

# Установка фаз и амплитуд в высокоэнергетической части линейного ускорителя Московской мезонной фабрики<sup>1</sup>

С.Ж.Жарылкапов, В.В.Кухтиев, А.В.Новиков, П.Н.Остроумов, И.Б.Рудаков  
*Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия*

При установке амплитуд и фаз в резонаторах высокоэнергетической части ускорителя используется так называемая  $\Delta T$ -процедура. Как известно, точность работы этой процедуры существенно падает при энергиях протонов выше 300 МэВ. В работе приводятся расчетно-экспериментальные исследования новой процедуры установки фаз и амплитуд ВЧ-поля, суть которой заключается в измерении разности фаз наведенных пучком гармонических сигналов при сканировании фазы ВЧ-поля в исследуемом резонаторе на 360 градусов и сравнении этой кривой сканирования с расчетной.

## Введение

Описывается методика нахождения и установки номинальной амплитуды и синхронной фазы на резонаторах линейного ускорителя Московской мезонной фабрики (ЛУ ММФ) для энергий пучка свыше 250 МэВ с использованием фазовой кривой сканирования. Фазовая кривая сканирования находится при сканировании фазы ВЧ-поля исследуемого резонатора в пределах  $360^\circ$  и измерении при этом разности фаз гармонических сигналов, наведенных пучком на датчиках третьей гармоники тока пучка на входе и выходе резонатора. Форма полученной при этом кривой, построенной по фазовым точкам (фаза ВЧ-поля – фаза сигнала), зависит уникальным образом от входной энергии пучка и амплитуды поля в резонаторе. Сравняя расчетные фазовые кривые с экспериментальной, находится кривая, ближайшая по форме к экспериментальной. Отклонение входной энергии и амплитуды поля в резонаторе, как и положение синхронной фазы, принимается равным соответствующим параметрам ближайшей расчетной кривой.

Идея сравнения фазовой кривой с теорией неоднократно обсуждалась в ИЯИ РАН [1,3] и в лаборатории SSC [2], однако впервые была реализована на линейном ускорителе Fermilab [4].

## 1. Схема измерений

На штатной аппаратуре ускорителя измерения разности фаз осуществлялись с помощью двух датчиков третьей гармоники тока пучка (ДГТ), установленных на входе и выходе резонатора. Сигнал с них поступал по фазостабильным кабелям на электронный фазовый детектор (ФД). Предварительно проводилась калибровка ФД, позволяющая в процессе измерения переводить разностный сигнал с двух ДГТ в градусы.

Сканирование фазы ускоряющего поля проводилось с помощью механического фазовращателя в цепи возбуждения ВЧ-генератора.

Программа сканирования фазы установлена на ЭВМ СМ1420, непосредственно соединенной с аппаратурой ускорителя.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и технической политики РФ на установке “линейный ускоритель ЛУ ММФ”.

## 2. Обработка результатов сканирования

Результаты сканирования обрабатывались на персональном компьютере РС IBM, который был связан с вычислительной машиной СМ1420.

На РС установлена программа обработки результатов сканирования. По экспериментальным точкам находилось положение синхронной фазы,  $\Delta W$  и  $E/E_0$  сканируемого резонатора, где  $\Delta W$  – относительное отклонение входной энергии пучка от номинальной входной энергии [%],  $E/E_0$  – отношение амплитуды ВЧ-поля к номинальной амплитуде ВЧ-поля. Пользователь имел возможность отмечать любую фазовую точку как участвующую или не участвующую в расчетах, что позволяло избежать использования явно ошибочных точек.

Цель расчетной программы – среди насчитанных фазовых кривых найти ближайшую к экспериментальной кривой. Теоретические фазовые кривые были рассчитаны для разных  $\Delta W$  и  $E/E_0$  сканируемого резонатора и записаны в файл. Перезапись, уничтожение или добавление фазовых кривых в файл не требует изменения программного аппарата.

Близость экспериментальной кривой к теоретической оценивается по среднему квадратичному отклонению точки экспериментальной кривой от расчетной. Для нахождения квадратичного отклонения теоретическая кривая сдвигается к экспериментальной кривой. Первоначальный сдвиг теоретической кривой по оси ординат принимается равным  $a_0 - b_0$ , где  $a_0$  и  $b_0$  – нулевые коэффициенты разложения в ряд Фурье экспериментальной и расчетной кривых. Первоначальный сдвиг теоретической кривой по оси абсцисс принимается равным  $\varphi_{a1} - \varphi_{b1}$ , где  $\varphi_{a1}$  и  $\varphi_{b1}$  – фазы первой гармоники разложения в ряд Фурье экспериментальной и расчетной кривых. Более точный сдвиг находится поиском минимума квадратичного отклонения.

Находится кривая с минимальным квадратичным отклонением, являющаяся ближайшей к экспериментальной кривой. Ее параметры и берутся как действительные параметры экспериментальной кривой. Область ошибки нахождения параметров экспериментальной кривой оценивается как область максимальных отклонений параметров кривых, чье квадратичное отклонение не больше, чем 1,5 минимального квадратичного отклонения.

Для оценки совпадения по форме экспериментальной и ближайшей теоретической кривых, кроме квадратичного отклонения, используется введенный эмпирический коэффициент  $k_{\text{cor}}$ ,

$$k_{\text{cor}} = \frac{\sum_{i=2}^{i=N} (\Delta f_i \cdot \Delta f_{i-1})}{\sum_{i=1}^{i=N} (\Delta f_i \cdot \Delta f_i)} \cdot \frac{N}{(N-1)},$$

где  $N$  – количество точек экспериментальной кривой,  $\Delta f_i$  – отклонение  $i$ -той точки экспериментальной кривой от расчетной кривой.

Были проведены численные исследования  $k_{\text{cor}}$ , что позволяет предполагать, что при квадратичном отклонении от 25 до 60: если  $k_{\text{cor}} < 0,25$  – совпадение кривых хорошее, если  $k_{\text{cor}} < 0,5$  – совпадение кривых удовлетворительное.

Положение синхронной фазы экспериментальной кривой находится, зная положение синхронной фазы теоретической кривой и значение сдвига теоретической кривой к экспериментальной.

Создание набора теоретических фазовых кривых проводилось с помощью программы LANA [5], которая использует метод Монте-Карло для моделирования

динамики пучка. Продольный эмиттанс пучка на входе исследуемого резонатора находился прогоном 1000 частиц от начала ускорителя до сканируемого резонатора. Начальное распределение частиц получали равномерно заполняя полученный продольный эмиттанс на входе сканруемого резонатора 300 частицами.

### 3. Результаты обработки

В таблице приведены основные результаты обработки данных сканирования.

Параметр	Резонатор № 15	Резонатор № 16
$W_{\text{расчетная на входе, [МэВ]}$	247,32	266,52
$\Delta W, [\%]$	$+0.2^{+0.4}_{-0.2}$	$-0.4^{+0.2}_{-0.2}$
$E/E_0$	$0.9^{+0.05}_{-0.05}$	$0.0^{+0.04}_{-0.04}$

На рисунках 1 и 2 в виде графика представлены экспериментальная, ближайшая теоретическая кривые и кривая с номинальными параметрами для резонаторов №15 и № 16 соответственно.

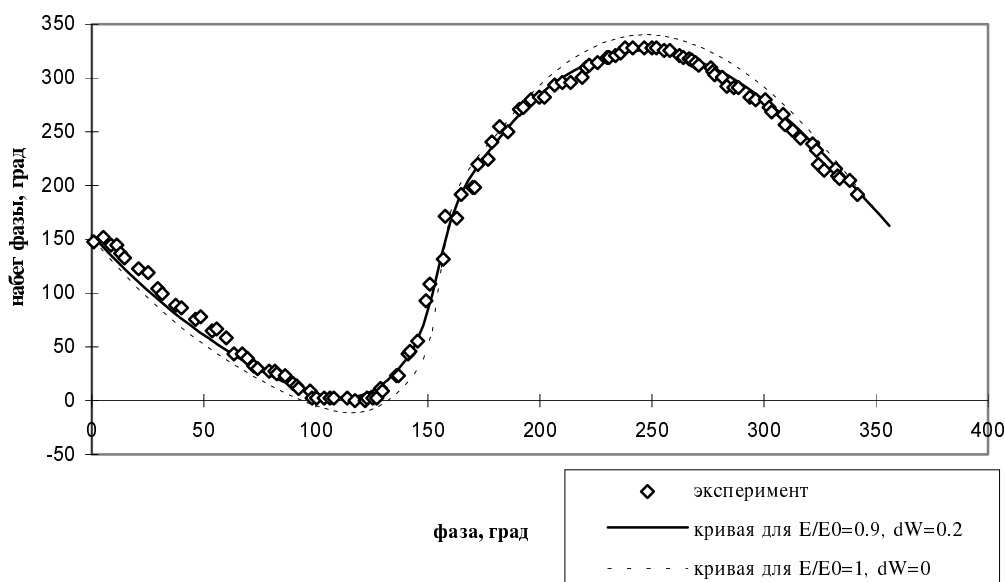
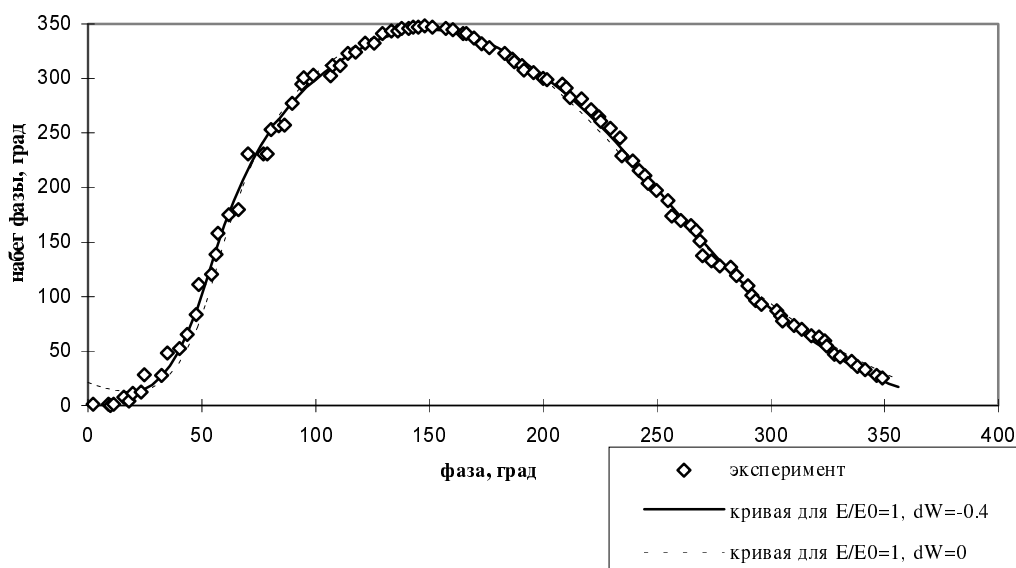


Рис.1 Фазовые кривые для 15 резонатора

Для кривой сканирования резонатора №15  $k_{\text{кор}} = 0,47$ , что показывает удовлетворительное согласование теоретической и экспериментальной кривых. Квадратичное отклонение двух кривых было равно  $(7.29^\circ)^2$ . Достаточно большое квадратичное отклонение связано с не очень хорошим согласованием теоретической и экспериментальной кривых, которое можно отнести к попаданию параметров экспериментальной кривой в промежуток между параметрами расчетных кривых.



**Рис.2 Фазовые кривые для резонатора 16**

Для кривой сканирования резонатора № 16  $k_{\text{cor}} = 0.194$ , что показывает хорошее согласие теоретической и экспериментальной кривых. Квадратичное отклонение двух кривых равно  $(6.22^\circ)^2$ , что соответствует дисперсии фазы сигнала примерно  $6^\circ$  при дисперсии ВЧ фазы  $1^\circ$ .

### Выводы

Предложенная методика определения и настройки параметров резонаторов успешно была реализована на первых двух резонаторах 4-го сектора ЛУ ММФ. В настоящее время она может быть использована для настройки следующих резонаторов 4- и 5-го секторов.

### Литература

1. П.Н.Остроумов. "Исследование динамики пучка и разработка методов настройки высокопоточных линейных ускорителей ионов", Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Москва, 1992.
2. F.W.Guy and T.P.Wangler. "Least-Square Fitting Procedure for Setting RF Phase and Amplitude in Drift-Tube-Linac Tanks," in Conference Record of the 1991 IEEE Particle Accelerator Conference, May 6-9, 1991, pp. 3056-3058.
3. P.N.Ostroumov, et. al. "Proton Beam Acceleration up to 160MeV at the Moscow Meson Factory Linac," ibid, pp. 3067-3069
4. T.L.Owens and M.B.Popovic. "Phase-Scan Signature Matching for Linac Tuning", Fermilab Report U-186, Nov.18, 1992.5. D.V.Gorelov, P.N.Ostroumov. "LANA Computer Code for Beam Dynamics Simulation in Multy Cavity Linac", INR Internal Report, 1994.