

# ОСОБЕННОСТИ УСТАНОВКИ АМПЛИТУД И ФАЗ ПОЛЕЙ В РЕЗОНАТОРАХ НА УЧАСТКАХ ПРОДОЛЬНОГО СОГЛАСОВАНИЯ ПУЧКА В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ИЯИ РАН

С.Е. Брагин, О.М. Володкевич, А.Н. Мирзоян, А.Н. Набока, П.И. Рейнгардт-Никулин,  
А.В. Фещенко

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

E-mail: bragin@inr.ru

На линейном ускорителе ИЯИ РАН можно выделить два участка, где продольное согласование пучка особенно важно: а) участок перехода между начальной частью ускорителя с трубками дрейфа и основной частью ускорителя с шайбами и диафрагмами; б) участок вывода пучка с энергией до 159 МэВ. Для определения и установки амплитуд и фаз полей в резонаторах на участках продольного согласования пучка из нескольких испытанных методов была выбрана времяпролетная процедура. Представлены особенности этой процедуры, обсуждаются результаты ее применения.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Начальная часть (до 100 МэВ) сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН представляет собой ускоряющую структуру с трубками дрейфа, состоящую из 5 резонаторов на частоте 198.2 МГц. Основная часть (до 600 МэВ) состоит из 27 ускоряющих и одного согласующего резонатора с шайбами и диафрагмами на частоте 991 МГц. Так как частота основной части ускорителя в 5 раз выше частоты начальной части, ее продольный акселеранс меньше по фазе примерно в 5 раз. Последний резонатор начальной части используется для продольного согласования пучка на участке перехода между начальной и основной частями ускорителя с целью минимизации потерь частиц. Другим участком ускорителя, где продольное согласование пучка также необходимо, является зона вывода пучка с энергией до 159 МэВ. Регулярность ускоряющей структуры на этом участке нарушается, поэтому используется специальный двухсекционный резонатор, обеспечивающий единичное преобразование продольного фазового эллипса. Погрешности установки амплитуд и

фаз при настройке резонаторов не должны превышать соответственно  $\pm 1\%$  и  $\pm 1^\circ$ .

## 2. АЛГОРИТМ УСТАНОВКИ ПОЛЯ В ПОСЛЕДНЕМ РЕЗОНАТОРЕ НАЧАЛЬНОЙ ЧАСТИ УСКОРИТЕЛЯ

Для продольного согласования пучка на участке перехода между начальной и основной частями ускорителя последний (пятый) резонатор начальной части рассчитан таким образом, что частота продольных колебаний в нем превышает частоту колебаний в предыдущих резонаторах низкоэнергетической части, а длина согласующего резонатора равна четверти длины волны продольных колебаний. Поэтому он относительно короткий по сравнению с другими резонаторами начальной части и имеет незначительный набор энергии пучка  $\sim 5.7$  МэВ. Фазовая протяженность сгустков в нем сжимается приблизительно в 1.4 раза [1].

Для того чтобы обеспечить необходимые условия продольного фазового движения, амплитуда и фаза должны быть соответствующим образом установлены.

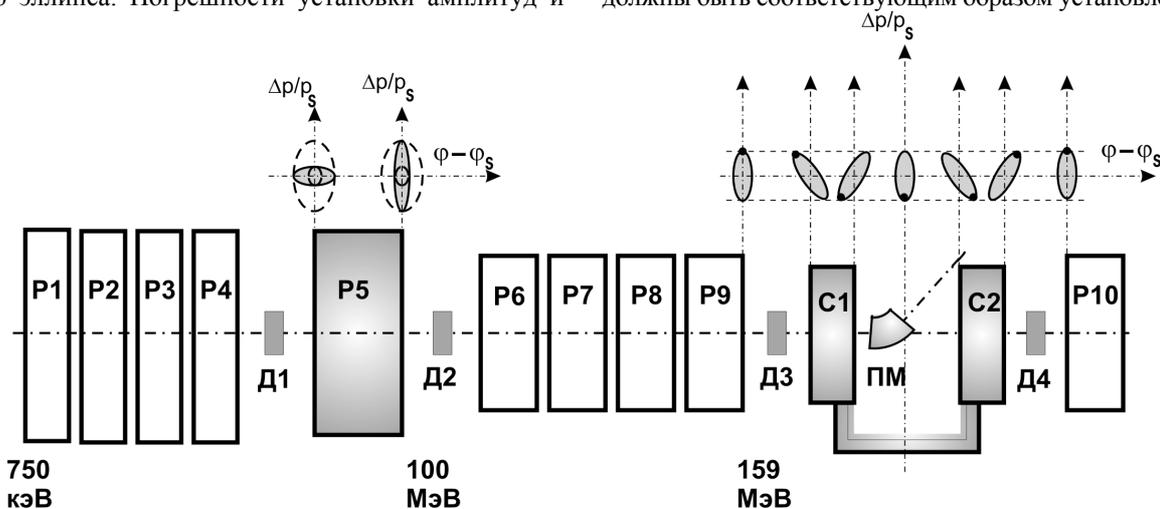


Рис.1. Схема части линейного ускорителя, соответствующая ускорению пучка от 750 кэВ до 175 МэВ, и трансформация сгустка на фазовой плоскости ( $\phi - \phi_s$ ,  $\Delta p/p_s$ ) на участках продольного согласования пучка. P – резонаторы; C1, C2 – секции двухсекционного согласующего резонатора; D – датчики гармоника тока; ПМ – поворотный магнит для вывода пучка с энергией до 159 МэВ

Неправильная установка амплитуды приводит к увеличению фазовой протяженности сгустка, а ошибка в установке фазы вызывает изменение выходной энергии пучка, что делает невозможным использование  $\Delta t$ -процедуры, которая является главной настроечной процедурой для основной части ускорителя.

Для определения номинальных параметров ускоряющего поля в пятом резонаторе было разработано несколько независимых процедур. В результате проведенных расчетных исследований при вариации амплитуды и фазы ускоряющего поля были предложены три группы методов, основанных на а) анализе степени группировки пучка; б) измерении средней энергии пучка на выходе резонатора; в) измерении времени пролета пучка через резонатор [2]. Опыт настройки показал, что времяпролетная процедура является самой эффективной и надежной. Измерения выполняются с помощью датчиков гармоники тока Д1 и Д2, работающих на частоте третьей гармоники ВЧ-поля начальной части ускорителя. Схема низкоэнергетической части ускорителя и расположение датчиков гармоники тока показаны на Рис.1.

Для определения амплитуды и фазы ускоряющего поля в резонаторе Р5 измеряется зависимость разности фаз сигналов  $\Delta\Psi$ , наведенных пучком в датчиках Д1 и Д2, от фазы поля  $\phi$  в резонаторе Р5. Затем результаты измерения сравниваются с предварительно рассчитанной функцией  $\Delta\Psi(\phi)$ . Расчетная функция  $\Delta\Psi(\phi)$  для датчиков Д1 и Д2 при различных амплитудах поля в резонаторе Р5 показана на Рис.2.

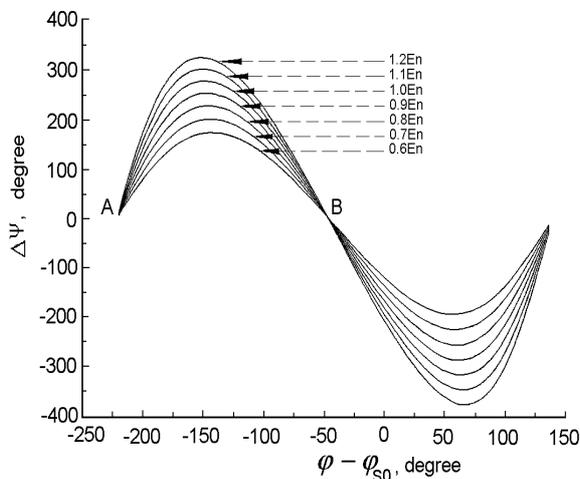


Рис.2. Расчетные кривые сканирования фазы поля в резонаторе Р5 с использованием датчиков Д1 и Д2 при различных амплитудах поля в резонаторе

Здесь  $\phi_{s0}$  – расчетная синхронная фаза для номинальной амплитуды поля  $E_n$  в резонаторе Р5. Проведенный анализ показывает, что оптимальное продольное согласование пучка достигается при  $\phi_{s0}=56^\circ$ . Следует заметить, что кривые сканирования фазы для различных амплитуд поля в резонаторе пересекаются в одних и тех же точках (А и В), а вертикальный размах кривых зависит от величины амплитуды поля. Эти особенности могут быть использованы для установки амплитуды и фазы поля в резонаторе. Зависимость величины размаха кривой сканирова-

ния фазы (DF) от амплитуды поля в резонаторе приведена на Рис.3.

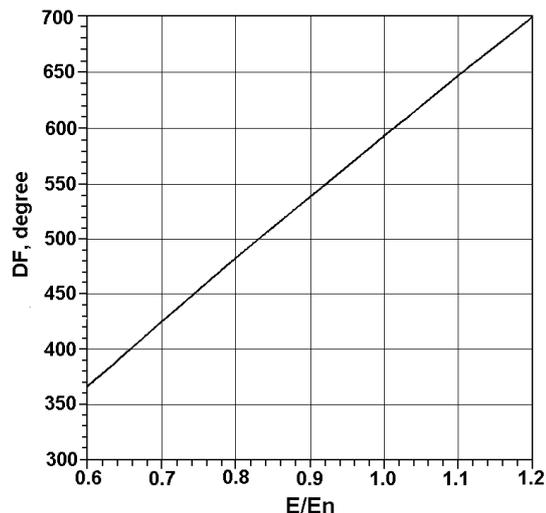


Рис.3. Зависимость размаха расчетной кривой сканирования фазы в резонаторе Р5 от амплитуды поля в резонаторе

Положение синхронной фазы  $\phi_s$  соответствует более пологому склону кривой сканирования. Она может быть найдена относительно точки пересечения В. Положение точки В, в свою очередь, определяется по отношению к максимуму и/или минимуму кривой сканирования (Рис.4) независимо от амплитуды поля.

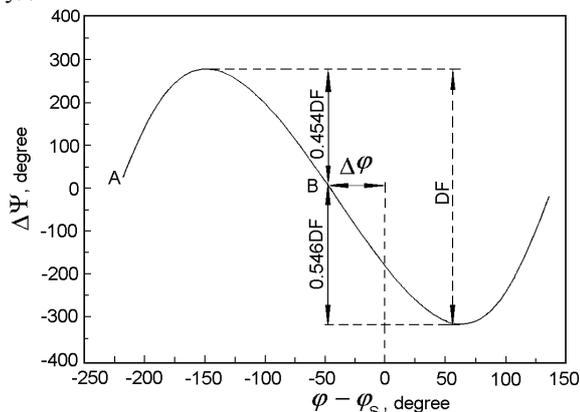


Рис.4. Определение синхронной фазы в резонаторе Р5 по кривой сканирования фазы

Точка установки фазы, соответствующая синхронной фазе  $\phi_s$  для текущего значения амплитуды поля в резонаторе Е, смещена по отношению к точке В на величину

$$\Delta\phi^\circ = 47.5 - \frac{180}{\pi} \cdot \frac{E - E_n}{E_n} \operatorname{ctg}\phi_{s0}. \quad (1)$$

На практике погрешность установки амплитуды и фазы поля в резонаторе Р5 времяпролетным методом составляет соответственно  $\pm 1\%$  и  $\pm 3^\circ$ . Только после установки поля в резонаторе Р5 с указанной точностью возможно проведение  $\Delta t$ -процедуры в следующем за ним резонаторе Р6 с шайбами и диафрагмами. В процессе проведения  $\Delta t$ -процедуры фаза в резонаторе Р5 корректируется и устанавливается с требуемой точностью  $\pm 1^\circ$ .

### 3. АЛГОРИТМ УСТАНОВКИ ПОЛЯ В ДВУХСЕКЦИОННОМ СОГЛАСУЮЩЕМ РЕЗОНАТОРЕ

После четвертого резонатора основной части ускорителя (резонатор Р9) организован вывод пучка с энергией до 159 МэВ на изотопный комплекс. Длина участка вывода довольно велика, поэтому необходимо восстановление согласованного продольного движения пучка.

Когда участок вывода, как в нашем случае, расположен между резонаторами с равными частотами продольных колебаний, согласующий резонатор располагается в середине образованного промежутка, чтобы обеспечить единичное преобразование продольной фазовой площади пучка. Схема участка вывода и принцип работы согласующего резонатора показаны на Рис.1. Согласующий резонатор состоит из двух секций С1 и С2, соединенных мостовым устройством. Так как пучок при пролете через него не набирает энергии, для установки амплитуды и фазы поля в нем неудобно применять  $\Delta t$ -процедуру.

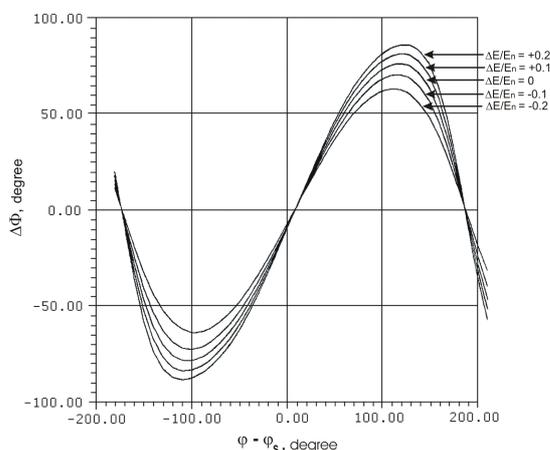


Рис.5. Расчетные кривые сканирования фазы поля в двухсекционном согласующем резонаторе с использованием датчиков Д3 и Д4 при различных амплитудах поля в резонаторе

Для определения номинальных параметров поля в двухсекционном согласующем резонаторе времяпролетная процедура, используемая для настройки резонатора Р5, оказалась также весьма успешной. Измерения выполняются с помощью датчиков гармоники тока Д3 и Д4. Измеряется зависимость разности фаз сигналов  $\Delta\Phi$ , наведенных пучком в датчиках Д3 и Д4, от фазы поля  $\phi$  в согласующем резонаторе и сравнивается с расчетной функцией  $\Delta\Phi(\phi)$ . Функция  $\Delta\Phi(\phi)$ , рассчитанная для датчиков Д3 и Д4 при различных амплитудах поля в двухсекционном согласующем резонаторе, показана на Рис.5. Вертикальный размах кривых сканирования фазы  $\Phi_{\max}$  зависит от величины амплитуды поля в согласующем резонаторе. Эта зависимость может быть аппроксимирована полиномом

$$\Phi_{\max}^{\circ} = 154.7 + 470 \cdot \frac{\Delta E}{E_n} - 1721 \cdot \left( \frac{\Delta E}{E_n} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\Delta E$  – отклонение амплитуды поля от номинального значения  $E_n$ .

Положение синхронной фазы  $\phi_s$  соответствует более пологому склону кривой сканирования фазы. Она может быть найдена при делении размаха кривой сканирования в отношении, зависящем от амплитуды поля в резонаторе, как показано на Рис.6.

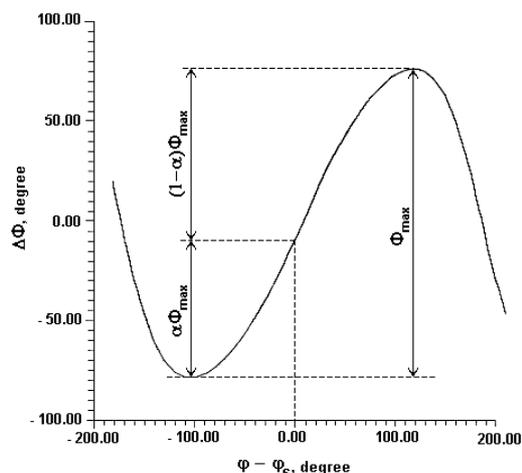


Рис.6. Определение синхронной фазы в двухсекционном согласующем резонаторе по кривой сканирования фазы

Зависимость параметра  $\alpha$  от уровня поля в резонаторе приведена в Таблице.

$\Delta E/E_n$	-0,05	-0,025	0,0	0,025	0,05
$\alpha$	0,441	0,445	0,445	0,446	0,448

Погрешность установки амплитуды и фазы поля в резонаторе описанным методом составляет соответственно  $\pm 1\%$  и  $\pm 3^\circ$ .  $\Delta t$ -процедура для резонатора Р10 может быть успешно проведена только после установки поля в расположенном перед ним двухсекционном согласующем резонаторе с указанной точностью. При проведении  $\Delta t$ -процедуры производится более тонкая регулировка фазы поля в двухсекционном согласующем резонаторе и достигается необходимая точность  $\pm 1^\circ$ .

### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ УСТАНОВКИ ПОЛЯ В СОГЛАСУЮЩИХ РЕЗОНАТОРАХ

Для реализации времяпролетных процедур установки амплитуд и фаз полей в согласующих резонаторах был разработан пакет программ в графической среде программирования LabVIEW. На Рис.7,8 представлены экспериментальные результаты сканирования фазы в последнем резонаторе начальной части ускорителя (Р5) и двухсекционном согласующем резонаторе.

Фаза ВЧ-поля в рассматриваемых резонаторах регулируется с помощью калиброванных механических фазосдвигающих устройств. Чтобы однозначно интерпретировать поведение кривых сканирования фазы, диапазон изменения фазы в резонаторах должен составлять не менее полного периода ВЧ-поля.

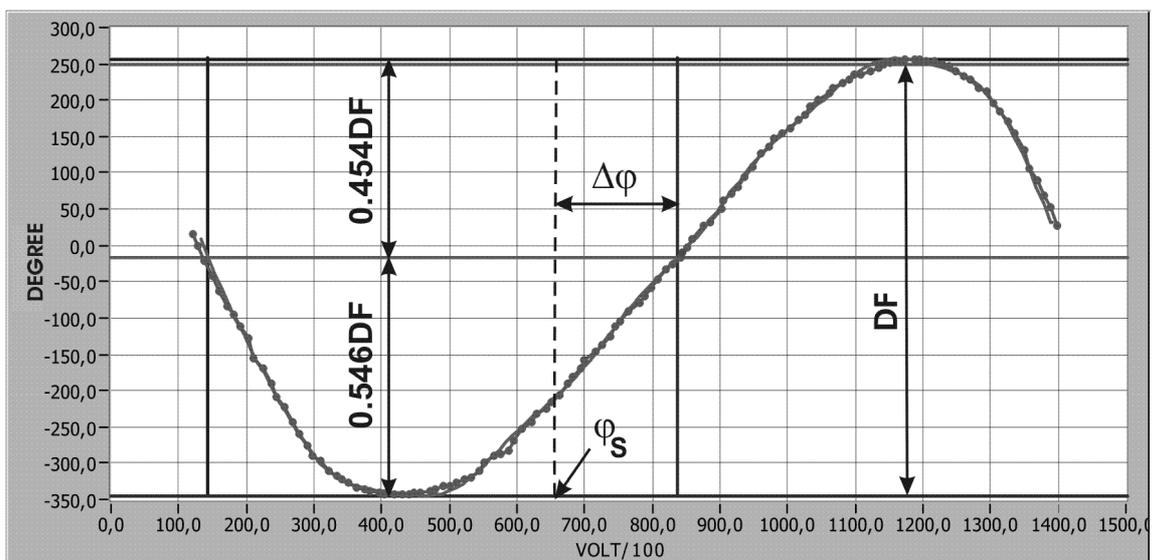


Рис.7. Результат сканирования фазы в резонаторе P5 при амплитуде поля в резонаторе  $E = 1.02E_n$

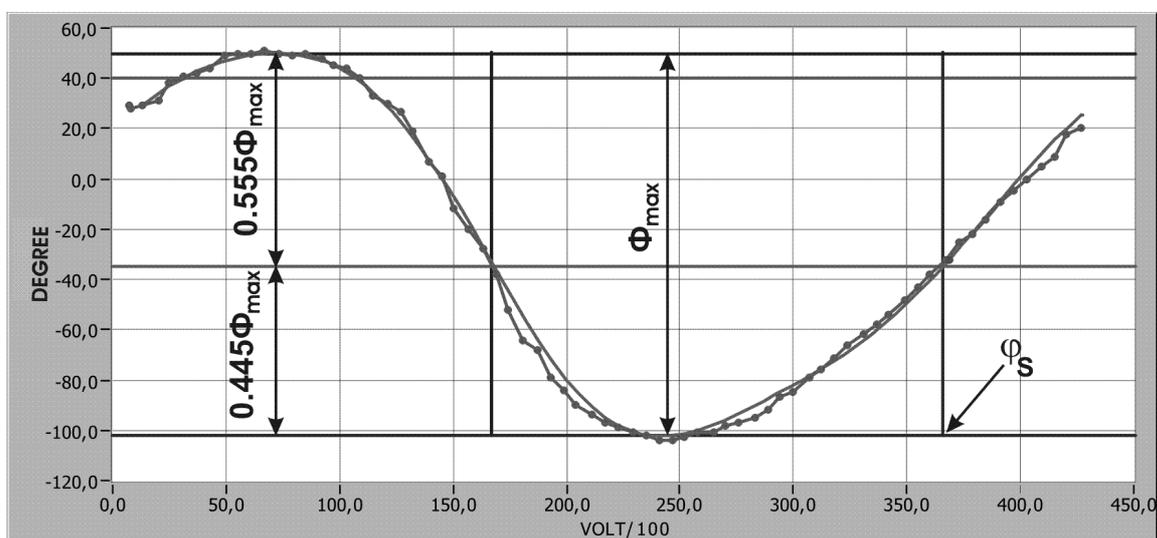


Рис.8. Результат сканирования фазы в двухсекционном согласующем резонаторе при амплитуде поля в резонаторе  $E = E_n$

Для достижения требуемых пределов регулирования фазы при сканировании резонатора P5 используются три последовательно соединенных фазосдвигающих устройства, каждое из которых обеспечивает изменение фазы в диапазоне  $120^\circ$  на частоте 198,2 МГц. При сканировании фазы в двухсекционном согласующем резонаторе используется одно фазосдвигающее устройство, обеспечивающее изменение фазы в диапазоне  $360^\circ$  на частоте 991 МГц. Горизонтальная ось экспериментальной кривой сканирования фазы (см. Рис.8) отградуирована в показаниях многооборотного потенциометра, соответствующих электрической длине фазосдвигающего устройства. Для горизонтальной оси на Рис.7 применяется соответственно сумма показаний трех используемых фазосдвигающих устройств. Разность фаз сигналов, наведенных пучком в парах датчиков гармоники тока (D1 - D2 или D3 - D4), измеряется калиброванным электронным фазометром [3].

Чтобы исключить случайные погрешности измерения, используется сглаживание экспериментальных данных с помощью ряда Фурье. Число исполь-

зуемых гармоник ряда выбирается визуально. Для данных, представленных на Рис.7, использовалось 7 гармоник; для данных, показанных на Рис.8-3 гармоники.

Обычно надо выполнить несколько процедур фазового сканирования для каждого из согласующих резонаторов, чтобы установить амплитуду поля в резонаторе с требуемой точностью  $\pm 1\%$ . После установки амплитуды поля в настраиваемом резонаторе фаза поля в нем выставляется с помощью повторного сканирования фазы. Кривая фазового сканирования резонатора P5, представленная на Рис.7, получена при амплитуде поля  $E = 1.02E_n$ . А на Рис.8 показаны результаты сканирования двухсекционного резонатора при отклонении амплитуды поля от номинальной менее  $1\%$ .

Следует отметить, что направление отсчета фазы при измерениях, проводимых с помощью потенциометров (см. Рис.7 и 8), противоположно направлению отсчета фазы при получении расчетных кривых сканирования (см. Рис.4 и 6) моделированием динамики пучка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для настройки сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН разработаны и регулярно используются времяпролетные процедуры установки амплитуд и фаз в согласующих резонаторах на участке перехода между начальной и основной частями ускорителя и на участке вывода пучка с энергией до 159 МэВ. В графической среде программирования LabVIEW создан пакет программ, обеспечивающий автоматизированный процесс измерения, обработку данных, графическое отображение результатов измерения и установку амплитуд и фаз полей в согласующих резонаторах. Проведение  $\Delta t$ -процедуры для настройки резонаторов основной части ускорителя возможно только тогда, когда обеспечена необходимая точность установки амплитуд и фаз полей в согласующих резонаторах с помощью времяпролет-

ных процедур. В процессе проведения  $\Delta t$ -процедуры производится прецизионная подстройка фаз в согласующих резонаторах. Результирующая точность установки амплитуд и фаз полей в согласующих резонаторах:  $\pm 1\%$ ,  $\pm 1^\circ$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Линейные ускорители ионов. Том 2. Основные системы* / Под ред. Б.П. Мурина. М.: «Атомиздат», 1978.
2. Продольная настройка линейного ускорителя ИЯИ РАН до энергии 100 МэВ. *Отчет ИЯИ РАН*, 1991.
3. А.В. Новиков, П.Н. Остроумов и др. Быстродействующий электронный фазометр – новый прибор для времяпролетных исследований сгруппированного пучка заряженных частиц // *Приборы и техника эксперимента*. 1995, №1, с.24-28.

## FEATURES OF RF PHASE AND AMPLITUDE SETTING IN RESONATORS AT LONGITUDINAL BEAM MATCHING REGIONS OF INR LINAC

*S.E. Bragin, O.M. Volodkevich, A.N. Mirzoyan, A.N. Naboka, P.I. Reinhardt-Nickoulin, A.V. Feschenko*

There are two INR linac areas where longitudinal beam matching is of special importance: a) transition region between drift tube part and disk-and-washer part of linac; b) the area of beam extraction at intermediate energy up to 159 MeV. To determine and to set proper RF amplitude and phase in cavities at longitudinal beam matching regions the time-of-flight procedure has been selected among several other tested methods and has been implemented. The features of this procedure and the results of application are presented and discussed.

## ОСОБЛИВОСТІ УСТАНОВКИ АМПЛІТУД І ФАЗ ПОЛІВ У РЕЗОНАТОРАХ НА ДІЛЯНКАХ ПОЗДОВЖНЬОГО УЗГОДЖЕННЯ ПУЧКУ В ЛІНІЙНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ ІЯД РАН

*С.Є. Брагін, О.М. Володкевич, А.Н. Мірзоян, А.Н. Набока, П.І. Рейнгардт-Нікулін, А.В. Фещенко*

На лінійному прискорювачі ІЯД РАН можна виділити дві ділянки, де поздовжнє узгодження пучку особливо важливо: а) ділянка переходу між початковою частиною прискорювача із трубками дрейфу і основною частиною прискорювача із шайбами і діафрагмами; б) ділянка випуску пучку з енергією до 159 МеВ. Для визначення і установки амплітуд і фаз полів у резонаторах на ділянках поздовжнього узгодження пучку з кількох випробуваних методів було обрано часопролітна процедура. Представлено особливості цієї процедури, обговорюються результати її застосування.