

# РЕЗУЛЬТАТЫ НАСТРОЙКИ РЕЗОНАТОРА БУСТЕРА PITZ И ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯЧЕЕК НА НИЗКОМ УРОВНЕ ВЧ-МОЩНОСТИ

А.Н. Набока<sup>1</sup>, В.В. Парамонов<sup>1</sup>, К. Floettmann<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерных исследований РАН, ИЯИ РАН, 117312, Москва, Россия

<sup>2</sup>Deutsches Elektronen-Synchrotron, DESY, Notkestrasse 85, 22609, Hamburg, Germany

E-mail: naboka@inr.ru

Впервые на основе связанных ячеек реализована структура, в которой значительная величина коэффициента связи (9%) достигается без сопутствующего уменьшения эффективного шунтового сопротивления. Проект резонатора бустера реализуется для увеличения энергии электронов с 5 до 28 МэВ в установке Photo Injector Test Facility (PITZ), DESY, Zeuthen, предназначенной для исследования формирования пучков электронов сверхвысокой яркости и разработки инжекторов для современных проектов X-FEL и ILC.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Для модернизации стенда испытаний фотоинжектора PITZ2 Цойтен DESY (Рис.1) [1], со стороны ИЯИ РАН в лице проф. В.В. Парамонова, был предложен и в дальнейшем разработан бустерный резонатор [2] взамен нормально проводящего резонатора – прототипа TESLA, который обеспечивал

только 3 МВт импульсной мощности при средней мощности 1,3 кВт (2003/2004 годы), для тестирования пушки с более высокими градиентами полей – до 60 МВ/м, и измерения эмиттенса пучка электронов. Проект осуществляется в сотрудничестве ИЯИ РАН и DESY.

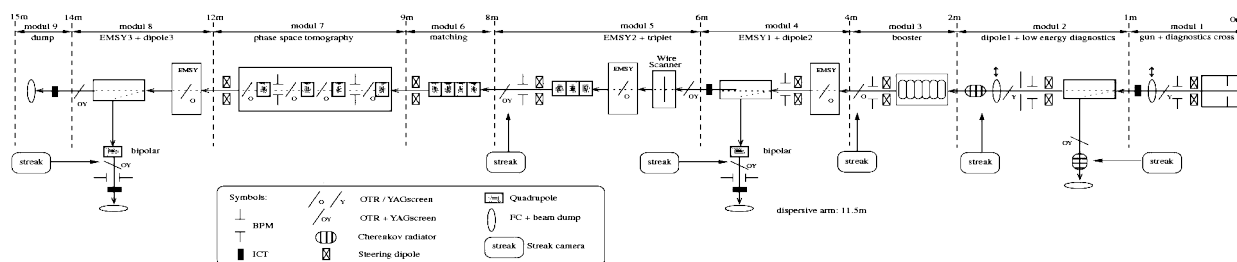


Рис.1. Предварительная схема PITZ2

## 2. ОБЩИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗОНАТОРА

Предложена структура (Рис.2) с разрезными диафрагмами CDS (Cutted Disk Structure) – которая относится к группе структур с большим коэффициентом связи  $k_c$ .

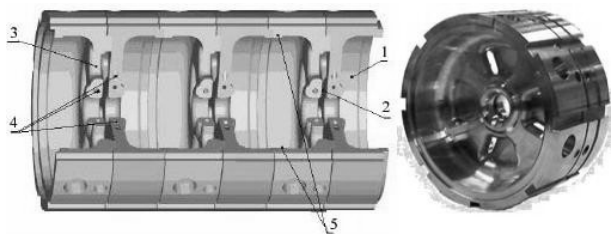


Рис.2. Структура CDS4W: 1-ускоряющая ячейка; 2-ячейка связи; 3-окна связи; 4-каналы охлаждения; 5-кольца-фаски для настройки

Структура образована последовательностью расположенных на оси пар полутрубок дрейфа, связанных поочередно лепестками разрезной диафрагмы, формирующей окно связи бипериодической структуры, в которой ускоряющее колебание возбуждается в пространстве между парами полутрубок, цилиндрической стенкой и двумя диафрагмами, а колебания связи, имея квазисосредоточенные параметры моды, распределяют электрическое поле в про-

странстве между полутрубками и вытесняют магнитное поле в ускоряющую ячейку. Общие параметры ускоряющего резонатора приведены в таблице.

Параметры ускоряющей секции

Наименование	Значение
Частота рабочая, МГц	1300
Скорость частиц	1,0
Темп ускорения, МэВ/м	12,5
Макс. темп ускорения, МэВ/м	14,18
Напряженность поля, МВ/м	20,18
Макс. поле на поверх., МВ/м	40,0
P импульсная макс., МВт	8,6
Длительность импульса, мкс	900
Частота импульсов, Гц	5
Диаметр апертуры, мм	30
Число периодов	14
Коэффициент связи, %	7,2
Расчетная добротность	23700
Добротность на 20°C	20100
Длина резонатора, м	≈1,8
Рабочая температура, °C	≈44
Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	4,5
Вакуум, Торр	≤10 <sup>-7</sup>

Данная структура позволила получить высокое эффективное шунтовое сопротивление  $Z_e$ , которое на 5...10% выше, чем у структур с боковыми (SCS) и внутренними (OCS) ячейками связи, и из-за сильного перекрытия полей колебаний обеспечить коэффициент связи до 30%, при малых конструктивных габаритах. CDS4W – компенсированная структура, имеющая однородное ускоряющее поле на апертуре. При моделировании динамики пучка на программе ASTRA [3] показано минимальное возмущение эмиттанса пучка, что является важным критерием для исследования пучков электронов сверхвысокой яркости.

### 3. РАСЧЕТ СТРУКТУРЫ

Выполнены аналитические расчёты и численное 3D-моделирование ускоряющего резонатора на CST MWS по оптимизации  $Z_e$ ,  $k_c$  и плотности тока на лепестках, частот рабочего колебания и связи. Проведены оценивающие расчеты величины чувствительности частот ускоряющих ячеек и ячеек связи от изменения основных размеров ячеек.

Завершены численные расчёты по стабильности распределения ускоряющего поля по отношению к погрешностям изготовления и нагрузки пучком. Общий вид проекта ускоряющего резонатора представлен на Рис.3.

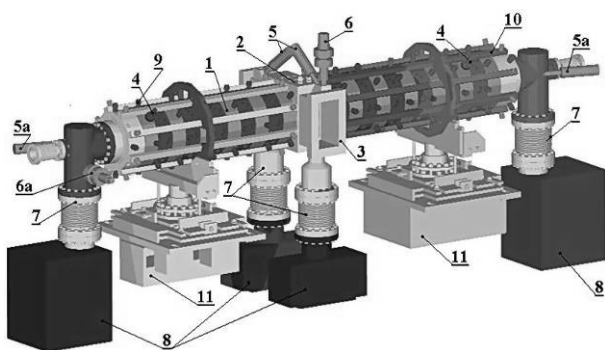


Рис.3. Бустерный резонатор:

1 - регулярные ячейки; 2 - ВЧ-ячейка ввода мощности; 3 - ВЧ-соединительные фланцы; 4 – СВЧ-зонды (штыри связи); 5 - фотоумножители; 5а - резервные фотоумножители; 6 - вакуумметр; 6а - резервный вакуумметр; 7 - вакуумные сильфоны с затворами; 8 - ионные вакуумные насосы; 9 - штуцера внутреннего контура охлаждения; 10 - внешний контур охлаждающей системы; 11 - основание с механизмом юстировки

### 4. НАСТРОЙКА РЕЗОНАТОРА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для отработки технологии и точности изготовления ячеек из сертифицированной бескислородной меди была изготовлена партия тестовых ячеек и симметричный узел ввода мощности (ТТВ). Выполнены измерения на тестовых ячейках и измерения на тестовом ТТВ: измерения собственной добротности  $Q_0$  ускоряющей моды в ячейках; сдвиг частот при снятии металла, зависимость деформации стенки глухих отверстий на изменение ускоряющей моды.

Измерения резонансных частот и добротностей ячеек структуры выполнялись в сборках по 2 и 4 чашки (Рис.4).

Для набора статистики измеряемых частот сборки чашек собирались и разбирались по 5 раз с усреднением частот по 10 измерениям при трех различных удельных давлениях в местах контактов.

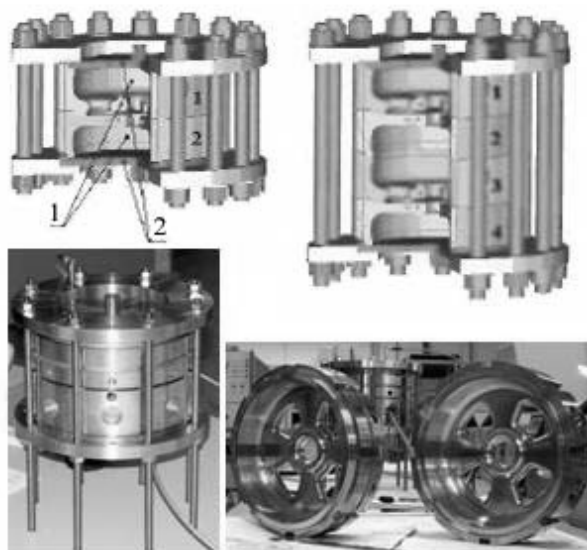


Рис.4. Сборки чашек для СВЧ-измерений и фото CDS4W чашек:

1 - чашки в сборке; 2 - закачивающие крышки сборки

Снижение погрешностей, связанных с качеством ВЧ-контактов между чашками и влияние согласования петель связи обеспечивалось контролем параметра  $S_{21}$ . Дополнительно производился расчет собственной добротности сборок чашек по формуле:

$$Q_0 = Q_n \cdot \left( 1 - 10^{-\frac{A}{20}} \right), \quad (1)$$

где  $A$  – переходное ослабление сборок чашек по мощности, дБ.

Для точного сравнения данных, частоты пересчитывались на рабочую температуру структуры при вакууме по известной формуле [6]:

$$f_{vac} = f_{meas} \cdot \left[ 1 + \lambda_{Cu} \cdot (t_{meas}^{\circ} - t_{vac}^{\circ}) \right] \cdot \sqrt{\varepsilon_{air}}, \quad (2)$$

где

$$\varepsilon_{air} = 1 + \frac{P_{air}}{t_{meas}^{\circ} + 273,15} \cdot \left[ 211 + \frac{P_{OH\ air} \cdot H_{air}}{P_{air}} \times \left( \frac{10160}{t_{meas}^{\circ} + 273,15} - 0,294 \right) \right] \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

– диэлектрическая проницаемость воздуха,  $\lambda_{Cu} = 1,67 \cdot 10^{-5}$  – линейный коэффициент расширения меди,  $P_{air}$  – атмосферное давление [мм рт.ст.],  $H_{air}$  – влажность воздуха [%],  $P_{OH\ air}$  – упругость насыщенных водяных паров при температуре измерений, равная

$$P_{OH\ air} = 10 \left[ 7,45 \cdot \left( \frac{t_{meas}^{\circ}}{t_{meas}^{\circ} + 234,85} \right) + 0,656 \right]. \quad (4)$$

Узел ввода ВЧ-мощности (Рис.5) – симметричный трансформатор типа волны с двухсторонним вводом мощности, разработан с двумя выходными окнами, под стандартный 10 МВт клистрон TESLA. Такой узел ввода мощности обеспечивает минимальное возмущение квадрупольной составляющей поля и снижает напряженность электромагнитного поля на керамических окнах связи в плечах ТТВ.

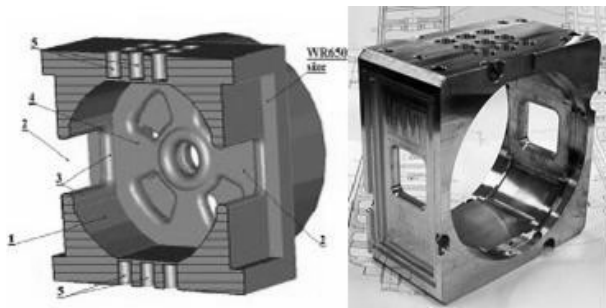


Рис.5. Симметричный узел ввода ВЧ-мощности и фото: 1 - ячейка ввода ВЧ-мощности; 2 - щели связи; 3 - округления; 4 - диафрагма; 5 - глухие отверстия настройки

В DESY на макете проверены скорости протока воды в схеме охлаждения регулярных ячеек (Рис.6). Разработанная несимметричная схема каналов охлаждения имеет преимущество в отсутствие паяной границы вода-вакуум.

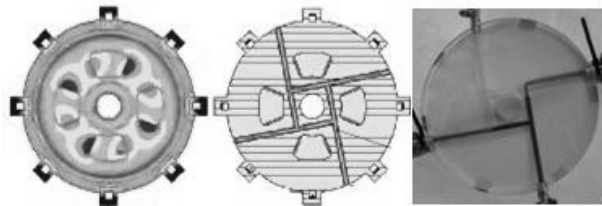


Рис.6. Схема охлаждения регулярных ячеек

Выполнены сравнительные измерения частот тестовых ячеек после пайки в вакууме и индукционным методом в газовой среде.

В результате определены окончательные размеры диаметров ускоряющих ячеек и ячеек связи, определена зависимость частот ячеек от диаметра, величины по настройке ячеек связи и полосы запирания. Изготовлены 24 рабочие ячейки, 2 оконечные ячейки и ТТВ.

Технологическая настройка выполнялась в два этапа по получению частот ускоряющих ячеек, ячеек связи и обеспечения согласования резонатора с волноводами.

Измеренные добротности ячеек после изготовления составили 89% от 3D-расчётного значения.

Измерение распределения ускоряющего поля на оси структуры выполнялось по теории малого возмущения электромагнитного поля. Использовался в роли пробного тела металлический цилиндр длиной 4 мм и диаметром 0,55 мм, закрепленный на нейлоновой нити диаметром 0,14 мм. Нейлоновая нить понижала частоту резонатора на 3 кГц.

Установка для измерения распределения поля представлена на Рис.7.

Сдвиг собственной частоты резонансной системы, пропорциональный квадрату напряженности поля  $\delta f \sim E_z^2$ , фиксировался по фазовой характеристике, как более чувствительной на частоте резонанса.

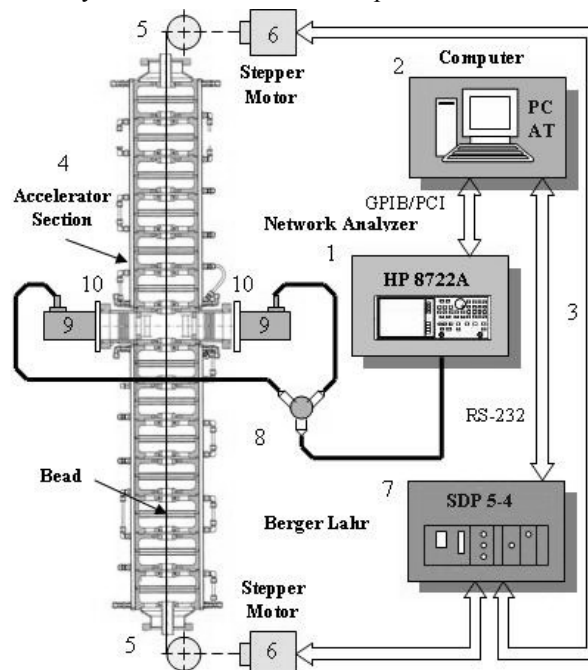


Рис.7. Функциональная схема измерений методом малых возмущений: 1 - Network Analyzer HP 8722A; 2 - персональный компьютер PC; 3 - система протяжки; 4 - ускоряющий резонатор CDS4W; 5 - направляющие нити; 6 - шаговые двигатели Berger LAHR; 7 - контроллер управления двигателями Berger Lahr SDP 5-4; 8 - 120° СВЧ-тройник; 9 - КВП MEGA Industries WR650; 10 - фланцы для волновода WR-650

Измеренные и обработанные экспериментальные данные, с использованием программного обеспечения LabView, представлены на Рис.8 и 9.

Неравномерность ускоряющего поля резонатора перед пайкой и окончательной настройкой меньше чем 5%. После 1-й подстройки размеров ячейки ввода мощности сразу получена необходимая связь ускоряющей структуры с подводимым волноводом, Рис.10 ( $KCB_H=1,01 \dots 1,05$ ).

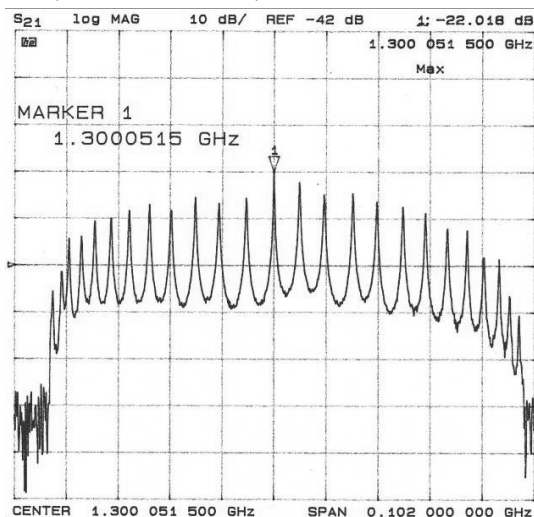


Рис.8. Измеренный спектр СВЧ-мод резонатора

Для контроля измерения КСВ, дополнительно измерялась добротность резонатора без подключения нагрузок к КВП ( $Q_{open}$ ) и с подключением согла-

сованных нагрузок ( $Q_{load}$ ). Величина КСВ вычислялась по формуле:

$$КСВ_H = \frac{Q_{open} - Q_{load}}{Q_{load}} \quad (5)$$

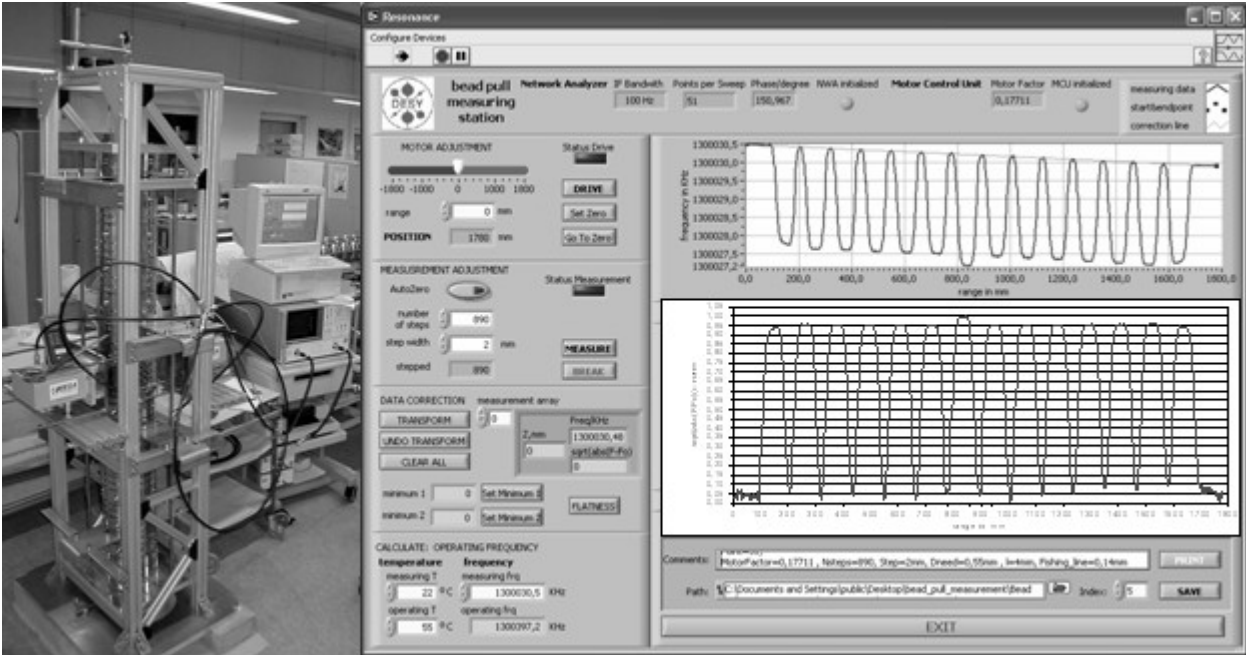


Рис.9. Фото измерительного стенда и распределение напряженности электрического поля вдоль структуры на оси  $E_z(z)$

Этот метод измерения значения КСВ через  $Q$ , завывшал значения КСВ на 2...3,5%, из-за слабой развязки петель связи (не более 58 дБ).

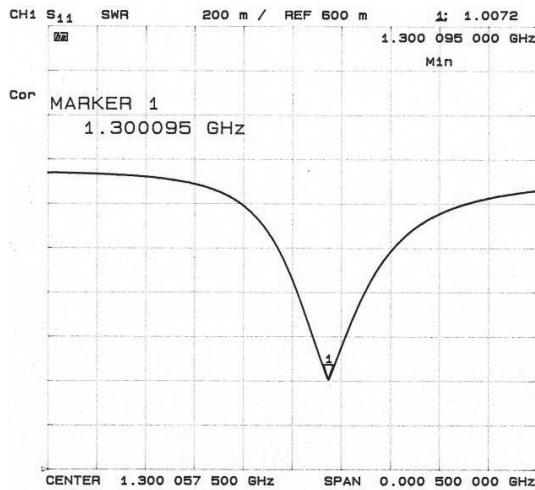


Рис.10. Значение  $КСВ_n$  ускоряющей структуры после 1-й подстройки ТТВ

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты как тест-программы, так и настройки резонатора, полностью подтверждают как особенность примененной ускоряющей структуры, так и обеспечение проектных параметров резонатора.

Закончены научно-технические разработки по структуре СДС. Проведены радиочастотные измерения на тестовом комплекте ячеек и ТТВ.

Новая технология изготовления ячеек позволила получить отличную повторяемость в основных раз-

мерах, что дало среднеквадратичный разброс по всему комплекту ячеек 40 кГц (при максимальных отклонениях 130 кГц) и 250 кГц для частот связи.

Измерены уходы частот при тестовой пайки в вакуумной печи и на индукционной установке при атмосфере с продувкой в газовой среде. Уход основной частоты -300 кГц, и частоты ячеек связи +1,4 МГц. Изготовлены рабочий комплект ячеек и узел ввода мощности на расчётную частоту  $f_{oper}$  650 кГц.

Ожидаемый  $КСВ_n$ , после пайки ТТВ (Рис.11), менее 1,1.

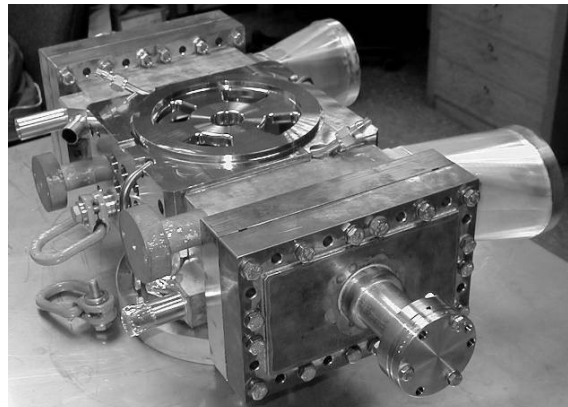


Рис.11. Узел ввода мощности после пайки

В плане 2007-2008 гг. – окончательная настройка структуры после пайки, монтаж на РИТЗ2 и ВЧ-тревнировка.

Дальнейшая настройка рабочей частоты резонатора при деформации ТТВ (+93 кГц), крайних ячеек (+22 кГц) и последняя – деформация глухих отвер-

стий рівномірно по структурі для рівномірного розподілення прискорюючого поля на робочій частоті.

Автори благодарять багатьох співробітників ІЯІ РАН і DESY в Цейтоне і Гамбурзі за обговорення і цінні пропозиції для проекту реалізації бустерного резонатора CDS.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A. Oppelt, et al. *Status and first results from the upgraded PITZ facility*. Proc. FEL 2005, Stanford, p.564, 2005.
2. V.V. Paramonov, et al. *Design Parameters of the Normal Conducting Booster Cavity for PITZ-2 Test Stand*. Proc. 2004, Linac Conference, 2004, p.204.
3. K. Floettmann, "ASTRA User Manual", [http://www.desy.de/~mpyflo/Astra\\_dokumentation/](http://www.desy.de/~mpyflo/Astra_dokumentation/)
4. V.V. Paramonov. *The Cut Disk Structure for High Energy Linacs*. Proc. 1997 PAC, 1998, v.3, p.2962.
5. K. Floettmann, V.V. Paramonov ed. *Conceptual design of a positron pre-accelerator for the TESLA linear collider*, TESLA 99-14, DESY, 1999.
6. A. Naboka, N. Holtkamp, et al. *S-Band Single Cell Diagnostic*. DESY Report M 96-03, DESY, 1996.

*Стаття надійшла в редакцію 11.09.2007 г.*

#### RESULTS OF CELLS TEST PROGRAM AND PITZ CDS CAVITY TUNING AT SIGNAL RF LEVEL

*A.N. Naboka, V.V. Paramonov, K. Floettmann*

For the first time on the basis of the connected cells the structure in which the considerable size of factor of communication (9%) is reached without accompanying reduction effective shunt impedance is realized. The resonator project of buster is realized for electron energy increase with 5 to 28 MeV in installation Photo Injector Test Facility (PITZ), DESY, Zeuthen which is intended for research of formation of electron bunches ultrahigh brightness and working out of injectors for modern projects X-FEL and ILC.

#### РЕЗУЛЬТАТИ НАСТРОЮВАННЯ РЕЗОНАТОРА БУСТЕРА PITZ І ПРОГРАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМІРОК НА НИЗЬКОМУ РІВНІ ВЧ-ПОТУЖНОСТІ

*A.N. Набока, В.В. Парамонов, К. Флоеттманн*

Вперше на основі зв'язаних комірок реалізована структура, у якій значна величина коефіцієнту зв'язку (9%) досягається без супутнього зменшення ефективного шунтового опору. Проект резонатора бустера реалізується для збільшення енергії електронів з 5 до 28 MeV в установці Photo Injector Test Facility (PITZ), DESY, Zeuthen, призначеної для дослідження формування пучків електронів понад високу яскравість і розробку інжекторів для сучасних проектів X-FEL і ILC.