

Портативный линейный ускоритель электронов 3-см диапазона для неразрушающего контроля

А.Я. Саверский, А.Е. Родионов, А.П. Шалтырев, И.С. Щедрин
*Московский государственный инженерно-физический институт
(технический университет), Россия*

Основные характеристики, компоновка ускорителя

Создание портативных дефектоскопов на базе линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) с энергией 1–5 МэВ является перспективной задачей для неразрушающего контроля толстостенных изделий. Разработка таких установок осуществляется как в России, так и за рубежом [1, 2]. Использование ЛУЭ 3-см диапазона позволяет минимизировать массу и габариты ускоряющей системы. Большинство ЛУЭ 3-см диапазона, разработанных до настоящего времени в Малой ускорительной лаборатории МИФИ обладали существенным недостатком. Габариты и масса вспомогательного оборудования (вакуумного насоса, высоковольтного модулятора с питанием 400 Гц) не позволяли создать автономную портативную установку для дефектоскопии, отвечающую современным требованиям.

При разработке ЛУЭ 3-см модели У-34 предпринята попытка минимизации габаритов и общей массы установки с целью создания транспортабельного дефектоскопа с питанием от однофазной сети 220 В х 50 Гц и следующими характеристиками:

Энергия электронного пучка, МэВ	0,7...1,8
Средний ток пучка, мкА	10...80
Максимальная мощность дозы тормозного излучения, Р/мин/м	20
Диаметр пучка на мишени, мм	<2

Ускоритель состоит из четырех блоков. В блоке “Излучатель” (масса не более 100 кг, габаритные размеры 0,7*0,7*1,0 м) размещены ускоряющая и фокусирующая системы, инжектор электронов, вакуумный насос, СВЧ-тракт с магнетроном импульсной мощностью 500 кВт, импульсный трансформатор и тормозная мишень. Питание магнетрона и инжектора обеспечивается блоком “Модулятор”, масса которого не превышает 70 кг. Охлаждение ЛУЭ автономное. Пульт управления позволяет осуществлять контроль и управление характеристиками ЛУЭ в полуавтоматическом режиме.

Ускоряющая и фокусирующая системы

Ускоряющая секция на основе КДВ с бегущей волной при импульсном токе $I = 100$ мА позволяет получить энергию $W = 1,5$ МэВ и спроектирована для следующих начальных данных: энергия инжекции 28 кэВ; импульсная

мощность СВЧ-питания 450 кВт; рабочий вид колебаний $2\pi/3$; рабочая частота генератора СВЧ 9362 МГц; длина КДВ 420 мм.

Регулировка энергии и тока ускоренного пучка достигается изменением частоты магнетрона и величины тока инжекции. Результаты расчета выходных характеристик при изменении частоты СВЧ-генератора приведены на рис.1. Графики построены для трех значений ускоренного тока и мощности СВЧ-питания 450 кВт. Нагрузочные характеристики для различных уровней мощности представлены на рис. 2. Расчеты проводились с помощью пакета DINUS [3].

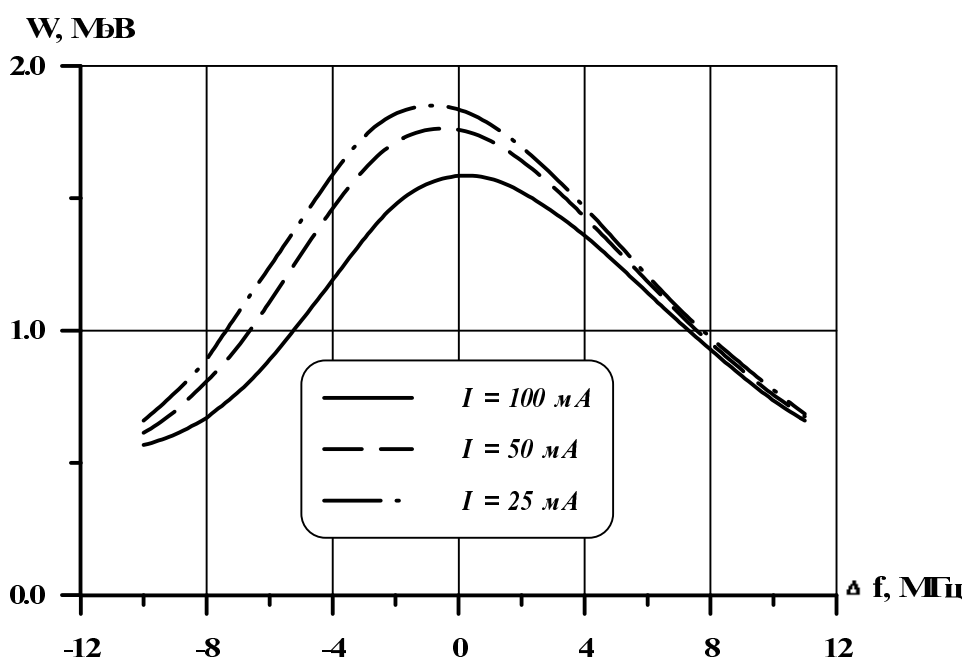


Рис.1. Графики зависимости средней энергии ускоренного пучка от частоты магнетронного СВЧ-генератора.

Расчеты поперечной динамики проводились с целью проектирования фокусирующей системы, позволяющей реализовать указанные значения тока ускоренного пучка. Продольное фокусирующее поле обычно создается с помощью соленоидов или постоянных магнитов. Предыдущие модели ЛУЭ 3-см диапазона имели в основном электромагнитную фокусирующую систему. Основные недостатки соленоидальных фокусирующих катушек заключаются в их значительных поперечных размерах, сравнимых с продольным размером ускоряющей системы, большой массе, в потреблении ими существенной мощности в процессе работы.

Поэтому с целью преодоления указанных недостатков в некоторых моделях ускорителей, например У-18, У-32, У-36, использовалась магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС), создающая синусоидальное распределение продольного магнитного поля вдоль оси КДВ и позволяющая обеспечивать заданные характеристики пучка при меньшем значении

индукции магнитного поля B . Однако подбор размеров кольцевых магнитов в пакетах, их расстановка на корпусе ускоряющего волновода осуществлялись исключительно экспериментальным образом, без предварительного расчета фокусирующей системы.

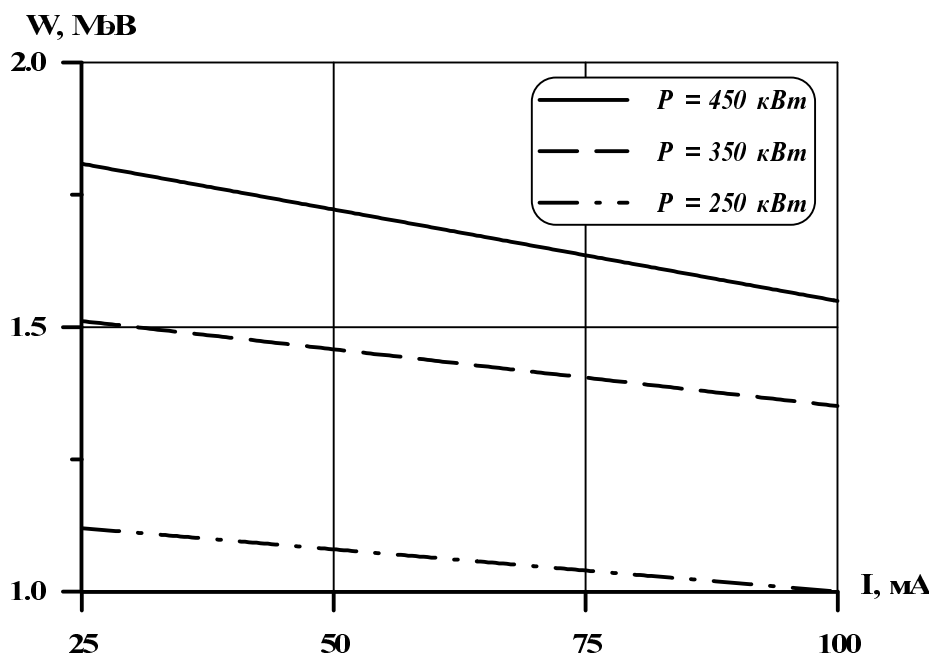


Рис.2. Нагрузочные характеристики ЛУЭ.

При проектировании описываемого ЛУЭ на ЭВМ IBM 4381 выполнены численное моделирование радиальной динамики частиц и расчет фокусирующей системы из постоянных магнитов с помощью программы DYN2 [3]. Расчеты выполнялись в предположении, что на вход ускорителя поступает поток электронов, у которых значения поперечных и азимутальных импульсов равны нулю.

В результате обнаружено, что для каждой пары значений периода магнитного поля L и его амплитудного значения B существует локальный оптимум для максимального радиуса частиц пучка. Найден удовлетворительный вариант фокусирующей системы, которая обеспечивает на выходе ЛУЭ пучка электронов диаметром до 2 мм, а потери тока не превышают 20%.

Данный вариант МПФС содержит 18 пакетов магнитов из сплава неодим-железо-бор. На один период магнитного поля приходится по 2 магнита. Длина периода магнитной системы L принимает значения 36; 48; 52 мм, а значения амплитуды индукции магнитного поля составляет соответственно 0,20; 0,21; 0,20 Тл.

Инжектор электронов разработан на основе серийной электронной трехэлектродной пушки для электронно-лучевой сварки ЭОСС-2. Управление

пучком ЛУЭ осуществляется подачей запирающего напряжения на управляющий электрод пушки.

Вспомогательные системы ЛУЭ

Электропитание всех основных элементов энергопотребления ускорительной установки осуществляет единая система, включающая в себя высоковольтный импульсный модулятор магнетронного СВЧ-генератора и инжектора электронов, высоковольтные источники питания модулятора, источники питания накальных цепей магнетрона и инжектора.

При разработке модулятора за основу была принята классическая схема линейного модулятора с резонансным зарядом емкостного накопителя энергии - формирующей линии - от высоковольтного источника постоянного напряжения через дроссель, и ее полным разрядом через тиратронный коммутатор и выходной повышающий импульсный трансформатор. Плавная регулировка выходного напряжения высоковольтного источника достигается изменением тока подмагничивания дросселя насыщения в первичной обмотке силового трансформатора.

Откачка ускоряющей системы осуществляется магнитоэлектронным диодным насосом НМРД-10. Использование металлических уплотнений в конструкции ускоряющей системы позволяет эксплуатировать ускоритель без средств предварительной откачки. Цеолитовый насос используется при профилактических работах и подключается через высоковакуумный вентиль.

Система водяного охлаждения обеспечивает на входе ускоряющей секции и магнетрона температуру водяного потока $T = 45^{\circ}\text{C}$, смонтирована в отдельном блоке и состоит из радиатора, водяного насоса с величиной подачи 20 л/мин и схемы авторегулировки температуры.

Пульт управления обеспечивает традиционные функции коммутации систем, контроль и регулировку параметров. Предусмотрен режим автоматического включения установки и выбора типовых режимов облучения.

Литература

1. Щедрин И.С., Гозин И.И., Саверский А.Я. Линейные ускорители электронов трехсантиметрового диапазона. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техника физического эксперимента. Вып. 2(37), 1988, с. 16.
2. Shonberg R.G., Wenk S., Mixon G. Light Weight Portable Linear Accelerator. Proceeding of the IX WCNDT, 1979, 4, CDD-1, US.
3. Зобов М.М., Майоров Ю.К. Пакет прикладных программ для расчета ЛУЭ. // Физика и техника линейных ускорителей. М.: Энергоатомиздат, 1985, с. 28-32.