Switzerland, July 5–9, 2004. EPS-AG, 2004. P. 50–53; <http://www.JACoW.org>
9. *Spiller P.* Challenges and Progress in the FAIR Accelerator Project // Proc. of PAC'2005, Knoxville, USA, May 16–20, 2005; IEEE. 2005. P. 294–298; <http://www.JACoW.org>