

Система обратной связи для подавления быстрой head-tail неустойчивости в ВЭПП-4М

А.М.Зеленин, Н.И. Зиневич, М.М.Карлинер, В.А.Киселев, А.С.Медведко, В.В.Смалюк
Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

Введение

Наиболее принципиальным фактором, ограничивающим ток в ВЭПП-4М в настоящее время, является вертикальная fast head-tail неустойчивость. Сброс пучка наблюдается обычно спустя несколько десятков миллисекунд после инжекции, пороговый ток при этом составляет $10 \div 12$ мА.

Fast head-tail неустойчивость имеет место, когда частота моды 0 (поперечное когерентное дипольное движение) становится равной вследствие когерентного сдвига, вносимого элементами накопителя, частоте моды -1 [1]. С целью повышения порога неустойчивости обычно предлагается введением реактивной обратной связи компенсировать изменение когерентного сдвига моды 0. Однако, как следует из экспериментов [1], неожиданно оказалось, что введение чисто активной отрицательной обратной связи увеличивает пороговый ток до существенно больших значений.

Этот эффект можно понять, если найти собственные моды колебаний частиц в сгустке. Как показано в [2], вблизи порога неустойчивости эти моды приблизительно одинаковы, имеют близкие собственные частоты, а также каждая мода имеет приблизительно равные амплитуды дипольной и квадрупольной составляющих. При включении отрицательной активной обратной связи извлекается энергия из возбуждаемых head-tail взаимодействием собственных мод колебаний частиц в сгустке через дипольную степень свободы и подавляется, таким образом, неустойчивость.

Некоторые параметры накопителя ВЭПП-4М: частота обращения $F_{rev} — 0,82$ МГц, частота ускоряющего напряжения $F_{rf} — 222 \cdot F_{rev}$, время радиационного затухания на инжекции — $35 \div 60$ мсек, длина сгустка — 20 см, дробная часть относительной частоты вертикальных колебаний — 0,57, относительная частота синхротронных колебаний — 0,018.

1. Анализ мод в двухчастичной модели

В данном анализе мы следовали в основном А.В.Чао [2]. Предположим, что электронный пучок состоит из двух частиц, колеблющихся в сепаратрисе в противофазе по синхротронным колебаниям. Тогда будем считать y_1 и y_2 комплексными амплитудами бетатронных колебаний 1- и 2-й частиц.

В первой половине периода синхротронных колебаний первая частица является ведущей и возбуждает поперечные колебания второй частицы благодаря наведенным электромагнитным полям. Так как имеет место резонансная раскачка, то комплексная амплитуда второй частицы меняется за время t как

$$y_2(t) = y_2(0) \cdot e^{j\omega t} - j \cdot W \cdot t \cdot y_1(0) \cdot e^{j\omega t}.$$

Здесь W — фактор, определяемый электромагнитным полем, наведенным в окружающей структуре первой частицей.

Спустя первую половину периода синхротронных колебаний $T_s/2$, комплексные амплитуды колебаний преобразуются (в матричной форме) следующим образом:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}_{t=T_s/2} = e^{j \cdot w_s \cdot \frac{T_s}{2}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -j\eta & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}_{t=0}, \quad \eta = W \cdot T_s/2.$$

Через второй полупериод синхротронных колебаний частицы меняются местами, и преобразование будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}_{t=T_s} = e^{j \cdot w_s \cdot \frac{T_s}{2}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -j\eta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}_{t=T_s/2}.$$

Спустя целый период, мы имеем

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}_{t=T_s} &= e^{j \cdot w_s \cdot T_s} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -j\eta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -j\eta & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}_{t=0} = \\ &= \begin{pmatrix} 1 - \eta^2 - \lambda & -j\eta \\ -j\eta & 1 - \lambda \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}_{t=0}. \end{aligned}$$

Устойчивость определяется собственными значениями матрицы преобразования. Последние являются корнями уравнения $\lambda^2 - 2 \cdot (1 - 1/2 \cdot \eta^2) \cdot \lambda + 1 = 0$.

Корни этого уравнения есть $\lambda_{1,2} = 1 - 1/2 \cdot \eta^2 \pm j \cdot \eta \cdot \sqrt{1 - 1/4 \cdot \eta^2}$. Собственные значения имеют следующие свойства. Во-первых, их произведение равно единице $\lambda_1 \cdot \lambda_2 = 1$. Во-вторых, $|\lambda_{1,2}| = 1$ при $1 - 1/4 \cdot \eta^2 \geq 0$, то есть $\eta \leq 2$. При $\eta > 2$ модуль одного из собственных значений становится больше единицы, например, $|\lambda_1| > 1$ и имеет место неустойчивость типа "сильный head-tail effect". Для проектирования обратной связи для подавления этого эффекта полезно найти собственные моды, представляющие определенные соотношения комплексных амплитуд бетатронных колебаний двух частиц. Собственные моды удовлетворяют системе линейных уравнений

$$(1 - \eta^2 - \lambda) \cdot y_1 - j \cdot \eta \cdot y_2 = 0, \quad -j \cdot \eta \cdot y_1 - (1 - \lambda) \cdot y_2 = 0.$$

Эта система имеет нетривиальное решение, если λ — собственное значение. При этом определяется отношение переменных y_1 и y_2 :

$$y_1 = \frac{\lambda_{1,2} - 1}{j\eta} \cdot y_2.$$

Подставляя сюда собственные значения, получаем $y_1 = (1/2 \cdot j\eta \pm \sqrt{1 - 1/4 \cdot \eta^2}) \cdot y_2$.

Выражение в скобках обладает следующими свойствами. Ниже порога неустойчивости ($\eta < 2$) его модуль равен единице, то есть амплитуды колебаний сгустков равны. При $\eta > 0$ сгустки колеблются в фазе или в противофазе. При $0 < \eta < 2$ сдвиг фаз постепенно изменяется, и при $\eta = 2$ обе моды сливаются в одну, при этом сдвиг фаз между сгустками равен $\pi/2$. При дальнейшем увеличении η сдвиг фазы в модах равен, по-прежнему, $\pi/2$, но колебания одной из мод нарастают, а другой — убывают. Из этого следует, что вблизи порога неустойчивости центр тяжести пучка совершает колебания, которые могут быть восприняты пикапом и использованы для обратного воздействия на пучок для подавления неустойчивости.

2. Описание системы

Обратная связь (рис. 1) осуществляется по вертикальным дипольным колебаниям пучка.

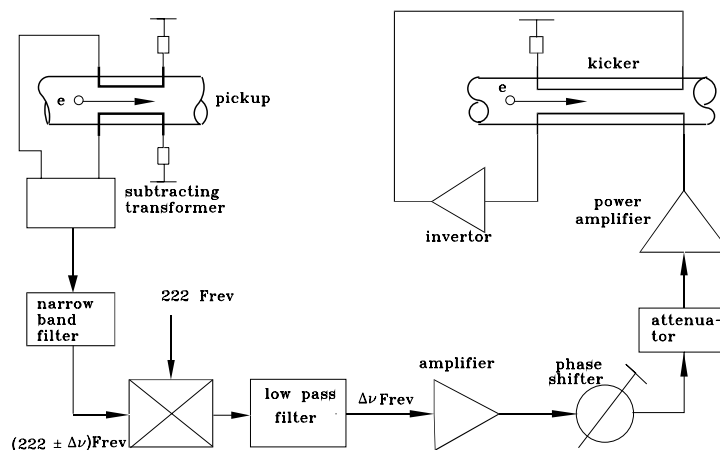


Рис. 1: Блок-схема системы обратной связи.

В качестве датчика поперечных колебаний используются 50-омные полосковые линии, что позволяет разделить сигналы электронного и позитронного сгустков. Длина полосковых линий выбрана такой, что их чувствительность максимальна в области частот $150 \div 250$ МГц.

Предлагаемая система выполнена избирательной с преобразованием частоты. Предварительная обработка сигналов ведется на частотах $(222 \pm \Delta\nu) \cdot F_{rev}$ вблизи максимума чувствительности датчика, а формирование частотной характеристики и питание кикера на низкой частоте $\Delta\nu \cdot F_{rev}$. Разностный сигнал с выхода трансформатора поступает на избирательный фильтр, настроенный на частоту $222 \cdot F_{rev}$ и далее на преобразователь частоты. Гетеродинным напряжением для преобразователя служит сигнал от ускоряющей системы ($F_{rf} = 222 \cdot F_{rev}$). В низкочастотной части система обратной связи содержит фильтр с полосой $0 \div 0,5 \cdot F_{rev}$, предварительный усилитель, фазовращатель, переменный аттенюатор и усилитель мощности. Регулировка фазы осуществляется в диапазоне $0 \div 2\pi$, что позволяет реализовать как активный, так и реактивный режим работы обратной связи.

В качестве кикера применяется пара диаметрально противоположных 50-омных согласованных полосковых линий, соединенных последовательно через инвертирующий трансформатор. Максимальное напряжение между пластинами ограничивается мощностью выходного усилителя и составляет 400 В.

3. Экспериментальные результаты

Конечный динамический диапазон системы обратной связи ограничивает декремент на инжекции, где амплитуда колебаний сгустка из-за ошибок системы впуска, достаточно большая. В нашем случае при токе 10 мА эта величина была равна

приблизительно $0,02 \cdot Frev$ и могла быть увеличена до $0,06 \cdot Frev$ для малых амплитуд колебаний. Соответствующий этим двум режимам когерентный сдвиг, вносимый обратной связью, имел в 2π раз меньшие значения.

Собственный когерентный сдвиг, обусловленный взаимодействием сгустка с элементами накопителя, при том же токе составлял $0,012 \cdot Frev$. Эта величина больше той, что могла обеспечить обратная связь, поэтому компенсировать собственный когерентный сдвиг, особенно на инжекции, в наших экспериментах не удалось.

На рис.2 представлена зависимость тока, захваченного в ВЭПП-4М от фазы цепи обратной связи. Чисто активной отрицательной обратной связи соответствует фаза равная 0, чисто реактивной — $\pm 90^\circ$.

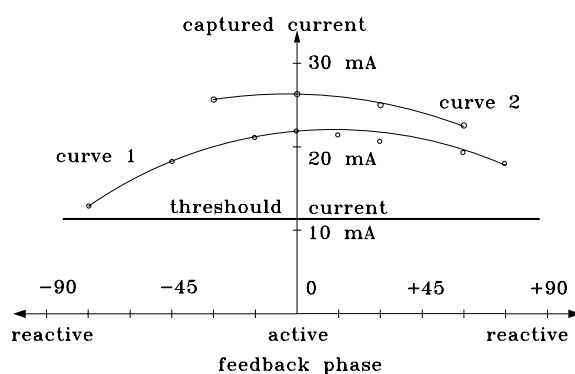


Рис. 2: Зависимость величины захваченного тока от фазы обратной связи.

Видно, что максимальный захваченный ток (приблизительно в 2,5 раза больше порогового тока) достигается при нулевой фазе и уменьшается при приближении фазы к $\pm 90^\circ$. При получении экспериментальных точек при каждом значении фазы коэффициент передачи в цепи обратной связи подбирался таким, чтобы обеспечить максимум захваченного тока. Следует отметить, что максимальный захваченный ток в нашем случае ограничивался не возможностями обратной связи, а максимальным током инжектируемого сгустка.

Приведенные результаты свидетельствуют об эффективности активной обратной связи в борьбе с fast head-tail неустойчивостью и могут быть использованы при создании аналогичных систем на других установках.

Список литературы

- [1] S.Myers. "Stabilization of fast head-tail instability by feedback". Proc. of IEEE Particle Accelerators 1987.
- [2] A.Chao. SLAC-PUB-2946, June 1982.