

## ВВОД ВЧ-МОЩНОСТИ В УСТРОЙСТВО СВЯЗИ УСКОРЯЮЩЕГО РЕЗОНАТОРА

*В. В. Парамонов<sup>1</sup>, Л. В. Кравчук, И. В. Рыбаков*

Институт ядерных исследований РАН, Москва

В основной части линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН резонаторы состоят из четырех ускоряющих секций, объединенных мостовыми устройствами связи в резонансную систему. Ввод ВЧ-мощности реализован в среднее устройство связи. Резонатор настраивается как многомодовая структура с компенсированным рабочим колебанием и ВЧ-полем, существующим одновременно в секциях и в устройствах связи. Обоснование наличия и возможности регулировки величины магнитного поля рабочего колебания в устройстве связи для обеспечения ввода ВЧ-мощности расширяет возможности в разработке многосекционных резонаторов.

In the main part of the INR proton linac the cavities consist of four accelerating sections, coupled with bridge coupling devices into resonant system. RF input is implemented in the middle coupling device. The cavity is developed as a multimode structure with compensated operating mode and RF field existing simultaneously both in sections and in coupling devices. Justification of availability and possibility of adjusting the magnetic field value in coupling devices for RF input realization extends capabilities in the development of multisectional accelerating cavities.

PACS: 29.27.-a; 41.85.-p; 07.78.+s

### ВВЕДЕНИЕ

Нормально проводящие ускоряющие резонаторы основных частей (ОЧ) линейных ускорителей (ЛУ) ионов водорода состоят из нескольких ускоряющих секций (УС), объединенных в единую резонансную систему с помощью мостовых устройств связи (МУС). ОЧ ускорителя протонов ИЯИ РАН, разработанного в РТИ АН СССР, на участке энергий 100–600 МэВ состоит из 27 ускоряющих резонаторов, каждый с четырьмя секциями ускоряющей структуры с шайбами и диафрагмами (УСШД). В качестве МУС предложено простое устройство [1], изготавливаемое из отрезков стандартного волновода.

Для повышения мощности пучка ЛУ ИЯИ РАН необходима замена первого резонатора ОЧ. Воспроизведение технологии изготовления УСШД для одиночного резонатора требует больших затрат. Предлагается заменить УСШД на более простую в изготовлении структуру CDS с меньшими в два раза поперечными размерами [2]. При замене ускоряющей структуры требуется как минимизировать доработки в системах ЛУ, так и сохранить построение ускоряющего резонатора, показанное на рис. 1.

---

<sup>1</sup>E-mail: paramono@inr.ru

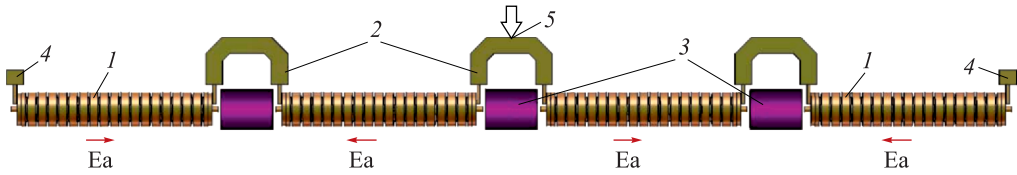


Рис. 1. Построение ускоряющего резонатора ОЧ ЛУ ИЯИ РАН: 1 — секции ускоряющей структуры; 2 — мостовые устройства связи; 3 — квадрупольные линзы; 4 — закороченные отрезки МУС; 5 — положение узла ввода ВЧ-мощности

В простейшем одномодовом приближении резонатор рассматривался как система из семи связанных ячеек: четырех ускоряющих — УС и трех ячеек связи — МУС. В окрестности частоты рабочего колебания в узкой полосе существуют семь колебаний [3], и рабочее колебание является центральным. На нем в соседних УС ускоряющие поля имеют одинаковые амплитуды и противоположные направления. По этим признакам рабочее колебание в резонаторе определялось как мода вида  $\pi/2$ . Но на колебании вида  $\pi/2$  в ячейках связи — МУС — поля отсутствуют, что не позволяет осуществить ввод ВЧ-мощности в центральное МУС.

## 1. МНОГОМОДОВОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗОНАТОРА

Ширина полосы, в которой расположены семь колебаний, соответствующие колебательной системе резонатора, меньше, но сравнима с расстоянием по частоте колебаний до соседних с рабочим в УС [3]. Это не соответствует условиям применимости одномодового приближения для анализа резонатора. Многомодовое приближение [4] позволяет подробнее описать взаимодействие колебаний в резонаторе. В рассмотрение вовлекаются все колебания секций, принадлежащие рабочей дисперсионной характеристике структуры, и все частоты МУС в этой полосе частот. В многомодовом приближении щели связи между УС и МУС связывают между собой все собственные колебания в соседних элементах системы. Щель также связывает между собой все собственные колебания в отдельных элементах как УС, так и МУС. Собственная частота каждого колебания в отдельном элементе получает отрицательное смещение, пропорциональное квадрату напряженности магнитного поля этого колебания на щели связи.

С использованием рассчитанных или определенных другим способом характеристик отдельных элементов системы значения собственных частот колебаний и величины напряженности магнитного поля колебаний на щелях связи между УС и МУС рассчитываются как частоты колебаний в резонаторе, так и распределения полей по элементам резонатора. Результаты с хорошей точностью совпадают как с экспериментальными данными, полученными при настройке резонаторов с УСШД [5], так и с результатами прямого численного моделирования для упрощенных систем с CDS.

Рассмотрим систему из двух секций CDS, связанную отрезком волновода (рис. 2, а). Без потери общности реальное МУС с двумя технологическими Е-уголками можно заменить прямым отрезком волновода с длиной  $L_w$ , в котором возбуждается такое же колебание  $TE_{10n}$ . Волновод ограничен технологическими переходами — отрезками равной с волноводом ширины, но меньшей высоты. На торце перехода у секции рас-

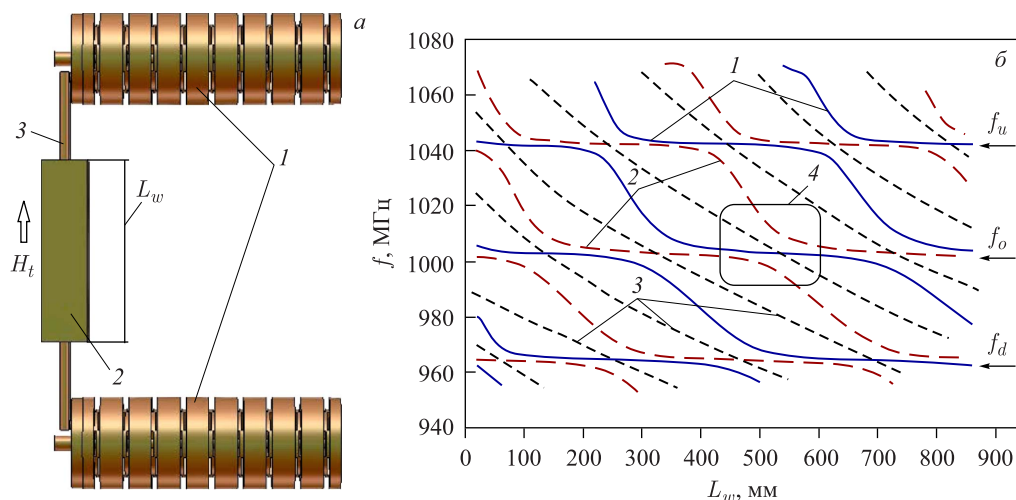


Рис. 2. *а)* Связанная система: 1 — секции структуры CDS; 2 — отрезок прямоугольного волновода длиной  $L_w$ ; 3 — переход. *б)* Графики зависимостей частот колебаний в системе от длины волновода  $L_w$ , колебания с четным (1) и нечетным (2) распределением  $H_t$  в волноводе; 3 — зависимости собственных частот мод  $TE_{10n}$  в волноводе с переходами; 4 — требуемый участок взаимодействия мод

положена щель связи с УС. Подробнее участок перехода УС–МУС, выполненный для УСШД, описан в [5].

На рис. 2, б показаны графики зависимостей частот колебаний в этой системе от длины волновода  $L_w$ , полученные прямым численным моделированием с использованием MWS CST [6]. Метки  $f_o$ ,  $f_d$ ,  $f_u$  обозначают значения частот рабочего, нижнего и верхнего (по отношению к рабочему) колебаний в секциях CDS. Кривые 3 соответствуют частотам мод  $TE_{10n}$  в волноводе вместе с переходами. Все это является парциальными частотами колебательной системы со многими степенями свободы [7]. В результате взаимодействия собственных колебаний в элементах образуется семейство волнообразно спадающих кривых. Каждая кривая соответствует определенному колебанию  $TE_{10n}$  в отрезке волновода вместе с переходами. Кривые для колебаний одинаковой четности, составляющей  $H_t$  магнитного поля в отрезке волновода, разнесены на расстояние  $\Lambda$ , а кривые разной четности — на расстояние  $\Lambda/2$  по оси абсцисс. Здесь  $\Lambda$  — длина волны в волноводе на частоте  $f$ .

Для согласования с линией передачи ВЧ-мощности от генератора необходима пучность  $H_t$  в середине отрезка волновода 2 (рис. 2, а). Этому соответствует область взаимодействия колебаний 4, выделенная на рис. 2, б. Расчеты в многомодовом приближении на рабочей частоте показывают уже величину  $H_t \neq 0$  в середине отрезка волновода 2 и возможность изменять при заданном поле в секции величину  $H_t$  более чем на порядок за счет подбора размеров щели связи и длины участка перехода 3 (рис. 2, а).

Это позволяет решить практическую задачу разработки резонатора с УС на основе CDS и существующих МУС, также являющегося наиболее простым в изготовлении. Но остается нераскрытой физическая идея построения резонатора, которая снимает кажущееся противоречие, относящееся к возможности ввода ВЧ-мощности в МУС.

## 2. НАСТРОЙКА РЕЗОНАТОРА КАК КОМПЕНСИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Как видно из рис. 1, резонатор является периодической структурой, в которой можно выделить период, показанный на рис. 3. Построим резонатор как компенсированную систему [8], достоинства которой хорошо известны в технике ЛУ. Для этого на частоте рабочего колебания резонатора должны совпадать частоты двух колебаний с сопряженной четностью распределений полей. Для ввода ВЧ-мощности в середину МУС на плоскостях 5 (рис. 3) необходима пучность перпендикулярного магнитного поля, т. е. граничные условия магнитной стенки. На практике такие условия не реализуются. Отметим, что УС на основе компенсированных структур УСШД или CDS, за исключением торцевых полуячеек, уже настроена и условие совпадения частот сопряженных по четности колебаний для нее выполняется.

Методика настройки секций CDS со щелями связи в целом подобна применявшейся для настройки секций УСШД [5] и используется на элементах в выделенном на рис. 3 участке 2. Переход 3 технологически выполняется вместе с торцевой полуячейкой секции. К переходу присоединяется отрезок волновода с подвижным закорачивающим поршнем. Снимаются зависимости от положения поршня частот центрального и боковых колебаний из диапазона взаимодействия 4 (см. рис. 2, б). Определяются положение поршня и соответствующая ему частота центрального (рабочего) колебания, при котором частоты боковых колебаний расположены симметрично относительно центральной. Подстройкой торцевой полуячейки в нужном направлении частота центрального колебания приближается к рабочей. Частоты боковых колебаний также изменяются при подстройке торцевой полуячейки, и процедура выполняется за несколько приближений. В результате секция настроена на рабочую частоту при некотором положении закорачивающего поршня 4 на рис. 3, и боковые колебания расположены симметрично. При этом на плоскости 4 положения поршня выполняются граничные условия электрической стенки. Электрическая длина дополнения 3 (см. рис. 3) выбирается равной  $(2m + 1)\lambda/4$ , где  $m$  — целое число. Это обеспечивает на плоскости 5 необходимые условия магнитной стенки при неизменности частоты рабочего колебания.

Величина перпендикулярного магнитного поля на плоскости 5 однозначно связана с величиной касательного магнитного поля в плоскости 4 волноводными соотношениями. Величины касательных магнитных полей на щели связи со стороны секции и участка перехода равны между собой. Участок перехода вместе со щелью связи также является трансформатором напряженности магнитного поля с поверхности торцевой полуячейки

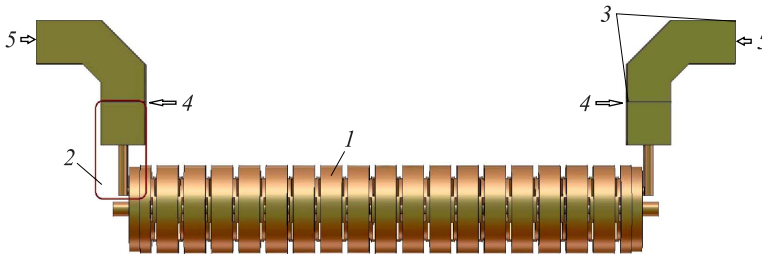


Рис. 3. Элемент периодичности в резонаторе: 1 — настроенная секция; 2 — настраиваемый участок; 3 — дополнение; 4 — положение плоскости плунжера при настройке; 5 — плоскости зеркальной симметрии

на плоскость поршня 4. Нужные величины коэффициента трансформации магнитного поля и коэффициента связи между УС и МУС выбираются при разработке участка 2 (см. рис. 3) подбором соотношения размеров щели связи и длины участка перехода. Величина магнитного поля в МУС выбирается достаточно большой, чтобы обеспечить согласование с подводящим волноводом, но не слишком большой, чтобы заметно уменьшать шунтовое сопротивление всего резонатора.

При добавлении дополнения 3 величины частот боковых колебаний изменяются по сравнению с величинами, измеренными в системе с закорачивающим поршнем. Но симметрия расположения боковых колебаний относительно рабочего при этом не нарушается. Новые величины боковых частот определяют границы полосы, в которой находятся семь колебаний резонансной системы из четырех УС и трех МУС.

Для колебания сопряженной четности распределения поля на плоскостях 3 выполняются условия электрической стенки. При электрической длине дополнения 3, равной  $(2m + 1)\lambda/4$ , это соответствует не реализуемым на практике условиям магнитной стенки на плоскости 4. Но равенство частоты колебания сопряженной четности частоте рабочего колебания с необходимостью обеспечивается симметрией расположения боковых частот. Это подтверждается как расчетами для показанного на рис. 3 периода в многомодовом приближении, так и результатами прямого численного моделирования в MWS CST.

Таким образом, условия формирования многосекционного резонатора как компенсированной системы на рабочем колебании выполнены. Следуя принятой классификации колебаний в периодической системе по сдвигу фазы на период, рабочим является колебание вида  $\pi$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многосекционный ускоряющий резонатор, базирующийся на компенсированной ускоряющей структуре, сам строится как компенсированная система. Необходимое для выполнения условий компенсации совпадение частот колебаний с сопряженной четностью распределения полей обеспечивается как применением в ускоряющих секциях компенсированных ускоряющих структур, так и процедурой настройки секций вместе с мостовыми устройствами связи. ВЧ-поле рабочего колебания существует как в секциях, так и в устройствах связи. Величина магнитного поля в устройстве связи, необходимая для согласования с подводящим волноводом, определяется выбором параметров участка перехода между секцией и устройством связи. Участок перехода одновременно выполняет функции обеспечения необходимого коэффициента связи и заданного коэффициента трансформации напряженности магнитного поля.

Рассматриваемое устройство связи (по сравнению с аналогами) является наиболее простым в изготовлении и настройке. Устройство может быть применено вместе с любой компенсированной ускоряющей структурой, одновременно упрощая конструкцию узла ввода ВЧ-мощности в резонатор.

Авторы признательны лаборатории DESY за предоставленную в рамках коллаборации возможность провести иллюстрирующие расчеты с применением CST MWS.

Работа выполнена в рамках ЦП RFMEF162117X0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреев В. Г., Белугин В. М., Парамонов В. В.* Мостовое устройство для ускоряющих резонаторов линейного ускорителя на высокие энергии // Тр. РТИ АН СССР. М., 1974. № 20. С. 47–55.
2. *Rybakov I. V. et al.* Proposal of the Accelerating Structure for the First Cavity of the Main Part of INR Linac // Proc. of RuPAC 2016. 2017. P. 216.
3. *Кравчук Л. В. и др.* Результаты радиотехнической настройки ускоряющей системы основной части ЛУ ММФ. Препринт ИЯИ П-0710. ИЯИ АН СССР, 1991.
4. *Paramonov V. V.* The Multi-Mode Analysis of the Slot-Coupled Accelerating Structures // Proc. of 2002 Linac. 2002. P. 413.
5. *Кравчук Л. В. и др.* Настройка частотных характеристик многорезонаторной ускоряющей системы. Препринт ИЯИ П-0600. ИЯИ АН СССР, 1989.
6. <https://www.cst.com>
7. *Мандельштам Л. И.* Лекции по теории колебаний. М.: Наука, 1972.
8. *Dome G.* Review and Survey of Accelerating Structures // Linear Accelerators / Eds. P. Lapostolle, E. Septier. Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1970.