

ЭЛЕМЕНТЫ УСКОРИТЕЛЕЙ

УДК 621.384.6

РЕЗУЛЬТАТЫ НАСТРОЙКИ ИНЖЕКТОРА ИНТЕНСИВНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

Н.И. Айзацкий, В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, С.А. Пережогин, Д.Л. Степин, В.Ф. Жигло

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина
E-mail: psa@kipt.kharkov.ua*

Приведены результаты настройки инжектора линейного ускорителя электронов десятисантиметрового диапазона. Описаны методика и результаты настройки резонансной системы инжектора и коаксиально-волноводного перехода для ввода ВЧ-мощности. Показано, что характеристики резонансной системы, в частности, распределение напряженности электрического поля, соответствуют расчетным данным. Проведены комплексные испытания магнитной системы.

ВВЕДЕНИЕ

Применение низковольтной электронной пушки в инжекторе резонансного электронного ускорителя позволяет повысить надежность его работы, а также уменьшить габариты инжектора и высоковольтного модулятора пушки. С другой стороны, применение низковольтных источников электронов требует для эффективной группировки и ускорения электронов использования систем с существенно неоднородным, нарастающим СВЧ-полем. Среди известных устройств этого типа рядом преимуществ обладают инжекторные системы, состоящие из цепочки связанных резонаторов, в которых возбуждаются нераспространяющиеся типы колебаний [1, 2]. Такие инжекторы могут быть использованы для формирования как слабых, так и интенсивных пучков. В последнем случае для уменьшения роста эмиттанса, вызываемого действием сил пространственного заряда, необходимо использовать магнитное поле. Ранее нами [3] разработан инжектор, обеспечивающий, согласно расчетам, фазовую ширину сгустков 18° и эмиттанс 12π -мм-мрад при индукции магнитного поля 0,15 Тл и токе пучка 1,5 А. Высокая энергия частиц (более 900 кэВ) и узкий энергетический спектр пучка (5,4%) позволяют вводить пучок в ускоряющую секцию с фазовой скоростью, равной скорости света. В этой статье приведены результаты настройки и предварительных испытаний этого инжектора.

КОНСТРУКЦИЯ ИНЖЕКТОРА

Инжектор (Рис.1) состоит из диодной электронной пушки 1 на напряжение 25 кВ, цилиндрического резонатора предварительной группировки 2, группирующей системы 3 с коаксиально-волноводным переходом 4 для ввода СВЧ-мощности и магнитной системы 5 в виде секционированного соленоида.

В пушке используется плоский импрегнированный катод диаметром 14 мм с плотностью тока эмиссии 1 А/см^2 . Расчет геометрии электродов электронной пушки производился по программе EGUN [4]. Несмотря на незначительную плотность тока, используется конструкция пушки разборного типа, что позволяет легко производить замену катода без последующей юстировки пушки. Такое устройство

пушки имеет достоинство при использовании ее в ускорителях технологического применения, работающих, как правило, в невысоком вакууме ($\sim 10^{-6}$ Торр), что снижает ресурс работы катода.

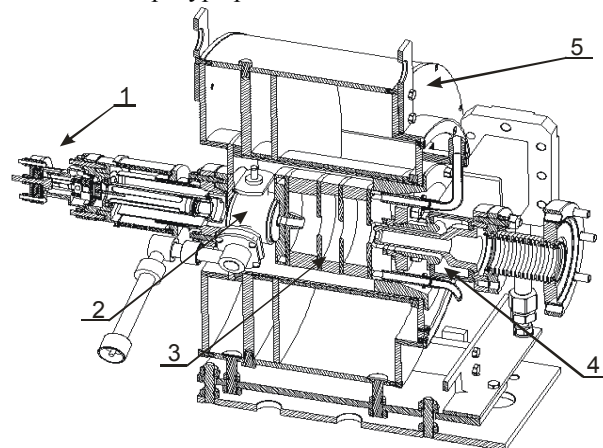


Рис.1. Схема инжектора электронов

Предварительный группирователь и группирователь изготавливаются из бескислородной меди в виде одного неразъемного блока (элементы инжектора до пайки показаны на Рис.2). СВЧ-мощность подводится к резонатору предварительного группирователя с помощью коаксиальной линии, нагруженной на петлю связи. Диаметр этого резонатора уменьшен за счет введения конструктивной емкости, выполненной в виде конусных вставок. Группирователь состоит из трех связанных резонаторов, образующих резонансную систему на нераспространяющемся типе колебаний, в которой реализовано нарастающее распределение поля. СВЧ-мощность группирователя подается с помощью волновода 72×34 и коаксиально-волноводного перехода [5]. Резонансная система выполнена по схеме «диск-кольцо». Для возможности дополнительной подстройки частоты резонаторов после пайки путем изменения их радиуса в кольцах выполнен ряд глухих отверстий. Все СВЧ-элементы выполнены из меди МБ, фланцы - из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, магнитные элементы - из электро-технической стали 10860. Обмотки магнита выполнены из медной трубки с внутренним диаметром 8 мм и наружным 10 мм. Обмотки включаются по-

следовательно. Охлаждение обмоток осуществляется водой. Инжектор крепится на платформе с устройствами для юстировки.

НАСТРОЙКА ВВОДА СВЧ-МОЩНОСТИ И РЕЗОНАНСНОЙ СИСТЕМЫ

Коаксиальный ввод СВЧ-мощности в резонансную систему инжектора и коаксиально-волноводный переход (КВП) пуговичного типа выполнены в виде единого узла. Для согласования перехода на этапе предварительных испытаний предусмотрен подвижный короткозамыкающий поршень, который в окончательной сборке заменяется короткозамкнутым отрезком волновода. Более детально конструкция и методика настройки подобного КВП изложены в [5]. После настройки КВП коэффициент стоячей волны (КСВ) на рабочей частоте $f = 2797,15$ МГц не превышал 1,1.

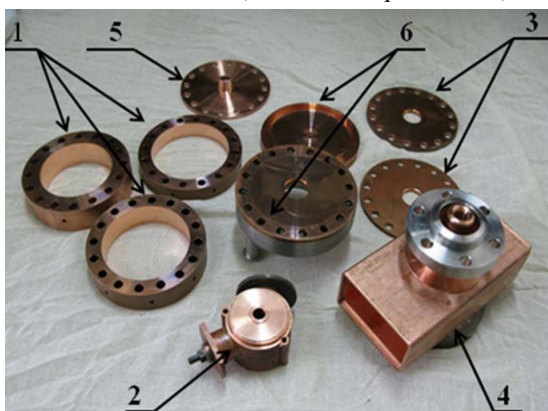


Рис.2. Элементы резонансной системы инжектора и коаксиально-волноводного перехода: 1 – резонаторы (№1, №2, №3); 2 – предгруппирователь; 3 – диски; 4 – коаксиально-волноводный переход; 5 – торцевая крышка первого резонатора; 6 – коллектор

После изготовления составных частей предварительного группирователя и группирователя, проведена предварительная настройка резонансной системы. Методика настройки основывается на одновременном использовании программы SUPERFISH [6], которая рассчитывает собственные частоты аксиально-симметричных ТМ-колебаний, и данных высокочастотных измерений резонаторов. Были измерены собственные частоты всех резонаторов группирователя и с помощью SUPERFISH определены соответствующие им радиусы резонаторов. При подстановке найденного радиуса для резонатора №1 в расчетный макет SUPERFISH «рез. №1+торцевая крышка» получили расчетное значение $f_p = 2537,54$ МГц, а результат измерений $f_n = 2528,762$ МГц, т.е. отличие составило 8,69 МГц. Поэтому в данном макете требовалась дообработка конусной части торцевой крышки. Аналогичным образом была проведена настройка макета «рез. №3+торцевая крышка». Торцевая крышка резонатора №3 представляет собой диск, напаянный на коллектор охлаждения. В данном случае потребовалось увеличить радиус отверстия в торцевой крышке. Учет неточности изготовления дисков, разделяющих резонаторы, осуществлялся следующим образом. Проводились измерения собственных частот

макета, состоящего из двух резонаторов (№2 и произвольного резонатора с известной собственной частотой), разделенных исследуемым диском. С помощью SUPERFISH создавался расчетный макет этой резонансной системы, и подбирался радиус отверстия в диске так, чтобы расчетная частота соответствовала измеренному значению. Такая же операция проводилась и с другим диском. Подставив уточненные радиусы отверстий в расчетный макет резонансной системы инжектора и согласовав распределение поля с необходимым, были определены собственные частоты резонаторов. В таблице представлены измеренные и расчетные значения частот резонаторов после дообработки.

Резонатор	f_n , МГц	f_p , МГц
№1+торцевая крышка	2530,65	2530,4499
№2	2678,2681	2678,2292
№3	2733,5844	2733,9377
№3+торцевая крышка	2762,3899	2762,746

На основании полученных результатов проведена окончательная дообработка резонаторов, после чего резонансная система паялась в вакуумной печи с применением припоя на основе серебра (Рис.3).



Рис.3. Группирующая система инжектора после пайки

После пайки проводились СВЧ-измерения параметров и окончательная настройка резонансной системы. Особое внимание было уделено измерению распределения напряженности электрического поля на оси системы. При этом измерения проводились на всех типах колебаний. Необходимость таких измерений связана с малостью амплитуды поля в первом резонаторе относительно поля в третьем резонаторе ($\sim 10^{-2}$). Поэтому ее сложно определить с достаточной точностью при измерениях на основном типе колебаний. В то же время измерения распределения поля на низших типах колебаний позволяют оценить амплитуду поля в первом резонаторе и сделать вывод о соответствии расчетных и реальных размеров резонаторов. На Рис.4-6 представлены измеренные и рассчитанные распределения амплитуды

ды электрического поля на оси резонансной системы на трех типах колебаний.

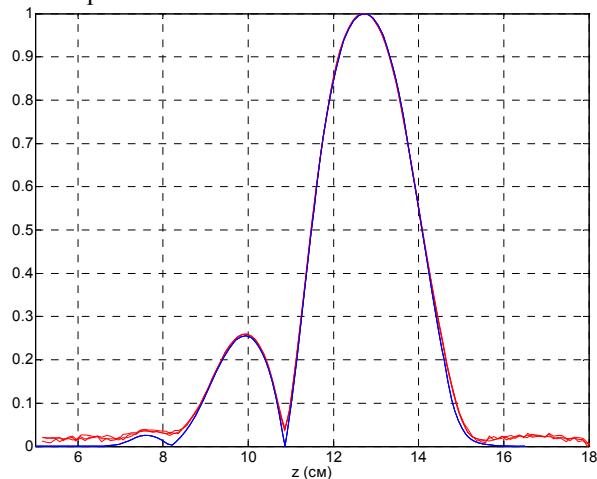


Рис.4. Распределение амплитуды поля на оси $f= 2797,15$ МГц (рабочий тип колебаний)

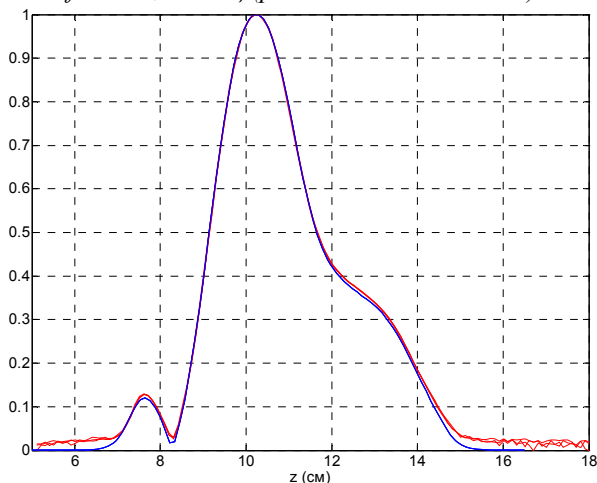


Рис.5. Распределение амплитуды поля на оси $f= 2750,441$ МГц

Видно, что измеренное распределение поля на всех типах колебаний соответствует рассчитанному распределению поля. На рабочей частоте инжектора 2797,15МГц собственная и нагруженная добротности резонансной системы составляют 11000 и 1900 соответственно.

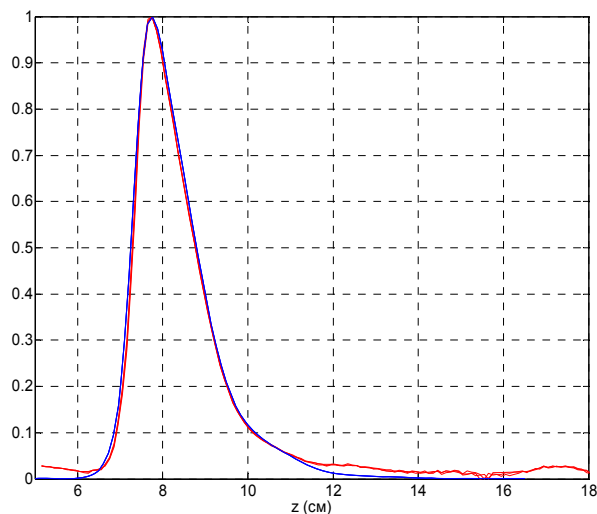


Рис.6. Распределение амплитуды поля на оси $f=2572,2$ МГц

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Расчет магнитного поля соленоида инжектора проводился с помощью программы POISSON/SUPERFISH [6]. Коэффициент теплопередачи из медной трубки в воду вычислялся по известным эмпирическим зависимостям для турбулентного течения в трубе. При вычислении гидравлического сопротивления обмотки использовались справочные данные для змеевиков [7].



Рис. 7. Общий вид инжектора с соленоидом

Испытания соленоида (Рис.7) показали, что при индукции 0,171 Тл потребляемая мощность составила 4 кВт, а нагрев воды - 20°C при расходе 3 кг/мин. Потеря давления при этом - $1,7 \cdot 10^5$ Па. Расчетные значения этих величин при такой же индукции магнитного поля составляют 5 кВт, 3,5 кг/мин и $1,9 \cdot 10^5$ Па соответственно. Несовпадение расчетных и измеренных данных объясняется отсутствием точных сведений по электропроводности медной трубки, плотности ее намотки и ошибками эмпирических зависимостей гидравлической проводимости от скорости потока.

При входной температуре воды 30°C и указанном выше нагреве, температура выходной воды составляет 50°C, что выше рабочей температуры группирующей системы, равной 40°C. Измерения показали, что благодаря достаточному потоку воды в каналах резонаторов, их дополнительный нагрев соленоидом является незначительным и легко может быть устранен введением коррекции в системе термостатирования резонансной системы.

Результаты измерений зависимости индукции магнитного поля от продольной координаты и тока соленоида (Рис.8 и Рис.9) позволяют сделать вывод о малой степени насыщения материала магнитопровода. Видно, что в пределах погрешности измерений $\pm 1,5\%$ экспериментальные данные совпадают с расчетом.

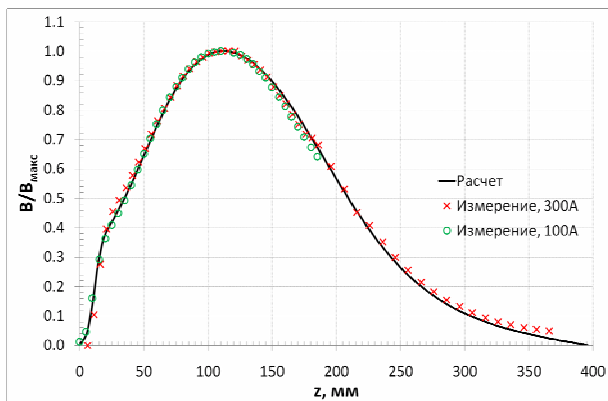


Рис.8. Измеренное и расчетное распределения индукции продольного магнитного поля вдоль оси инжектора при токах возбуждения 100 и 300 А

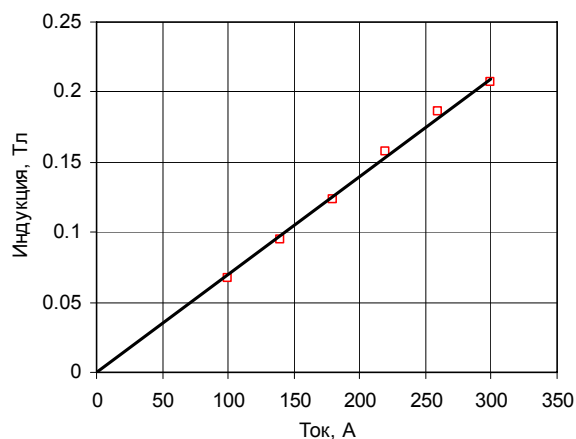


Рис.9. Зависимость индукции в максимуме распределения от тока соленоида. Точки - измерения, линия - аппроксимация

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена настройка резонансной системы инжектора и коаксиально-волноводного перехода для ввода СВЧ-мощности. Предложенная методика настройки обеспечила хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных. Так, результаты измерения распределения продольного электрического поля на оси системы в пределах погрешности измерений совпадают с расчетом. Проведены испы-

тания соленоида инжектора. Результаты экспериментального исследования теплового и гидравлического режимов работы и измерения распределения магнитного поля подтверждают правильность расчетных моделей и допущений при конструировании соленоида. В настоящее время инжектор установлен на испытательный стенд для экспериментального исследования характеристик ускоренного пучка электронов.

Работа выполнена при частичной поддержке НАН Украины, проект X-9-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. M.I. Ayzatskiy, E.Z. Biller, V.A. Kushnir, et al. Bunching systems of electrons on base evanescent waves // PAC'03, Portland. 2003, p.1605-1607.
2. V.V. Mytrochenko, M.I. Ayzatskiy. Injector of Intense Electron Beam // Proc. LINAC 2008. Victoria, British Columbia, Canada. 2008, p.431-433.
3. Н.И. Айзацкий, В.Ф. Жигло, В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, С.А. Пережогин. Разработка инжектора интенсивного пучка электронов // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования» (54). 2010, № 3, с.22-25.
4. W.B. Herrmannsfeldt. EGUN: Electron Optics Program. Stanford Linear Accelerator Center, 1994, SLAC-PUB-6729.
5. Н.И. Айзацкий, П.Г. Гуртовенко, В.Ф. Жигло и др. Компактный инжектор электронов для линейного резонансного ускорителя 10 см-диапазона // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования» (49). 2008, №3, с.68-72.
6. J.H. Billen and L.M. Young. POISSON/SUPERFISH on PC compatibles. PAC'93, Washington, 1993, p.790-792.
7. И.Е. Идельчик. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: «Машиностроение». 1992, с.672.

Статья поступила в редакцию 08.02.2012 г.

THE RESULTS OF TUNING OF INTENSE ELECTRON BEAM INJECTOR

M.I. Ayzatskiy, V.A. Kushnir, V.V. Mytrochenko, S.A. Perezhogin, D.L. Stepin, V.Ph. Zhiglo

The results of tuning of injector of powerful electron linac are presented in the report. The injector consists of a diode electron gun, the klystron type prebuncher, the three-cavity buncher and magnetic system. There has been described the methodology and results of tuning of the resonance system of injector and coaxially waveguide transition for RF-power input. It has been shown that descriptions of the resonance system, in particular distributing of electric-field tension, correspond the calculated data. The complex testing of the magnetic system has been conducted.

РЕЗУЛЬТАТИ НАЛАГОДЖЕННЯ ІНЖЕКТОРА ІНТЕНСИВНОГО ПУЧКА ЕЛЕКТРОНІВ

М.І. Айзацький, В.А. Кушнір, В.В. Митроченко, С.А. Пережогін, Д.Л. Степін, В.Ф. Жігло

Приведені результати налагодження інжектора лінійного прискорювача електронів 10 см-діапазону. Описані методика і результати налагодження резонансної системи інжектора і коаксиально-хвильового переходу для введення ВЧ-потужності. Показано, що характеристики резонансної системи, зокрема, розподіл напруженості електричного поля, відповідають розрахунковим даним. Проведені комплексні випробування магнітної системи.