

Некоторые аспекты использования метода фазового смещения для улучшения временной структуры пучка медленного вывода на ускорителе ИФВЭ

А.В. Максимов

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

Одним из основных параметров, характеризующих качество пучка на медленном выводе, является величина модуляции интенсивности во время вывода (временная структура). Источником такой модуляции являются пульсации токов магнитных элементов, ответственных за медленный вывод. За последние годы на ускорителе ИФВЭ достигнут значительный прогресс по уменьшению пульсаций в магнитных элементах (квадрупольная линза наведения пучка на резонанс, секступольные линзы), а также в системах коррекций градиента и квадратичной нелинейности. Наличие станции перезахвата пучка на частоту ускорения в УНК ($f = 200$ МГц) открыло возможность использовать методы улучшения временной структуры пучка медленного вывода, успешно зарекомендовавшие себя на крупнейших ускорителях мира. Эксперименты, проведенные в 1994 г., показали, что можно значительно (в несколько раз) уменьшить низкочастотную модуляцию в выводимом пучке [1]. Данная статья посвящена анализу результатов.

Временная структура пучка медленного вывода на ускорителе ИФВЭ (современное состояние)

Медленный вывод на ускорителе ИФВЭ организован на резонансе третьего порядка $3Q_r = 29$, и наведение на резонанс осуществляется квадрупольной линзой. При импульсном разбросе $\Delta p/p \approx 0.002$ и хроматичности $\xi = -1.7$ скорости наведения пучка на резонанс по бетатронной частоте Q составляют примерно $\dot{Q}_o \approx 0.01 \div 0.035$ (эта величина меняется как в процессе вывода, так и в зависимости от уровня выводимой интенсивности) со средним значением $\dot{Q} \approx 0.025$. За величину, характеризующую качество пучка на медленном выводе, принимается величина отношения эффективного времени к длительности вывода T_s [2]

$$K_{\text{эф}} = \frac{(\int I(t)dt)^2}{T_s \int I^2(t)dt}, \quad (1)$$

где $I(t)$ — выводимая интенсивность. Это выражение может быть переписано в величинах модуляции бетатронной частоты, и тогда для коэффициента качества пучка $K_{\text{эф}} = T_{\text{эф}}/T_s$ имеем

$$K_{\text{эф}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \sum_{\omega} \left(\frac{\delta \dot{Q}_{\Sigma\omega}}{\dot{Q}_o} h_{\omega} \right)^2}, \quad (2)$$

где ω — частота модуляции; $\delta \dot{Q}_{\Sigma\omega}$ — модуляция скорости наведения на резонанс на частоте ω (определяется вкладом всех систем); h_{ω} — модуль передаточной функции пучка. На рис.1 приведен пример (кривая 1) спектрального разложения выводимой интенсивности на пучке медленного вывода ускорителя ИФВЭ, с характерным для средней выводимой интенсивности ($\approx 2 - 4 \cdot 10^{12}$ ppp) значением $K_{\text{эф}} \approx 0.75$.

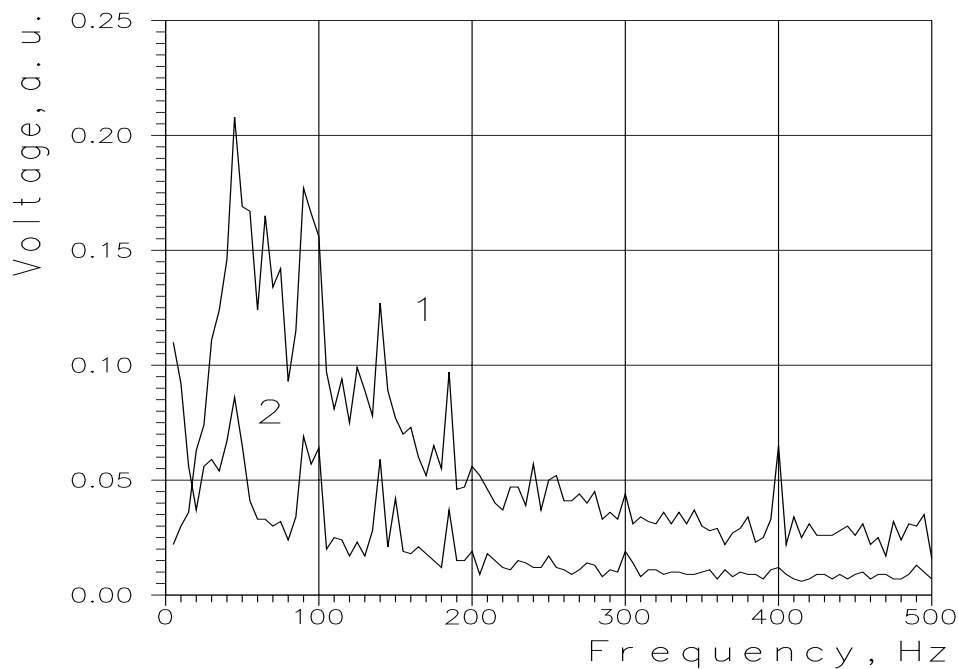


Рис. 1: Пример спектра выводимой интенсивности на пучке медленного вывода: 1 — стандартный режим вывода; 2 — спектр с использованием метода фазового смещения.

Анализ экспериментальных результатов по улучшению временной структуры

Как уже говорилось, в 1994 г. на ускорителе ИФВЭ были проведены эксперименты по использованию метода фазового смещения с целью уменьшения пульсаций на пучке медленного вывода. Теория данного метода описана в работе [2]. Результаты экспериментов, а также описание процедуры настройки, сообщались в работе [1]. На рис.1 представлен (кривая 2) спектр выводимой интенсивности при использовании метода фазового смещения. В этом режиме $K_{эф}$ составил ≈ 0.97 , таким образом, общий коэффициент подавления пульсаций в выводимом пучке (во всем спектре частот) составил ≈ 3.4 . Как известно, теоретическая оценка для коэффициента подавления модуляции скорости наведения на резонанс следующая [2]:

$$K = \sqrt{\frac{\pi}{|\sin\varphi_s|}}; \quad |\sin\varphi_s| = \frac{2\pi R d(B\rho)}{V dt}, \quad (3)$$

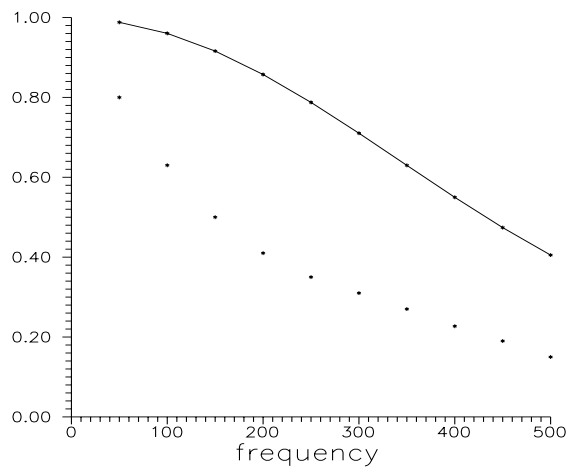
где R, ρ — радиусы ускорителя, соответственно средний и ускорения; B — ведущее поле; V — ВЧ-напряжение. Для медленного вывода ИФВЭ были приняты следующие величины: $V = 300$ кВ, $\dot{B} \approx 20$ Э/с. При этом формула (3) дает $K \approx 40$. Формула (3) справедлива для нулевого значения горизонтального эмиттанса пучка.

Для правильной оценки величины подавления пульсаций в выводимом пучке, необходимо учесть следующие моменты:

1. Ширина резонанса по $\frac{\Delta p}{p}$ вследствие зависимости резонансной расстройки от амплитуды составляет $\approx 0.45 \cdot 10^{-3}$. При выбранном рабочем напряжении коэффициент подавления для всего эмиттанса незначительно отличается от расчетного для нулевого эмиттанса и составляет примерно 37.

2. В условиях, когда существенно вырастает скорость прохождения резонанса, меняется также и передаточная функция пучка. На рис.2 приведено сравнение передаточных функций в стандартном режиме вывода и в режиме с использованием метода фазового смещения. Для стандартного режима вывода взята экспериментальная кривая из работы [3], для оценок по режиму с использованием метода фазового смещения — расчетная кривая (описание методики расчета будет приведено в работе, которая готовится к печати. Для стандартного вывода соответствие расчетов с экспериментом очень хорошее). Видно, что в спектре частот до 500 Гц имеет место увеличение модуля передаточной функции примерно в 1.8 раза.

Рис. 2: Расчетная (—) и экспериментальная (*) амплитудно-частотные функции пучка при выводе на резонансе третьего для пучка медленного вывода ускорителя ИФВЭ. Расчетная АЧФ получена в условиях быстрого прохождения резонанса при использовании метода фазового смещения.



Таким образом, общее теоретическое подавление в режиме использования метода фазового смещения должно составлять примерно ≈ 20 . Как уже отмечалось, общее подавление пульсаций в пучке составило ≈ 3.4 раза, но по частотам подавление сильно варьируется: на тех частотах, где модуляция определяется в основном пульсациями основного магнитного поля (а это частоты 46; 92; 140; 185 Гц), подавление составляет $2 \div 3$, на остальных частотах находится в пределах $4 \div 6$.

Исходная теория метода фазового смещения [2] никак не предполагает различия подавления по частотам. Собственные пульсации наводящего поля приводят к пульсациям коэффициента подавления (что не отражено в (3)) и, как следствие, к ограничению величины подавления. Действительно, первоначальная теория [2] предполагает, что K_0 не зависит от времени, но реально $K_0 \neq \text{const} = K(t)$ вследствие пульсаций магнитного поля, и поэтому $\dot{Q} = K(t)\dot{Q}_0 + \delta\dot{Q}_\omega$, где $K(t)\dot{Q}_0 \propto \sqrt{\dot{B}(t)}$, $\dot{B}(t) = \dot{B}_0 + \delta\dot{B}(t)$. Вместо (2) имеем

$$K_{эф} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\delta\dot{B}_\omega}{2\dot{B}_0} + \frac{\delta\dot{Q}_\omega}{K_0\dot{Q}_0}\right)^2}. \quad (4)$$

Видно, что даже при $K_0 \gg 1$ имеется минимальная величина пульсаций интенсивности на данной частоте равная $\frac{\dot{B}_\omega}{2\dot{B}_0}$. На рис.3 представлен спектр пульсаций напряжения на обмотках питания основного электромагнита (для ускорителя ИФВЭ

$\delta \dot{B}_\omega \approx 0.37V_\omega$). Таким образом, с учетом описанного выше эффекта, общее подавление, которое может дать метод фазового смещения для параметров ускорителя ИФВЭ, существенно меньше теоретического (3) и составляет ≈ 6.5 , при этом максимально возможный коэффициент качества структуры ≈ 0.992 .

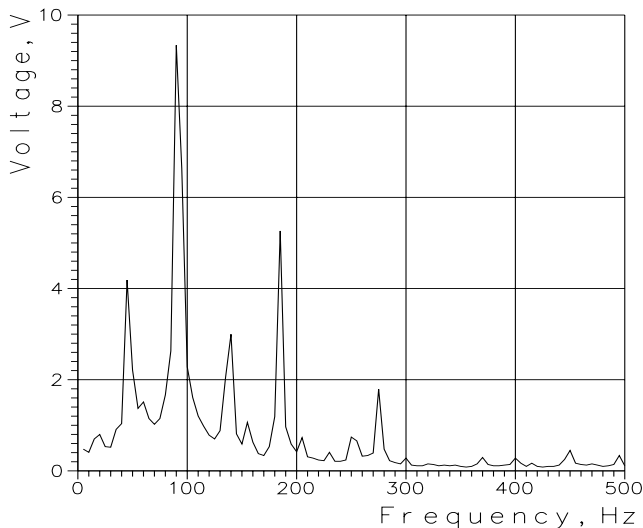


Рис. 3: Спектр пульсаций напряжения на обмотках питания кольцевого электромагнита ускорителя ИФВЭ.

Заключение

Представленный анализ экспериментальных данных по подавлению пульсаций в пучке медленного вывода с использованием метода фазового смещения на ускорителе ИФВЭ выявляет новые аспекты в использовании этого метода подавления пульсаций. Наличие пульсаций в основном магнитном поле (а равно как и в частоте ускоряющего поля) приводит как к ограничению общего коэффициента подавления пульсаций в выводимом пучке по всем частотам, так и к различным коэффициентам подавления на разных частотах.

Список литературы

- [1] Афонин А.Г. и др. Эксперименты по улучшению временной структуры пучка при медленном выводе из ускорителя ИФВЭ. В кн.: XIV Совецание по ускорителям заряженных частиц. Аннотации докладов — Протвино, 1994, с. 142.
- [2] Carpi R., Steinbach Ch. // CERN/PS/OP 80-10. Geneva, 1980.
- [3] Мызников К.П. В кн.: Труды 5-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. — Дубна, 1976, т. 2, с. 78.