

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ «BEAM SCANNING» ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА И КОНТРОЛЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ РАЗВЕРТКИ С ПОМОЩЬЮ ЦИЛИНДРА ФАРАДЕЯ И КРАЕВЫХ ДАТЧИКОВ ТОКА

П.А. Быстров

*Московский радиотехнический институт Российской Академии Наук
E-mail: bpeter@mail.ru;*

Представлены результаты моделирования ряда экспериментов, полученные в ходе разработки методики и устройства для контроля за параметрами электронного пучка в компактной радиационной стерилизационной установке. Расчеты проводились при помощи разработанной в МРТИ программы «BEAM SCANNING». Предложен способ получения спектра пучка электронов путем моделирования экспериментов, в которых получены осциллограммы тока с цилиндра Фарадея. Представлены предварительные результаты. Проведено моделирование экспериментов, в которых пучком облучались свинцовые пластины, предложенные в качестве датчиков тока. Результаты представлены в сравнении с экспериментальными данными. Также представлены результаты расчетов работы устройства, контролирующего систему развертки.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективная работа компактной радиационной стерилизационной установки на основе линейного электронного СВЧ-ускорителя на стоячей волне с местной биозащитой [1, 2] требует постоянного оперативного контроля за параметрами электронного пучка и за работой системы развертки. Наличие биозащиты осложняет установку измерительных приборов вблизи выходного окна раструба ускорителя, поэтому на установке могут быть использованы либо стационарные датчики, предусмотренные конструкцией и установленные при сборке, либо приборы, вводимые в камеру установки посредством ее транспортной системы (конвейера).

Наиболее удобным для применения и простым в использовании является «цилиндр Фарадея» – алюминиевая толстостенная коробка, закрываемая сверху пластиной выбранной толщины и вводимая в камеру при помощи конвейера установки. Снятие осциллограмм токов пучка с цилиндра Фарадея и с закрывающей пластины позволяет через их соотношение оценивать эффективную энергию электронов пучка. Обработка этих осциллограмм, снятых при больших амплитудах угла отклонения пучка в системе развертки на протяжении нескольких циклов развертки, с помощью программы «BEAM SCANNING» [3, 4] позволяет определить энергетический спектр пучка.

Другой важной задачей является контроль за работой системы развертки установки. Для этой цели предложено стационарно установить так называемые «датчики превышения амплитуды угла развертки», сделанные в виде металлических пластин, расположенных по краям окна выхода раструба ускорителя. Попадание пучка на эти пластины фиксируется с помощью осциллографа. Появление сигнала указывает на достижение максимально допустимого угла отклонения пучка. В статье представлены результаты вычислений для осциллограмм сигналов с таких датчиков, а также результаты моделирования ряда предварительных экспериментов с помощью программы «BEAM SCANNING». Эксперименты

состояли в измерении токов, снимаемых с цилиндра Фарадея и с пластин датчиков, установленных в центре и с краю цилиндра непосредственно над его поверхностью.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА ПУЧКА

На Рис. 1 показана схема установки и расположения цилиндра Фарадея (элемент 12) при проведении эксперимента по определению спектра пучка. Способ определения спектра аналогичен представленному в работе [5], с той разницей, что для снятия характеристики, необходимой для получения спектра используется цилиндр Фарадея (12) вместо индукционного датчика (6). Толщина стенок цилиндра обеспечивает захват тока всего попавшего в цилиндр пучка.

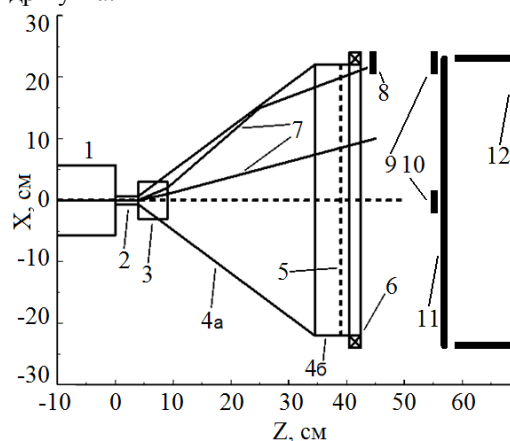


Рис. 1. Схема установки датчиков и цилиндра Фарадея: 1 – ускоритель; 2 – трубка; 3 – магнит; 4, а, б – стенки раструба; 5 – фольга окна вывода; 6 – индукционный датчик; 7 – траектории электронов; 8 – краевой стационарный датчик; 9, 10 – датчики в эксперименте; 11 – пластина, закрывающая цилиндр; 12 – цилиндр Фарадея

Результатом действия магнитного поля системы развертки на пучок электронов являются отклонение и расширение пучка в плоскости, перпендикулярной полю, в соответствии с его энергетическим спектром: электроны малых энергий отклоняются на больший

угол. По достижению цилиндра Фарадея (12) ток пучка оказывается рассредоточенным по его поверхности (11), что вызывается как различием углов отклонения электронов разных энергий, так и рассеянием пучка на фольге (5) окна вывода ускорителя.

По мере роста магнитного поля системы развертки растет и площадь покрываемой пучком поверхности цилиндра Фарадея. Одновременно с этим пятно, покрываемое пучком, смещается к краю поверхности цилиндра, при этом все большая часть электронов выходит за ее пределы. Это вызывает падение амплитуды импульсов тока, снимаемого с цилиндра при увеличении отклоняющего магнитного поля, видное на осциллограмме (Рис. 2). При высоких значениях магнитного поля пучок уже не попадает в окно вывода, в результате чего на осциллограмме остается только небольшой «хвост», вызванный током электронов, отраженных от стенок раструба ускорителя.

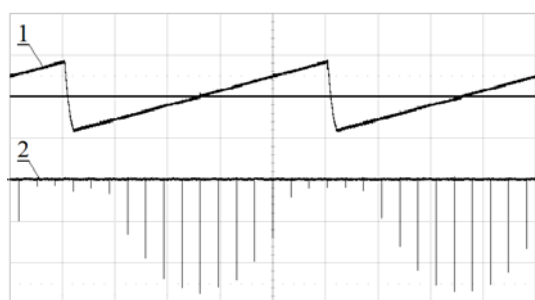


Рис. 2. Осциллограмма тока, снятого с цилиндра Фарадея при использовании завышенной амплитуды отклоняющего поля системы развертки: 1 – ток магнита; 2 – ток с цилиндра Фарадея. Тонкие пики на осциллограмме соответствуют импульсам тока, создаваемого попавшими в цилиндр импульсами пучка. Горизонтальные линии на обеих осциллограммах соответствуют нулю тока

Для определения спектра пучка описанный выше эксперимент моделируется в программе «BEAM SCANNING» для различных возможных рассчитанных спектров пучков, соответствующих различным режимам работы ускорителя установки в изучаемых условиях [6]. Программа вычисляет ток, снимаемый с цилиндра Фарадея, и строит кривую зависимости этого тока от магнитного поля. Лучшее совпадение экспериментальной и расчетной кривых указывает на искомый спектр. Эта расчетная кривая для спектра, давшего лучшее совпадение, показана на Рис. 3. Представленная там же экспериментальная кривая была собрана из осциллограмм для нескольких циклов развертки, полученных из проведенных ранее в МРТИ измерений.

Метод, представленный выше, менее точен, чем в случае использования индукционного датчика, расположенного непосредственно на выходе ускорителя [5], из-за наличия рассеяния электронов на фольге и в воздухе при распространении к цилиндру, которое вносит искажения. Для оценки влияния этих искажений на Рис. 3 представлена кривая, построенная для моноэнергетического спектра, которая при отсутствии рассеяния электронов на фольге выглядела бы как вертикальная ступенька на графике. Однако, эти искажения не оказывают сильного

влияния на конечный результат, поскольку требуемый спектр находится путем подбора кривой, дающей лучшее совпадение экспериментальной и расчетной зависимостей тока с цилиндра Фарадея от величины магнитного поля, а не путем непосредственной обработки снятой экспериментальной кривой. С другой стороны в этом методе влияние отраженных электронов меньше, чем в методе, описанном в [5], что является его преимуществом.

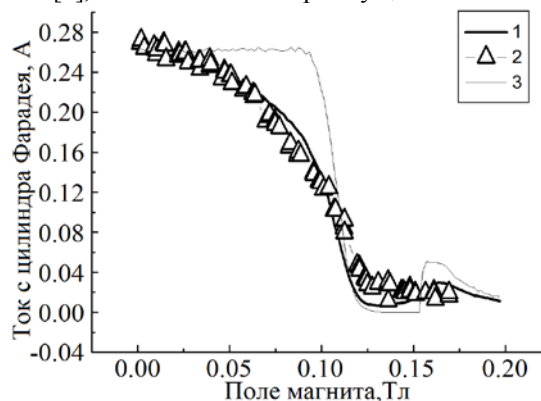


Рис. 3. Зависимость тока с цилиндра Фарадея от магнитного поля магнита системы развертки. 1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая, полученная с помощью программы «BEAM SCANNING»; 3 – кривая, рассчитанная для моноэнергетического пучка. Подъем кривых при больших значениях поля связан с влиянием отраженных электронов, которое подробно описано в [5]

На Рис. 4 представлен найденный по этой методике спектр пучка ускорителя стерилизационной установки.

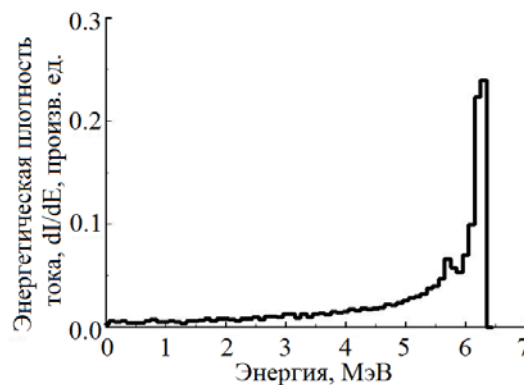


Рис. 4. Найденный спектр ускорителя установки

2. КРАЕВЫЕ ДАТЧИКИ ТОКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СИСТЕМЫ РАЗВЕРТКИ

В работе над созданием стационарных датчиков амплитуды угла развертки были проведены предварительные вычисления по поиску оптимального местоположения для металлических пластин, воспринимающих ток пучка и используемых в качестве датчиков. Для минимизации влияния рассеяния электронов на фольге, выражающегося в снижении тока с пластин, их следует установить непосредственно у окна вывода ускорителя так, чтобы датчик прикрывал окно вывода у края раструба (деталь 8 на Рис. 1). При таком его расположении пучок, расширяясь и отклоняясь в сторону датчика с ростом поля магнита, облучает всё большую поверхность пла-

стины, в результате чего на осциллограмме должна появляться плавно возрастающая по амплитуде серия импульсов.

В программе «BEAM SCANNING» был смоделирован процесс работы установки с такой амплитудой угла развертки пучка, при которой достигалась хорошая однородность и высокий КПД облучения. Для этого режима работы системы развертки было найдено оптимальное расположение датчика и рассчитаны осциллограммы сигналов, снимаемых с него и с цилиндра Фарадея.

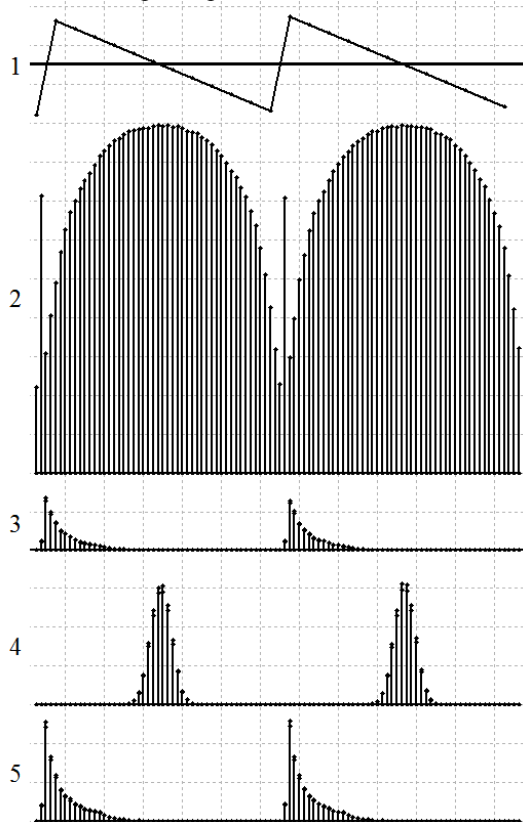


Рис. 5. Расчетные осциллограммы тока отклоняющего магнита (1), сигналов с цилиндра Фарадея (2), с пластин, расположенных на краю (3) и в центре (4) цилиндра, и со стационарного датчика (5)

Таким образом, настройка амплитуды угла развертки должна производиться путем регулировки, до достижения соответствия относительных амплитуд сигнала на рассчитанной и фактической осциллограммах с датчика и с цилиндра Фарадея. На Рис. 5 представлены рассчитанные осциллограммы сигналов с датчика и цилиндра (осциллограммы 5 и 2 соответственно). При оптимальной амплитуде угла развертки максимальная амплитуда сигнала с датчика должна составлять от трети до половины максимальной амплитуды с цилиндра Фарадея.

Были также промоделированы проведенные в МРТГ предварительные эксперименты по подбору материала и размеров датчиков. Схема экспериментов представлена на Рис. 1. В экспериментах измерялись максимальные амплитуды напряжения импульсов на шунте сопротивлением 25 Ом для токов с цилиндра Фарадея (элемент 12) и с пластин, расположенных на краю (9) и в центре (10). Пластины располагались поперек цилиндра Фарадея непосредственно над его поверхностью.

В экспериментах использовались свинцовые пластины толщиной 10 мм и шириной 20 мм, поскольку датчики меньших размеров или меньшей плотности давали слабый сигнал, который было трудно различить среди шумов. Измерения проводились для двух значений мощности установки (токов пучка) и с заниженной частотой следования 6-микросекундных импульсов пучка, составляющей 60 Гц, в то время как расчеты проводились для рабочих частот, составляющих около 300 Гц. Результаты измерений представлены в таблице.

Измеренные максимальные амплитуды напряжения на шунте 25 Ом для токов с цилиндра Фарадея и с пластин, расположенных на краю и в центре у его поверхности

Уровень мощности установки (ток пучка)	Максимальная амплитуда сигнала, В			
	Датчик в центре		Датчик на краю	
	Цилиндр	Датчик	Цилиндр	Датчик
Уровень 1	3	0,8	3	0,4
Уровень 2	5,5	1,8	5	0,5

При помощи программы «BEAM SCANNING» были промоделированы проведенные эксперименты, и был рассчитан сигнал, поступающий с датчиков на осциллограф. На Рис. 5 показаны вычисленные осциллограммы для сигналов с датчиков (осциллограммы 3, 4), использованных в эксперименте. Моделирование проведенных экспериментов и работы стационарного датчика проводилось для режима работы установки, приближенного к экспериментальному, но для рабочей частоты следования импульсов пучка. Как видно из сравнения осциллограмм, расчетная форма сигнала для краевого датчика близка к форме сигнала стационарного датчика. Рассчитанные соотношения амплитуд токов с датчиков и с цилиндра Фарадея (см. Рис. 5) находятся в согласии с экспериментом.

ВЫВОДЫ

В проведенных расчетах продемонстрирована возможность определения спектра пучка с помощью осциллограмм тока, снятых с цилиндра Фарадея, путем моделирования измерений с помощью программы «BEAM SCANNING». Достигнуто хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Хорошо согласуются с экспериментами результаты расчетов по определению величины тока, снимаемого с металлических пластин, облучаемых пучком. В расчетах показана работоспособность датчика превышения амплитуды угла развертки.

Таким образом, программа «BEAM SCANNING» позволяет моделировать эксперименты и осуществлять настройку установки, представляет собой "компьютерный инструмент", с помощью которого можно как интерпретировать экспериментальные данные, полученные при работе стерилизационной установки, так и формировать предложения по совершенствованию ее конструкции и модернизации системы развертки электронного пучка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V.M. Belugin, A.V. Mischenko, V.M. Pirozhenko, N.E. Rozanov, A.A. Zavadtsev, A.N. Korolev, K.G. Simonov. Compact electron linacs for radiation technology systems // *Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference*. 2001, v. 4, p. 2515-2517.
2. V.M. Belugin, V.M. Pirozhenko, N.E. Rozanov. Self-shielded electron linac accelerators for radiation technologies // *Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams*. 2009, v. 12, iss. 9 (090101), p. 1-8.
3. П.А. Быстров, Н.Е. Розанов. Методика и программа "BEAM SCANNING" расчета процессов в системе развертки релятивистского электронного пучка с широким энергетическим спектром // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2012, №4, с. 87-91.
4. П.А. Быстров, Н.Е. Розанов. Модель облучения электронным пучком трехмерного объекта в стерилизационной установке с местной биозащитой // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2014, №3, с. 128-133.
5. М.А. Алексеев, П.А. Быстров, Н.Е. Розанов. Моделирование процесса измерения энергетического спектра электронного пучка методом магнитного анализатора на основе системы развертки стерилизационной установки // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2013, т. 4, №4, с. 361-364.
6. Н.Е. Розанов. Компьютерные программы DINA для расчета динамики сильнооточных пучков в линейных ускорителях // *Научная сессия МИФИ-2003*, М.: «МИФИ». 2003, т. 7, с. 167-168.

Article received 23.12.2013

APPLYING THE COMPUTER CODE "BEAM SCANNING" FOR OBTAINING THE ELECTRON BEAM ENERGY SPECTRUM AND MONITORING THE BEAM SCANNING SYSTEM WITH A FARADAY CUP AND EDGE CURRENT SENSORS

P.A. Bystrov

The results of experiments simulation, obtained in the development of technique for controlling the parameters of the electron beam in a compact radiation sterilization installation are presented. Calculations were performed with a help of a computer code "BEAM SCANNING", developed in MRTI. Proposed a method to obtain the spectrum of the electron beam by simulation the experiments in which a Faraday cup waveforms were measured. Preliminary results are presented. Also the results of the experiments and calculations obtained in the development of the amplitude angle sensors are presented. The experiments for the beam irradiation of lead plates proposed as current sensors were modeled. Results are presented in comparison with experimental data. Also are presented the simulation results for the device designed to control scanning system.

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМИ «BEAM SCANNING» ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРА ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА І КОНТРОЛЮ РОБОТИ СИСТЕМИ РОЗГОРТКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ЦИЛІНДРА ФАРАДЕЯ І КРАЙОВИХ ДАТЧИКІВ СТРУМУ

П.А. Бистров

Представлено результати моделювання ряду експериментів, що отримані в ході розробки методики і пристрою для контролю за параметрами електронного пучка в компактній радіаційній стерилізаційній установці. Розрахунки проводилися за допомогою розробленої в МРТІ програми «BEAM SCANNING». Запропоновано спосіб отримання спектра пучка електронів шляхом моделювання експериментів, в яких отримано осцилограми струму з циліндра Фарадея. Представлені попередні результати. Проведено моделювання експериментів, в яких пучком опромінювалися свинцеві пластини, запропоновані в якості датчиків струму. Результати представлено в порівнянні з експериментальними даними. Також представлено результати розрахунків роботи пристрою, що контролює систему розгортки.