

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Ордена Ленина Сибирское отделение  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

В.В. Безуглов, А.А. Брызгин, Л.А.Воронин,  
Е.Н. Кокин, А.Н. Лукин, А.М. Молокоедов,  
В.М. Радченко, Н.Д. Ромашко, Е.А. Штарклев

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ  
ВЫПУСКНЫХ УСТРОЙСТВ  
ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ  
ЭЛЕКТРОНОВ СЕРИИ ИЛУ

ИЯФ 2008-23

НОВОСИБИРСК  
2008

## Оглавление

Оглавление .....	3
Введение .....	5
1. Устройства для развертки, формирования и выпуска пучка электронов вдоль выпускного окна.....	6
1.1 Основные процессы в металлических стенках вакуумных камер сканирования .....	8
1.2 Формирование дозных полей выпущенного электронного пучка .....	12
1.3 Расчет доворотных систем при продольной развертке пучка .....	16
2. Разработка магнитной системы для кольцевого облучения электронами полиэтиленовых труб большого диаметра .....	17
2.1 Основные радиационные характеристики пучка .....	17
2.2 Магнитная система для кольцевого облучения .....	19
3. Разработка магнитной системы для облучения электронами двух видов продукции.....	21
3.1 Основные особенности работы системы выпуска импульсных пучков при переброске тока на различные объекты облучения .....	21
3.2 Расчет влияния пространственного заряда на транспортировку пучка	22
3.3 Расчет основных электронно-оптических характеристик выпускных устройств .....	24
4. Пример расчёта выпускного устройства ускорителя ИЛУ-10.....	25
4.1 Исходные данные к расчёту .....	25
4.2 Расчёт электронно-оптического тракта выпускного устройства .....	25
4.3 Расчёт коэффициента связи магнита с горловиной раструба.....	28
4.4 Схема цепи магнита в рабочей сборке с горловиной.....	29
4.5 Принцип работы блока управления разверткой .....	30
4.6 Тепловой режим системы развертки ИЛУ-10.....	33
Литература.....	34

**Методика расчёта и конструирования  
выпускных устройств для импульсных ускорителей  
электронов серии ИЛУ**

*В.В. Безуглов, А.А. Брызгин, Л.А. Воронин,  
Е.Н. Кокин, А.Н. Лукин, А.М. Молокоедов,  
В.М. Радченко, Н.Д. Ромашко, Е.А. Штарклев*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
630090, Новосибирск, Россия

**Аннотация**

В данном препринте представлены расчеты нескольких типов конструкций выпускных и подпучковых устройств, разработанных для импульсных ускорителей типа ИЛУ. Произведён анализ работы выпуска с квазилинейной разверткой пучка с учётом процессов, связанных с вихревыми токами в металлических стенках камер сканирования. Также приведено описание системы круговой развертки для облучения трубчатых объектов большого диаметра (до 200 мм) и системы выпуска пучка на два вида продукции. В заключение дан пример методики инженерного расчета типичного выпускного устройства для ускорителей типа ИЛУ, в котором учтены практически все особенности работы рассмотренных выпускных устройств.

**Calculation and design technique of escapement mechanisms  
for pulse electron accelerators of ILU type**

*V.V. Bezuglov, A.A. Bryazgin, L.A. Voronin,  
E.N. Kokin, A.N. Lukin, A.M. Molokoedov,  
V.M. Radchenko, N.D. Romashko, E.A. Shtrarklev*

Budker Institute of Nuclear Physics  
630090, Novosibirsk, Russia

**Abstract**

This preprint represents calculations of some construction types of escapement and sub-beam devices designed for pulse accelerators of ILU type. Operability analysis of outlet with quasi-linear beam scanning subject to processes connected with eddy currents in metal walls of scanning chambers was made. Characterization of circular sweep system for irradiation of tubular objects with diameter up to 200 mm and beam outlet system for two production types was also given here. In the end there is an example of engineering design procedure of escapement mechanism for ILU accelerators which takes account of almost all operation features of examined escapement mechanisms.

© Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

---

## Введение

Радиационные технологии в настоящее время достигли такого широкого применения в промышленности, что стали отдельной её отраслью. Причём совершенствование генераторов электронных пучков происходит одновременно с качественными улучшениями выпускных устройств. Главными требованиями при облучении продукции стали вопросы эффективности облучения, т.е. КПД процесса облучения. Номенклатура облучаемых объектов значительно увеличилась и разнообразилась. На данный момент в Институте разработан ряд промышленных ускорителей электронов. В каждом таком устройстве для выпуска в атмосферу ускоренный пучок сканируется на требуемые размеры облучаемого объекта. Конструктивно для этого используется треугольная металлическая вакуумная камера – раструб, сканирующий электромагнит расположен в вершине треугольника, а выпускное окно на противоположной стороне. В литературе [1,2,3] достаточно полно описаны подобные устройства. Однако, жесткие требования к равномерности дозных полей электронных ускорителей потребовали подробного рассмотрения вопросов, связанных с работой выпускных устройств. Комплектация каждого ускорителя в целом примерно одинакова, но в соответствии с разнообразностью технологических требований заказчика имеет ряд отличий. Причём модифицируются, как правило, системы выпуска пучка и подпучкового оборудования.

Серия высокочастотных ускорителей типа ИЛУ разрабатывается и изготавливается в институте ядерной физики СО РАН уже более тридцати лет. Ускорители этой серии предназначены для широкого применения в различных технологических процессах. Они рассчитаны на длительную непрерывную работу в промышленных условиях. Параметры энергий производимых Институтом ускорителей серии ИЛУ перекрывают диапазон от 0,7 до 5 МэВ при средних токах до 25 мА.

В данной работе основное внимание уделено тем проблемам, которые определяют формирование дозных полей на выходе из ускорителя. При рассмотрении каждого из примеров решалась задача подробного решения одной или нескольких проблем для данного вида выпускного устройства. Также были показаны основные закономерности для формирования дозных полей с заданным распределением. При рассмотрении круговой развертки для облучения трубчатых объектов большого диаметра (до 200мм) представлены радиационные характеристики выпущенного в атмосферу

электронного пучка. Рассмотрение работы системы выпуска на два вида продукции проводилось с акцентом на электронно-оптические и временные особенности расчета данных устройств.

## 1. Устройства для развертки, формирования и выпуска пучка электронов вдоль выпускного окна

На рис.1 представлена классическая конструкция с выпуском пучка через фольгу в атмосферу или для доставки пучка на тормозную мишень (гамма-конвертер) для генерации гамма излучения. Данная конструкция является основной для одностороннего облучения продукции пучком электронов или гамма излучением.

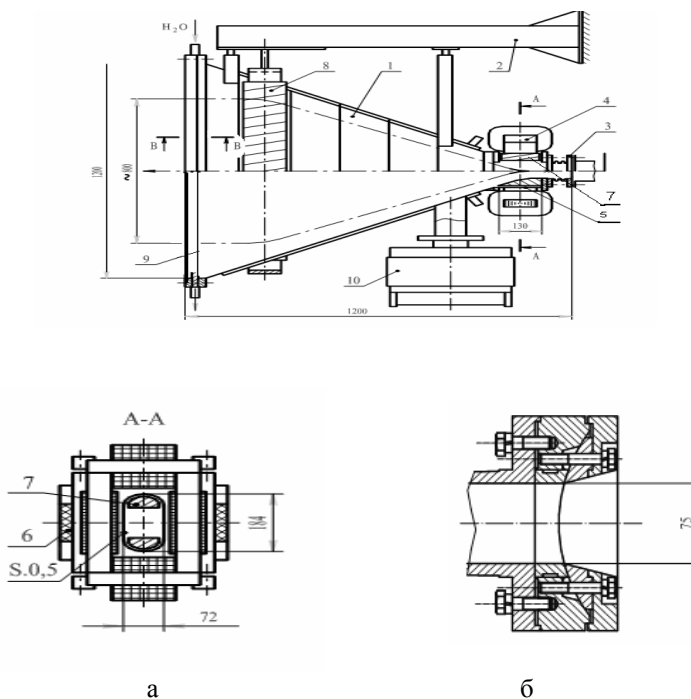


Рис.1. Выпускное устройство ускорителя ИЛУ-10.

На кронштейне 2 подвешена вакуумная камера-раструб 1 треугольной формы. Входной прямоугольный фланец этой камеры стыкуется с O-образной камерой 5, называемой далее камера развертки (горловина). Выпускная фольга или гамма-конвертер оформляется как самостоятельный узел устройства выпуска (б – рис.1).

Данный узел (сечение ВВ) собирается отдельно, проверяется на герметичность и крепится болтами к плоскому прямоугольному фланцу раструба. В качестве уплотнителя применена индиевая проволока диаметром 0.8 мм. Окно для выпуска пучка электронов выполнено из титановой фольги 9 толщиной  $d = 50 - 80$  мкм, которой специально придается цилиндрическая форма с радиусом  $R = 150$  мм.

Отдельно следует остановиться на конструкции камеры развертки (на рис.1а показана камера с магнитом), нагруженной атмосферным давлением. Камера имеет жесткие фланцы, соединенные тонкостенной, овальной в поперечном сечении стальной оболочкой толщиной 0.5 мм (нержавеющая сталь 12Х18Н10Т). Дополнительно фланцы камеры скреплены двумя распорками 6 из стеклотекстолита. Распорки воспринимают осевую нагрузку от атмосферного давления и служат опорой для сканирующего магнита весом 65 кг. Принятая толщина стенки камеры 0.5 мм обусловлена требованиями минимального ослабления магнитного поля развертки и минимального нагрева стенок вихревыми токами Фуко. При принятых размерах камеры (длина  $l = 130$  мм, ширина – 184 мм, толщина – 72 мм) прогиб в середине плоской части камеры составил 3мм на каждую сторону.

Входной водоохлаждаемый фланец камеры имеет апертуру диаметром 80мм, снабжен двумя медными вкладышами 7, припаянными к фланцу. Вкладыши защищают тонкие стенки камеры от низкоэнергетичных и отраженных электронов. Одновременно они вытесняют из камеры часть магнитного потока и тем самым снижают нагрев стенок камеры развертки. Условно конструкции применяемых электромагнитов развертки можно разделить на два типа: конструкции с явно и неявно выраженными полюсами. На рис.2 показаны типичные конструкции этих магнитов. На рисунке магниты показаны с частью металлического немагнитного эллипсного кожуха камеры сканирования, который разделяет по вакууму пространство отклонения пучка и магнита развертки.

Сканирующий магнит, с неявно выраженными полюсами (рис.2а), имеет прямоугольный разборный магнитопровод, на котором расположены две пары катушек.

Сканирующий магнит за время 500 мкс разворачивает пучок электронов вдоль выпуска длиной 1 м, вторая пара обмоток сканирует пучок поперек выпуска на  $\pm 30$  мм (аналог строчной развертки).

Магнит развертки с полюсами (рис.2б) имеет также прямоугольный разборный магнитопровод, на котором расположена пара полюсов с обмотками. Полюса сечением 100×110 мм изготовлены также как и магнитопровод из электротехнической стали толщиной 0.35мм.

Выбор сканирующего устройства определяется техническими требованиями к выпуску в целом. Можно только отметить, что безполюсные развертки позволяют развертывать пучок в двух направлениях. При этом,

при симметричном расположении обмоток, отсутствует влияние каждой пары обмоток друг на друга.

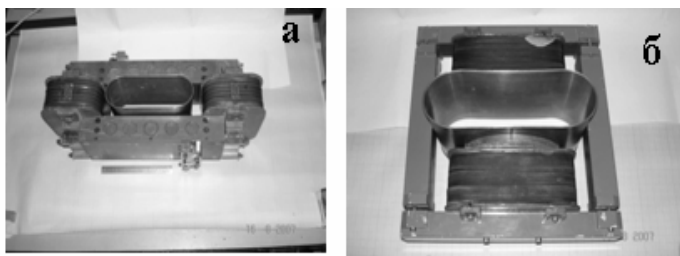


Рис. 2. Фото магнитов сканирования.

Магниты разверток с полюсами в два раза более эффективны, чем безполюсные по величине развертывающего поля для одинаковых величин ампервитков.

Линза Пановского, позволяющая доворачивать пучки по всей длине раструба, выполнена в виде двух прямоугольных пластин с равномерно намотанными по всей длине обмотками.

Градиенты рабочих квадрупольных магнитных полей составляют 0.1 – 0.5 Тл/м.

Катушки и магнитопровод пропитаны эпоксидным компаундом по методу «Монолит».

### 1.1. Основные процессы в металлических стенках вакуумных камер сканирования

При подаче импульсного магнитного поля в металлическом немагнитном кожухе системы развертки, который разделяет по вакууму пространство отклонения пучка и находящийся снаружи магнит развертки, возникает реакция наведенных токов, которая искажает поле развертки. Вихревые токи в толще металлической оболочки протекают по элементарным виткам в плоскостях, перпендикулярных вектору напряженности возбуждающего их магнитного поля. Плотность тока в каждом витке определяется законом индукции Фарадея:

$$\oint E dl = -\mu_0 \frac{d}{dt} \iint H dS, \quad (1.1)$$

где  $E$  – индуцируемое поле, создающее электрический ток плотностью  $j = \sigma \cdot E$ ,  $H$  – напряженность магнитного поля,  $\sigma$  – проводимость кожуха.

В зависимости от частотного спектра, падающего на оболочку поля, можно ввести понятие о двух областях частот экранирования этого поля. Эти области определяются соотношением величин скин-слоя и толщины немагнитной металлической стенки вакуумной камеры развертки. При

высоких частотах происходит вытеснение тока к поверхности стенки оболочки (поверхностный эффект), при низких частотах поверхностного эффекта нет, и экран ведет себя как короткозамкнутый виток. Для изготовления стенок вакуумной камеры применяется нержавеющая сталь, величина скин-слоя для которой на частоте  $f = 50$  Гц составляет 60 мм, а для  $f = 1000$  Гц равна 13 мм. Причем характерное время проникновения поля в нержавеющую сталь для применяемых толщин порядка 0.5 – 1 мм согласно [4] составляет порядок единиц мкс. Естественно, что для характерных частот разверток, составляющих менее 1 кГц, явлением поверхностного эффекта можно пренебречь, а кожух-экран считать короткозамкнутым витком, сопротивление стенок которого совпадает с сопротивлением постоянному току.

Из [4] также следует, что поле внутри экрана  $H_0(t)$  есть суперпозиция воздействующего поля  $H_1(t)$  и поля  $H_2(t)$ , возбуждаемого токами, наведенными в толще оболочки импульсом  $H_1(t)$ . Там же выведено, что поле внутри экрана  $H_0(t)$ , возбужденное импульсом  $H_1(t)$ , удовлетворяет обыкновенному дифференциальному уравнению:

$$H_1(t) = \frac{L}{R} \cdot \frac{dH_0}{dt} + H_0(t), \quad H_0(0) = 0, \quad (1.2)$$

где  $L$  и  $R$  – индуктивность и активное сопротивление экрана.

Из уравнения (1.2) очевидно, что форма поля в вакууме зависит только от величины соотношения  $L$  и  $R$ . Для конструкций кожухов развертки, применяемых в ускорителях серии ИЛУ, величина отношения  $L/R$  составляет величину порядка 100 мкс. Методика определения этой постоянной изложена в [5].

Как указывалось ранее, для толщин, применяемых при изготовлении оболочек камер сканирования  $d = 0.5 - 1$  мм (12X18Н10Т), время диффузии магнитного поля через толщу оболочки составляет единицы мкс, а характерное время импульса развертки пучка для ускорителей серии ИЛУ много больше этой величины и составляет величину 500 – 1000 мкс. Данное временное соотношение позволяет представить кожух развертки замкнутым витком с определенными индуктивностями и взаимоиндуктивностями. Это позволяет решать задачи экранирования импульсных магнитных полей проводящими оболочками методами обычных электрических цепей, что позволяет реализовать расчет полной цепи генератора магнита развертки с возможностью определения активных потерь в самих камерах сканирования от вихревых токов и т.п.

Эквивалентной схемой нагрузки генератора развертки с явно и не явно выраженными полюсами является цепь, которая состоит, в общем случае, из  $n$  одинаковых индуктивностей первичного контура и магнитно-связанного с ними замкнутого витка вторичного контура. Причем каждая из катушек магнита связана с короткозамкнутым контуром кожуха коэффициентом связи  $k^2$ .



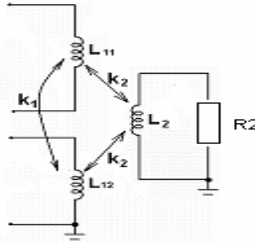


Рис. 3. Схема нагрузки генератора развертки.

Принципиальной схемой такой цепи является индуктивно связанная цепь, которая приведена на рис.3.

Рассмотрим методику определения основных параметров этой магнитно-связанной цепи системы развертки. Магнит содержит две одинаковые катушки L11 и L12, которые связаны друг с другом коэффициентом  $k_1$ , а замкнутый виток кожуха развертки имеет коэффициент связи с обмотками равный  $k_2$ . Как известно из общего курса электротехники, для двух катушек, связанных взаимной индуктивностью, коэффициент связи определяется выражением:

$$k = \sqrt{\frac{L - L'}{L}}, \quad (1.3)$$

где  $L$  и  $L'$  – значения индуктивности без заморотки и с замкнутой второй индуктивностью. Практически все параметры схемы определяются на реально изготовленном магните развертки. Индуктивности L11 и L12, обычно равные, измеряются без горловины на отдельно собранном магните. Остальные измерения проводятся в рабочей сборке. Величины коэффициентов связи находим из формул:

$$k_1 = \sqrt{\frac{L_{11}' - L_{11}''}{L_{11}'}} , k_2 = \sqrt{\frac{L_{11}' - L_{11}'}{L_{11}'}} . \quad (1.4)$$

$L_{11}$  и  $L_{12}$  – индуктивности магнита без кожуха развертки,

$L_{11}'$  – индуктивность катушки в рабочей сборке (с горловиной),

$L_{11}''$  – индуктивность катушки в рабочей сборке с замкнутой второй катушкой.

При учете взаимной индуктивности между обмотками схема на рис.3 трансформируется в цепь на рис.4, где

$$L_1 = L_{11}' (1 + k_1) = L_{12}' (1 + k_1) .$$

Знак плюс означает, что обмотки магнита включаются согласно.

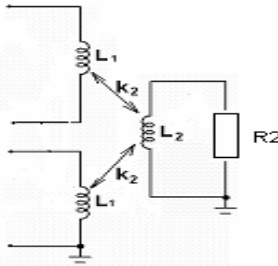


Рис. 4. Преобразованная схема нагрузки генератора развертки.

При дальнейшем преобразовании схемы с двумя питающими катушками  $L_1$  получаем эквивалентную цепь магнита с двумя магнитно-связанными индуктивностями (рис.5), Где:

$$L_{1 \text{ экв}} = L_1 (1 - 2 k_2^2) \text{ – при параллельном включении катушек,}$$

$$L_{1 \text{ экв}} = 2 L_1 (1 - 2 k_2^2) \text{ – при их последовательном включении, (1.5),}$$

$$k_{\text{экв}} = \sqrt{2} k_2 \text{ – для двух питающих развертку катушек.}$$

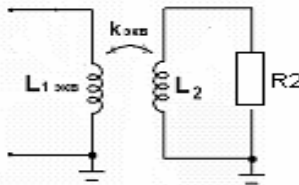


Рис. 5. Эквивалентная схема магнита и горловины.

Рассмотрим работу данной эквивалентной схемы магнита развертки при разряде на эту цепь емкости. На рис.6 представлена эта схема и основные кривые токов, напряжений, а также магнитных полей в вакууме (здесь  $k_{\text{экв}} = 0.8$ ). Причем, сплошными линиями отражены результаты расчета переходных процессов для данной схемы, а точками показана кривая возбуждающего поля  $H_1(t)$ , найденного по выражению (1.2). За значение  $H_0(t)$  принимаем  $i_1(t) + i_2(t)$ . На рис.7 видны основные временные закономерности влияния замкнутого витка вакуумного кожуха на рабочее магнитное поле. Следует также отметить большое затухание поля в вакууме  $H_0(t)$  от вносимого активного сопротивления горловины  $R_2$ . Знакопеременное поле развертки во время импульса тока пучка должно быть симметричным, относительно середины, не только по абсолютным амплитудам, но и по их производным. Это обстоятельство значительно снижает возможности применения подобного типа схем из-за большой разницы

рабочих амплитуд требуемого симметричного реверса этого поля. Для удобства масштабного восприятия графиков принимаем  $L1_{\text{экв}} = L2$ .

Величина отношения  $L2/R2$  равна 100мкс, что соответствует ее реальному значению для горловин, применяемых в ускорителях ИЛУ.

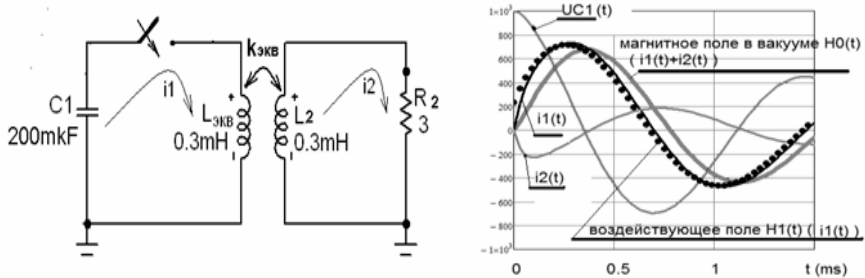


Рис. 6. Расчетные кривые токов и магнитных полей в простом генераторе развертки.

## 1.2. Формирование дозных полей выпущенного электронного пучка

Оценим влияние величины нелинейности тока развертки на распределения плотности пучка на выпускной фольге. На рис.7 представлены гистограммы распределения плотности пучка на фольге. Каждому распределению соответствует своя часть косинусоиды. Синусоидальная форма поля развертки выбрана как наиболее легко реализуемая на практике.

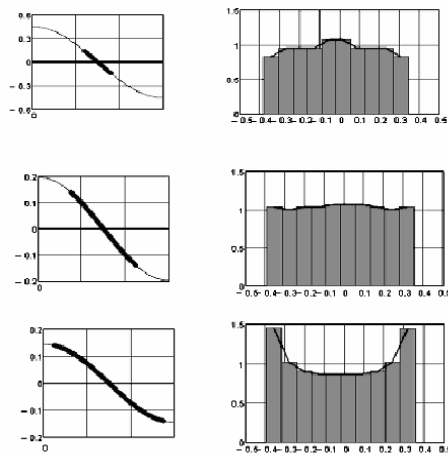


Рис. 7. Гистограмма плотности тока на фольге в зависимости от длительности использования косинусоиды и соответственно разных величин нелинейности поля развертки.

Эти распределения получены для полюса магнита, имеющего согласно [5] радиус скругления нижней кромки полюса 70 мм. Из кривых на рис.7 очевидно, что для достижения постоянной плотности тока на фольге следует выбирать второй вариант формы поля развертки.

Подробный расчет питания магнита с полюсами, с целью получения плотности пучка на фольге, близкой к линейному распределению, приведен в конце препринта.

Управлять равномерностью выходной дозы можно, согласно [5], меняя кривизну нижнего края полюсов магнита развертки. На рис.8 приведены гистограммы распределения плотности тока на фольге в зависимости от радиуса на полюсах магнита развертки.

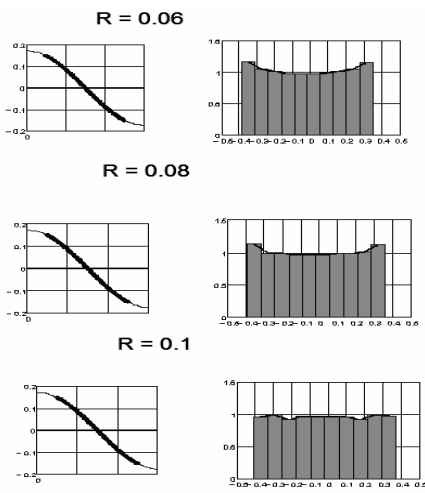


Рис. 8. Гистограммы выходной плотности тока в зависимости от радиуса полюса магнита развертки.

Величина используемой длительности тока развертки не менялась. Следовательно, при рассмотрении вопросов, связанных с распределением плотности электронного пучка на выходной фольге, необходимо учитывать три основных фактора: форму поля в развертке, влияние короткозамкнутого витка кожуха развертки на форму магнитного поля в развертке, а также форму полюсов магнита.

Одним из вариантов развертки пучка вдоль фольги для ИЛУ-10 был прямоугольный магнит с питанием от линии основного модулятора ускорителя. В [5] показано, что наилучшие характеристики дозного гамма поля за конвертором получаются при слабо сходящемся пучке электронов на мишени (от нормали минус 6 градусов) и квадратичном нарастании падающей дозы на краях раструба. Нарастание электронной дозы должно

соответствовать выражению:  $\frac{dW}{dx} = 1 + 0.2 \left( \frac{x}{x_0} \right)^2$ , где  $x_0 = 0.35$  м, а  $x$  –

координата от середины конвертора.

На рис.9 приведены формы магнитного поля в вакууме и возбуждающего поля на кожухе для этого случая. За основу распределения плотности тока по конвертору был выбран вариант (b) на рис.9. Этот выбор определился из конструктивных соображений по геометрии установки линзы Пановского, требуемой ширины дозного поля, а также оптимального использования габаритов раструба.

Для получения заданного распределения дозы находим формы магнитных полей снаружи и в вакуумной части развертки (рис.9). Для выбранного варианта (b), на рис.9 – сплошная кривая, была разработана схема, которая формирует требуемый ток в обмотке магнита.

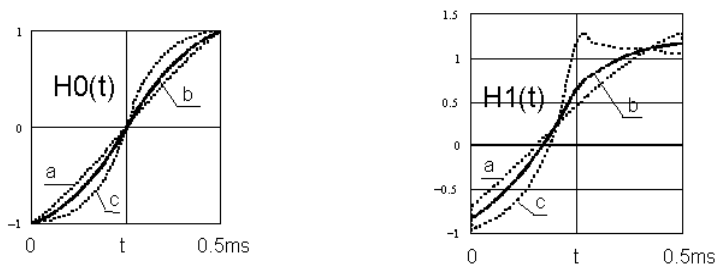


Рис. 9. Расчетные формы  $H_0(t)$  и  $H_1(t)$ .

Эта схема запитывается от формирующей линии основного модулятора ИЛУ-10. Как было отмечено ранее, при подаче прямоугольного импульса напряжения на магнит развертки поле внутри не может содержать скачок и всегда начинается с нуля и с нулевой производной. На рис.10 осциллограмма возбуждающего поля на ускорителе.

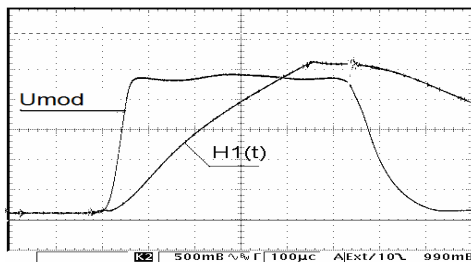


Рис. 10. Осциллограмма полей  $H_1(t)$  и  $I_e(t)$ .

Обмотка магнита заранее запитывается постоянным током через два дросселя  $Dp1$  до значения максимального отклонения в одну сторону раструба. На рис.11 показана принципиальная схема питания магнита

развертки от формирующей линии модулятора ИЛУ-10. Поясним кратко назначение основных элементов схемы питания развертки. Емкость  $C2$  подстраивает форму начала поля развертки.

Цепочка  $C1, L1, R1$  и  $Lm$  формирует центральную часть поля развертки. Снижение роста поля в конце импульса осуществляется включением шунтирующей цепи  $Rш$  и синхронизированной тиристорной линейки (на схеме – ключ  $K$ ).

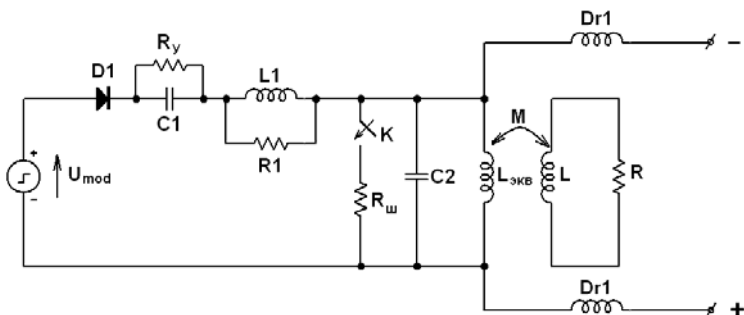


Рис. 11. Электрическая схема питания отклоняющего магнита от модулятора ИЛУ-10.

Через два одинаковых дросселя  $Dr1$  обмотка магнита  $L_{экв}$  запитывается постоянным током от источника постоянного тока. Емкость  $C1$  разряжается между рабочими циклами до нуля резистором  $R_y$ .

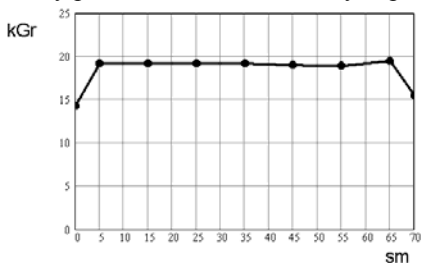


Рис. 12. Распределение дозы за конвертором.

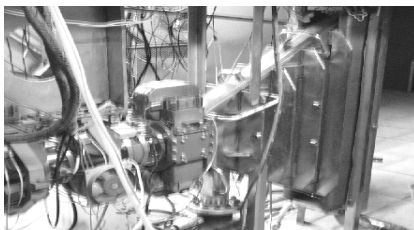


Рис.13. Фото выпускного устройства ИЛУ-10.

Реализация данной схемы позволила получить требуемое распределение дозы гамма излучения за конвертором, скорость движения поперечной линейки с дозиметрическими пленками равнялась 1 мм/сек при мощности в пучке 50 кВт. По техническим условиям неравномерность дозы на общей длине облучения  $L = 0.6$  м не превышала  $\pm 5\%$ . На рис.12 приведено распределение дозного гамма распределения за конвертором, а на рис.13 – выпускное устройство ИЛУ-10.

### 1.3. Расчет доворотных систем при продольной развертке пучка

Для получения на выходной фольге пучка с одинаковыми угловыми характеристиками, особенно при больших углах сканирования, необходима установка таких доворотных устройств, которые трансформируют траектории электронов так, что пучок падает на фольгу везде по ее длине под прямым углом. Принцип работы такой электронно-оптической схемы понятен из электронных траекторий для моноэнергетического пучка на рис.14.

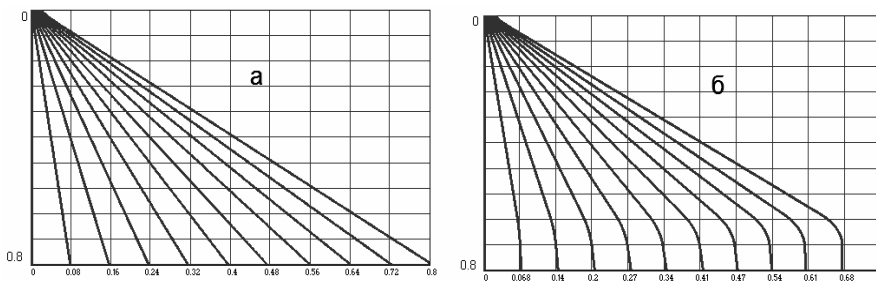


Рис.14. Траектории развернутого пучка без и с применением доворотного магнита (линза Пановского).

В качестве электронно-оптической модели ускорителя ИЛУ-10 выбрана схема, состоящая из сканирующего электромагнита развертки и расположенной вблизи выпускного окна плоской квадрупольной линзы (линзы Пановского). На рис.15 приведены картинки расчетных электронных траекторий в плоскости раструба для максимального значения магнитного поля

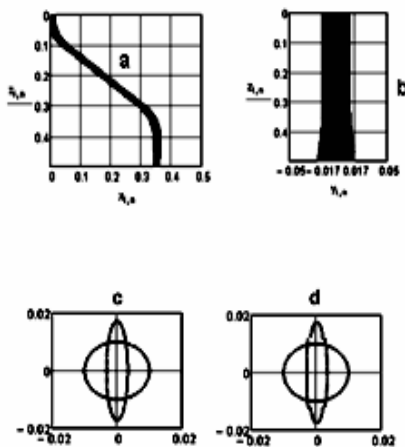


Рис. 15. Расчетные проекции и отпечатки пучка на фольге, а – проекция на плоскость Z-X, б – на плоскость Z-Y, с и d – отпечатки пучка на фольге при минимальном и максимальном отклонениях.

развертки (а), боковая проекция пучка (b) и расчетные отпечатки пучка на фольге при нулевом и максимальном отклонениях (с и d).

Здесь показана деформация профиля пучка (исходно окружность с радиусом 1 см) после прохождения линзы Пановского. Пучок расширяется на фольге, что снижает выходную плотность тока на ней и снижает удельные тепловые нагрузки выпуска.

Расширение одинаково на всей длине развертки. Естественно, что расширение ограничено конструктивной шириной фольги. Это условие однозначно определяет геометрическое место установки линзы доворота.

## **2. Разработка магнитной системы для кольцевого облучения электронами полиэтиленовых труб большого диаметра**

### **2.1. Основные радиационные характеристики пучка**

В качестве облучаемых объектов предполагаются освоенные промышленностью полиэтиленовые трубы с диаметрами в диапазоне  $80 \div 200$  мм. Марка полиэтилена ПЭ-63 и HE-2595 (Гост – 52134-03). Данным маркам требуются дозы облучения  $D = 10$  Мрад  $\pm 20\%$ . Толщины изделий данного диапазона составляет, примерно, 0.1 от значения диаметра трубы ( $8 \div 20$  мм). Распределение поглощенной дозы по глубине (см. рис.16) показывает, что максимальная толщина материала, которую можно обрабатывать электронным пучком при предельной энергии ИЛУ-10 (это 5 МэВ), при условии равенства поглощенных доз на обеих поверхностях труб, может достигать величины 20 мм. При этом, равномерность облучения по толщине не хуже  $\pm 15\%$ .

Очевидно, что при углах падения электронов, меньших  $90^\circ$ , глубина их проникновения в материал уменьшается, а максимум кривой распределения поглощенной дозы смещается к поверхности материала.

Другими словами, облучающий электронный пучок должен доставляться практически по нормали к поверхности трубы. Используя зависимости рис.16, можно определить максимальную толщину материала (полиэтилена), который можно обрабатывать электронным пучком.

При этом нужно учесть, что часть кинетической энергии электронов теряется при прохождении их через мембрану выпускного окна ускорителя (титановая фольга толщиной 50 микрон) и слой воздуха, который проходит пучок до облучаемого объекта (максимальная длина траектории электронов в воздухе равна 0.6 м). Оценка показывает, что суммарные радиационные потери в титановой фольге 50мкм и на одном метре воздуха составляют 0.2 МэВ. Это примерно 4% от первичной энергии пучка (5 МэВ). Следовательно, потерями пучка на пути к объекту можно пренебречь.

Электронный пучок, выходя из раструба, на своём пути к облучаемой мишени проходит две среды: титановую фольгу и воздух. Можно показать,



что средний квадрат угла рассеяния линейно возрастает с толщиной поглотителя, поскольку рассеяния, происходящие в различных слоях, статистически независимы и соответствующие им средние квадраты углов рассеяния линейно складываются. Поэтому можно определить величину, выражающую увеличение среднего квадрата угла рассеяния. Зная среднеквадратичный угол рассеяния, рассчитаем среднеквадратичный радиус расширения пучка  $R$ . На рис.17 показано расширение пучка в воздухе после прохождения титановой фольги для разных энергий электронов.

После определения основных характеристик пучка можно приступить к проектированию магнитной системы кольцевого облучения.

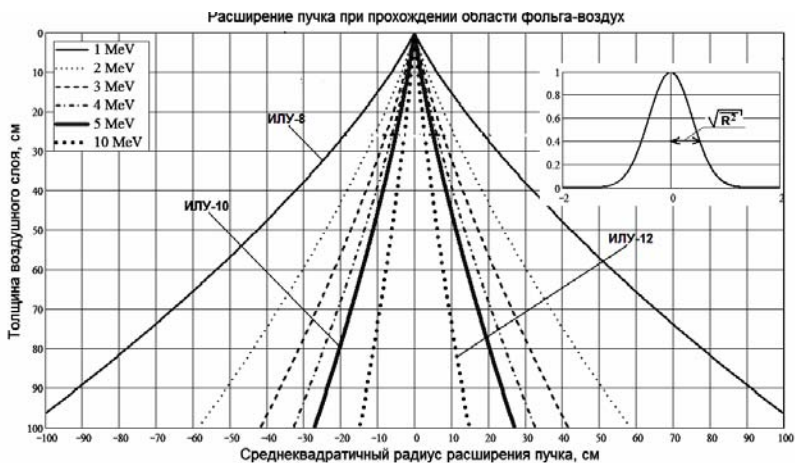


Рис. 16. Распределение поглощённой дозы по глубине в полиэтилене при облучении электронами различных энергий.

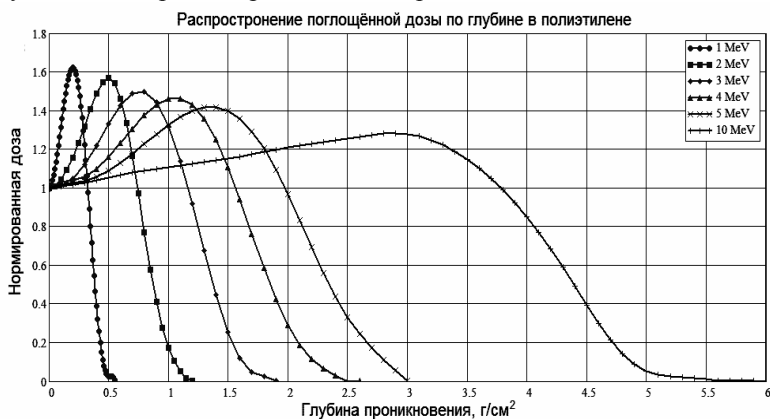


Рис.17. Расширение пучка при прохождении области фольга-воздух.

## 2.2. Магнитная система для кольцевого облучения

Основным физическим принципом кругового облучения является идея создания знакопеременного магнитного поля (реверса) в зоне облучения за раструбом ускорителя. В ранних работах по круговому облучению [6-7] вопросам оптимальной доставки пучка электронов к мишени не было уделено достаточного внимания.

На рис.18 показана расчетная картина траекторий линейно развернутого моноэнергетического пучка с цилиндрическим облучаемым объектом.

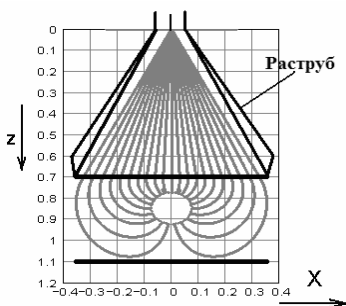


Рис. 18. Вид расчётных траекторий развёрнутого пучка электронов для кругового облучения.

На рис.19 показана картина оптимального реверса магнитного поля по оси X (широкая сторона раструба). Область формирования магнитного поля по оси Z лежит в области  $0.7 \div 1.1$  м, по оси X в области  $-0.5 \div +0.5$  м.

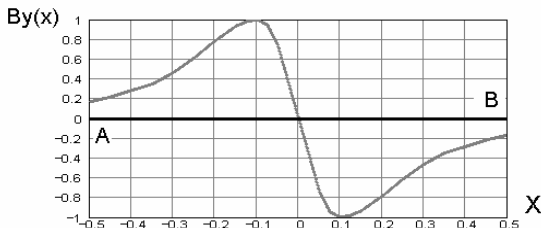


Рис. 19. Оптимальный реверс магнитного поля.

Оптимизация трёхмерной формы магнитного поля проводилась по двум критериям: по равномерности дозы по периметру трубы и по условию минимального отклонения от нормали падающего пучка.

Для получения азимутальной однородности по периметру облучаемой трубы магнитное поле по оси Z необходимо линейно снижать на величину 20%. На рис.20 показана более подробно картина расчетных траекторий (для половины раструба) линейно развернутого пучка.

Оценка производительности облучения труб, например, для диаметра 160 мм, дозы 10 Мрад и номинальной величины мощности ускорителя в 50 кВ дает значение скорости транспортера ~ 2 метра в минуту.

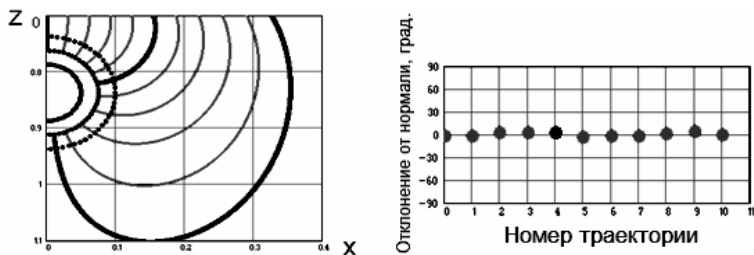


Рис. 20. Траектории развернутого пучка ИЛУ-10 (11 траекторий, половина развертки) и отклонение от нормали падающих траекторий пучка.

Конструкция магнита для облучения электронами полиэтиленовых труб большого диаметра показана на рис.21. Ядро магнита (1) изготовлено из стали 3.

Максимальное значение магнитной индукции в магнитопроводе не превышает значение в 1Тл. Зазор между магнитами в верхней части равен 25 см, а в нижней части, где размер пучка наибольший, величина зазора равна 30см.

Сравнительно большие зазоры между полюсами вызваны рассеянием пучка в воздухе. Это значение взято для пробега электронов равного 0.6 м из рис.17. Для энергии 5 МэВ среднеквадратичный радиус расширения пучка не превышает 30 см.

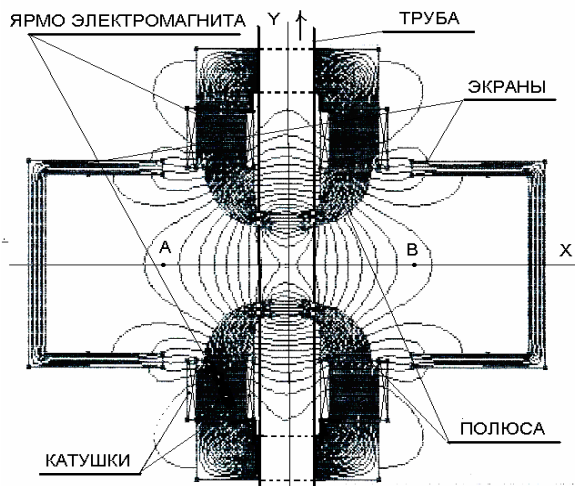


Рис. 21. Конструкция магнитной системы облучения полиэтиленовых труб большого диаметра.

Пример расчета движения одной траектории пучка в воздухе при постоянной величине отклоняющего поля показан на рис.22. Входные условия пучка задавались по экспериментально измеренным параметрам пучка для ИЛУ-10.

Общее число ампер-витков обмоток магнита равно 100 000. Активные потери в обмотках достигают значения 4 кВт. Величина рабочей индукции в зазоре равна 2 кГс. Общий вес магнита круговой развертки составляет 4 тонны.

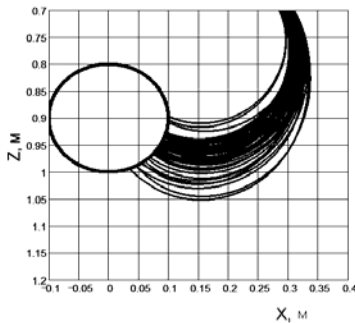


Рис. 22. Траектории движения электронов в магнитном поле после учёта рассеяния.

### **3. Разработка магнитной системы для облучения электронами двух видов продукции**

#### **3.1. Основные особенности работы системы выпуска импульсных пучков при переброске тока на различные объекты облучения**

Решение задачи одновременного облучения двух видов продукции проводилось на ускорителе ИЛУ-8. Принципиальным отличием созданной для этого системы выпуска было наличие дополнительного бокового раструба, расположенного под углом 25 градусов к оси основного раструба. Распределение по мощностям между выпускными фольгами было задано как 5:1. Следовательно, каждый пятый импульс тока ускоренных электронов должен был быть отклонен на дополнительную боковую фольгу. На рис.23 показана боковая проекция и фото системы выпуска для облучения двух видов продукции.

Первой системой формирования электронного пучка в ускорителях типа ИЛУ после его ускорения в резонаторе служит аксиальносимметричная магнитная линза, которая подготавливает оптимальные параметры пучка для его транспортировки по системе выпуска. Финишной системой выпуска выбрана схема, состоящая из электромагнитов развертки и расположенной вблизи выпускного окна или тормозной мишени плоской квадруольной

линзы. Общая длина выпускного тракта по вакууму составляет около 1 метра. Рассмотрим основные вопросы проектирования электронно-оптической системы выпуска.

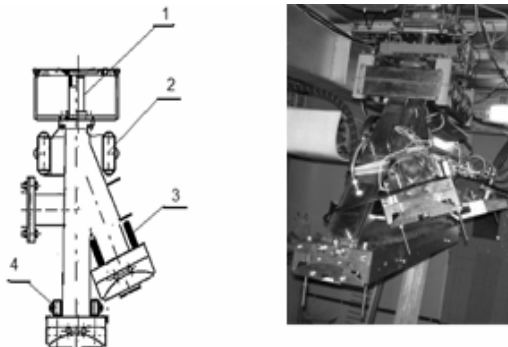


Рис. 23. Система выпуска электронного пучка для двух конвейеров. На эскизе: 1 – камера магнита развертки, 2 – поворотный магнит, 3 – корректоры дополнительного раструба, 4 – линза Пановского основного раструба.

### 3.2. Расчет влияния пространственного заряда на транспортировку пучка

Дифференциальное уравнение крайнего электрона для ламинарных и параксиальных пучков с производными по текущей координате ( $z$ ) в статических электрических и магнитных полях согласно [5] имеет вид:

$$r'' = -\frac{\gamma' \gamma}{\gamma^2 - 1} \cdot r' - \frac{8.61 \cdot 10^4}{\gamma^2 - 1} \left( B_z^2 - \left( \frac{r_k}{r} \right)^4 B_K^2 \right) \cdot r - \frac{0.5 \gamma''}{\gamma^2 - 1} \cdot r + \frac{1.17 \cdot 10^{-4} I_e}{(\gamma^2 - 1)^{3/2}} \cdot \frac{1}{r}, \quad (3.1)$$

где:  $r(z)$  – текущий радиус крайнего электрона,  
 $B_z$  – значение магнитного поля на оси,  
 $B_K$  – значение магнитного поля на катоде,  
 $r_k$  – радиус катода,  
 $I_e$  – ток пучка,  
 $\gamma(z)$  – релятивистский фактор.

Так, для случая транспортировки пучка ИЛУ-8 после его ускорения в резонаторе, случай движения протяженного потока рассмотрен только с учетом поперечной компоненты кулоновского заряда пучка. Для этого случая принимаем  $B_z = 0$ ,  $\gamma'$  и  $\gamma''$  также равны нулю,  $B_K = 0$  по условию формирования ускорения пучка в резонаторе. В этом случае в правой части уравнения [3.1] остается только один последний член. Решение уравнения для этого случая показывает, что эффектом расширения потока от действия

пространственного заряда пучка можно пренебречь (на длине 1 метра пучок расширяется только на 2%).

### 3.3. Расчет основных электронно-оптических характеристик выпускных устройств

Дальнейшие расчеты движения пучка без учета объемного заряда пучка будем проводить методом траекторного анализа, решая систему скалярных уравнений для декартовых координат – проекции векторного уравнения движения электронов в магнитном поле:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} &= -\eta \left( B_z \frac{dy}{dt} - B_y \frac{dz}{dt} \right), \\ \frac{d^2 y}{dt^2} &= -\eta \left( B_x \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dx}{dt} \right), \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= -\eta \left( B_y \frac{dx}{dt} - B_x \frac{dy}{dt} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Конструктивно магнитные полюса отклоняющих устройств выпуска по оси  $X$  (широкая сторона раструба) выполнены достаточно протяженными по длине, и магнитные поля по этой координате не имеют особенностей. Это означает, что в зоне нахождения пучка в развертывающих или поворотных магнитах поле по координате  $X$  практически одинаково, и данные линзы попадают под категорию плоских линз. При этом составляющие магнитного поля в произвольной точке  $(x, y, z)$  согласно [8] определяются следующими выражениями для плоских полей:

$$\left. \begin{aligned} B_x(x, z) &= -B'(z) \cdot x \\ B_z(x, z) &= B(z) - \frac{x^2}{2} B''(z), \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Для осесимметричных полей:

$$\left. \begin{aligned} B_x(x, y, z) &= -\frac{x}{2} B'(z) \\ B_y(x, y, z) &= -\frac{y}{2} B'(z) \\ B_z(x, y, z) &= B(z) - \frac{x^2 + y^2}{2} B''(z) \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

где  $B(z)$  – измеренное или расчетное значение индукции магнитного поля на оси или в плоскости симметрии. Расчеты магнитных полей линз проводились программой MERMAID.

В квадрупольных линзах и линзах Пановского поля задаются аналитически, а постоянный градиент рабочего поля выбирается или из экспериментальных измерений, или из расчетов магнитных полей. Вопрос учета краевых полей квадрупольных линз рассмотрен в работе [5].

Пучок на входе задается или окружностью точек, траектории которых дают наглядное трехмерное изображение деформации формы пучка в плоскости выпускной фольги, или в виде круглого электронного пятна с реально измеренным распределением плотности тока, что позволяет получать величины распределения плотности тока на выходе. Расчет траекторий движения электронов в постоянных магнитных полях проводился с помощью программных средств пакета MathCAD. Одним из труднопредсказуемых результатов движения пучка после поворотного магнита была его с-образная форма на дополнительной фольге. На рис.24 показана расчетная форма пучка на дополнительной фольге после поворота на 25 градусов.

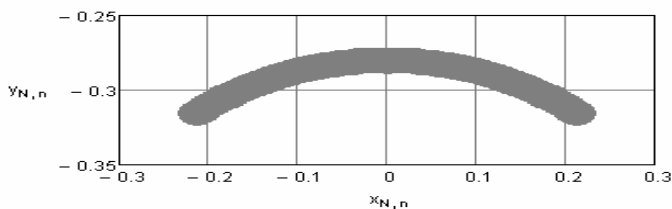


Рис. 24. Расчетный отпечаток пучка на дополнительной фольге.

Данная форма выходного пучка, которая была подтверждена экспериментально, была выпрямлена корректирующими магнитами. Поля  $V_x$  квадратично спадали к центру дополнительного раструба. Следует отметить, что геометрическая близость магнитных элементов основного и дополнительного раструба из-за взаимовлияния потребовала применить только импульсное питание по принципу, какой раструб работает, те магнитные элементы и запитаны.

Для определения временных возможностей проникновения магнитных полей через металлические стенки раструбов измерялось время спада поля короткозамкнутого витка в районе установки конкретного магнита. Наибольшее время – 600 мкс (отношение  $L/R$  см. главу 1.1) показал поворотный магнит. Максимальная частота повторения работы ИЛУ-8 равна 60 Гц. Эти временные особенности легли в основу расчета систем питания элементов трактов, а также самих магнитов.

## 4. Пример расчёта выпускного устройства ускорителя ИЛУ-10

### 4.1. Исходные данные к расчёту

Основными требованиями заказчика к выпускному устройству являются длина развёртки, которая должна составлять 70 см, а также линейное распределение плотности тока пучка на фольге с равномерностью не хуже  $\pm 5\%$ . Энергия электронного пучка равна 5 МэВ, средний ток – 10 мА, средняя мощность пучка – 50 кВт.

Требуемые характеристики сканирующего магнита:

1. Угол сканирования:  $\pm 50^\circ$ .
2. Суммарный интеграл поля  $B_y(z)$  для отклонения пучка на максимальный угол 23.5 кГс·см.

В основном тексте статьи уже было упомянуто, что условно конструкции применяемых электромагнитов развертки можно разделить на два типа: с явно и неявно выраженными полюсами. Исходя из специфики поставленной задачи, а именно из-за больших требуемых углов отклонения пучка, выбор сканирующего устройства был сделан в пользу сканирующего магнита с полюсами.

Данный пример содержит расчёт такого выпускного устройства. Также производится учёт влияния горловины раструба на поле магнита и вычисление таких параметров, как взаимная индуктивность катушек и коэффициент связи магнита развёртки с горловиной. В силу наличия тепловых потерь в замкнутом витке горловины, в заключении предлагается расчёт системы охлаждения кожуха развёртки.

### 4.2. Расчёт электронно-оптического тракта выпускного устройства

В качестве электронно-оптической модели выпускного устройства ускорителя ИЛУ-10 (см. рис. 25) выбрана схема, состоящая из сканирующего электромагнита развертки и расположенной вблизи выпускного окна плоской квадрупольной линзы (линзы Пановского), которая трансформирует траектории электронов так, что пучок попадает на фольгу везде по ее длине под прямым углом.

Для отклонения электронов на  $\pm 50^\circ$  суммарный интеграл распределения поля  $B_y(z)$  должен составлять 23.5 кГс·см (рис.26 б). Это получается при суммарных ампервитках равных 15000 А.

Линза Пановского, позволяющая доворачивать пучки в конце раструба, выполнена в виде двух пластин, изготовленных из стали 3, длиной 1 м и сечением  $100 \times (30 \div 60)$  мм<sup>2</sup> с равномерно намотанными обмотками (см. рис.27). Число ампервитков на каждой пластине составляет 25000 А. Линза питается постоянным током, градиент поля равен 0.45 Тл/м.



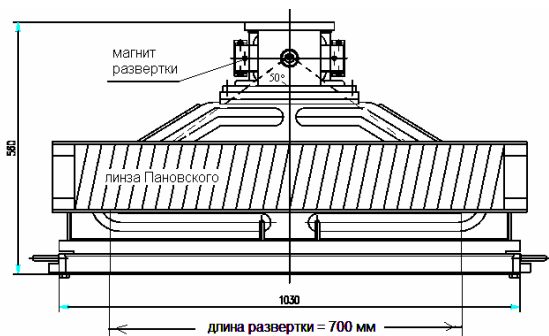


Рис. 25. Эскиз выпускного раструба ускорителя ИЛУ-10.

Сечение магнита и распределения поля магнита по осям  $x$  и  $z$  представлены на рис.26. Поле в железе не превышает 1Тл.

На рис.28 показано распределение пучка для половины развертки при максимальном и нулевом значениях амплитуды поля сканирующего магнита, а также траектории электронов для максимума поля с реальными

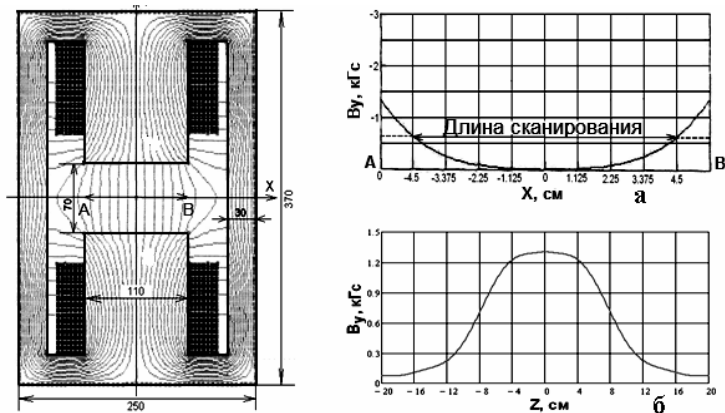


Рис. 26. Сечение сканирующего магнита и распределения поля: а – по оси  $x$ ; б – по оси  $z$ . На рис.2а отмечена длина сканирования электронного пучка в горловине, равная 9 см.

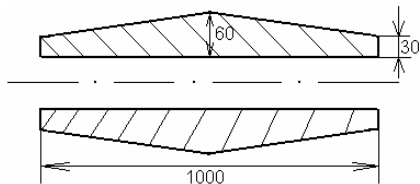


Рис. 27. Линза Пановского (вид сверху).

параметрами пучка. Из этого рисунка видно, что плотность тока на краях фольги уменьшается, и для достижения равномерности дозы скорость сканирования пучка к краям должна снижаться. Расчеты показали, что оптимальным распределением поля сканирующего магнита является распределение, представленное на рис.29 (выделенная часть синусоиды).

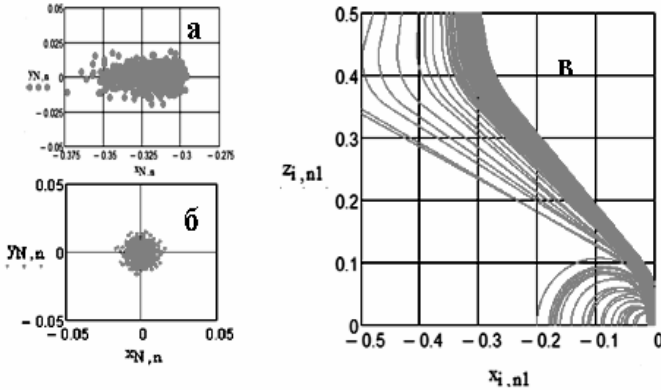


Рис. 28. Распределение пучка при максимальном (а) и нулевом (б) значениях амплитуды поля сканирующего магнита, а также траектории электронов до максимума поля (в).

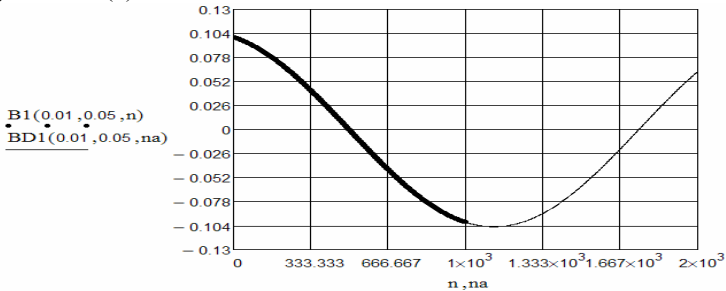
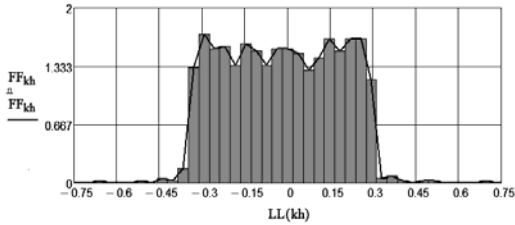


Рис. 29. Поле сканирующего магнита.

При таком поле сканирующего магнита получаем распределение плотности тока пучка на фольге, изображенное в виде гистограммы на рис.30. Эта гистограмма была получена при помощи известной формы магнитного поля в вакуумной части развертывающего магнита, а также расчётных траекторий электронов после прохождения поворотного магнита и доворотной линзы (линзы Пановского).

Также следует отметить, что часть электронов после прохождения поля сканирующего магнита отклоняется таким образом, что остаётся в области горловины раструба и способствует её нагреву (см. рис.28в). Это



подразумевает необходимость создания соответствующей системы охлаждения горловины.

Рис. 30. Гистограмма расчётной (сверху) и измеренной (снизу) плотности тока пучка на фольге.

### 4.3. Расчёт коэффициента связи магнита с горловиной раструба

При параллельном включении обмоток была отдельно измерена индуктивность каждой из катушек магнита без кожуха развёртки:  $L_{11} = L_{12} = 0.656$  мГн. Индуктивность катушки в рабочей сборке с горловиной (т.е. с учётом замкнутого витка кожуха развёртки) составила:  $L'_{11} = 0.466$  мГн, а при закороченной второй катушке  $L''_{11} = 0.453$  мГн. Используя соотношения (1.4) из главы 1.1, получаем коэффициенты связи:  $k_1 = 0.17$  и  $k_2 = 0.54$ .

Отсюда находим  $L_1 = L'_{11} \cdot (1 + k_1) = 0.545$  мГн, а также (по формулам (1.5)):

$$L_{1_{\text{эКв}}} = L_1 (1 - 2k_2^2) = 0.545 \cdot (1 - 2 \cdot 0.54^2) = 0.23 \text{ мГн}$$

– для параллельного включения катушек (наш случай);

$$L_{1_{\text{эКв}}} = 2L_1 (1 - 2k_2^2) = 2 \cdot 0.545 \cdot (1 - 2 \cdot 0.54^2) = 0.46 \text{ мГн}$$

– для их последовательного включения;

$$k_{\text{эКв}} = \sqrt{2} k_2 = \sqrt{2} \cdot 0.54 = 0.76$$

– коэффициент связи горловины с двумя питающими развертку катушками.

Следует отметить, что при измерении суммарной индуктивности катушек, включенных параллельно, было получено значение индуктивности 0.265 мГн, что совпадает с результатом нашего вывода.

#### 4.4. Схема цепи магнита в рабочей сборке с горловиной

Для питания магнита, с целью получения равномерной плотности развёрнутого пучка на фольге, была предложена следующая схема (рис.31). Наличие корректирующей цепи  $L_3$  и  $C_3$  позволяет компенсировать сильное затухание, вносимое замкнутым витком металлического кожуха развертки.

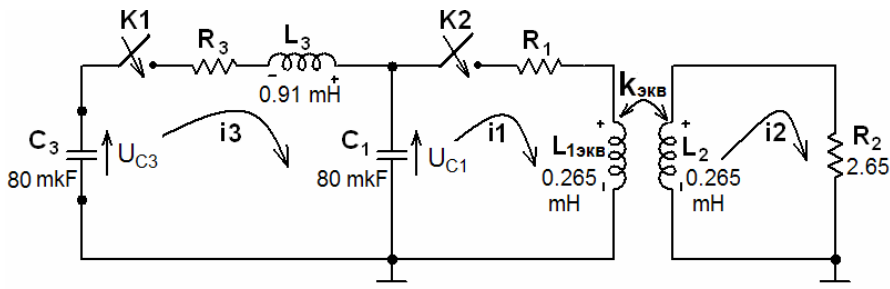


Рис. 31. Схема рабочей цепи сканирующего магнита с учётом горловины.  $i_1$ ,  $i_2$  и  $i_3$  – токи в контурах. Ключи K1 и K2 включаются одновременно.

Используемая горловина имеет отношение  $L_2/R_2 = 10^{-4}$  с, поэтому, принимая для удобства расчёта  $L_2 = L_{1ЭКВ}$ , где  $L_{1ЭКВ}$  – суммарная индуктивность катушек магнита, получаем  $R_2 = 2.65$  Ом. Расчёт проводился для  $U_{C1} = U_{C3} = 700$  В. Далее, записывая уравнения для каждого контура, получим:

$$\begin{cases} L_3 \cdot \frac{di_3(t)}{dt} + R_3 \cdot i_3(t) + U_{C3}(t) - U_{C1}(t) = 0 \\ L_{1ЭКВ} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + R_1 \cdot i_1(t) + U_{C1}(t) + M_{ЭКВ} \cdot \frac{di_2(t)}{dt} = 0 \\ L_2 \cdot \frac{di_2(t)}{dt} + R_2 \cdot i_2(t) + M_{ЭКВ} \cdot \frac{di_1(t)}{dt} = 0 \end{cases}, \quad (4.1)$$

где  $M_{ЭКВ} = k_{ЭКВ} \cdot \sqrt{L_{1ЭКВ} \cdot L_2}$  – взаимная индуктивность первичного и вторичного контуров,  $R_1$  и  $R_3$  – сопротивления в первом и третьем контурах.

Численное решение данной системы уравнений даёт следующие графики (см. рис.32). Необходимо отметить, что данные результаты были получены при условии, что  $R_1 = R_3 = 0$ . Таким образом, мы учитываем только влияние горловины раструба на результирующее магнитное поле в вакууме.

На рис.33 представлены осциллограммы тока пучка и тока развёртки с реальными параметрами, полученные экспериментально в линейном (выпуск пучка в одно окно) и четырёхоконном (пучок выпускается в 4 окна: 2 верхних и 2 нижних) режимах работы системы развёртки.

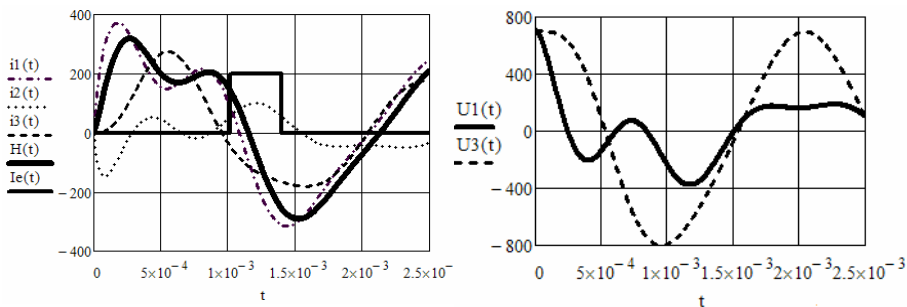


Рис. 32. Графики токов (слева) и напряжений (справа) цепи сканирующего магнита.  $I_e$  – ток пучка ИЛУ,  $H(t)$  – магнитное поле в вакуумной части развертывающего магнита.

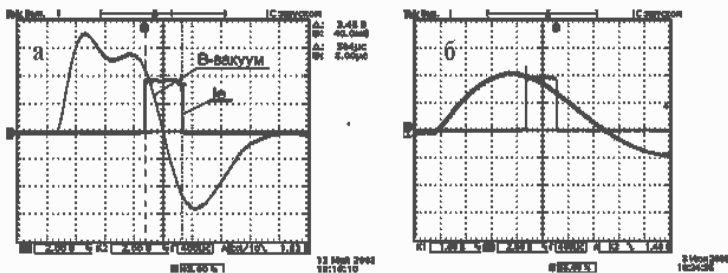


Рис. 33. Осциллограммы тока пучка и тока развёртки: а – линейный режим, б – четырёхквонный режим работы развёртки.

На основе полученных результатов спроектирована конструкция сканирующего магнита. Он имеет прямоугольный разборный магнитопровод, на котором расположена пара полюсов с двумя катушками, на каждую из которых намотано по 30 витков. Магнитопровод сечением  $25 \times 55 \text{ мм}^2$  набран из электротехнической стали толщиной 0,35 мм и пропитан эпоксидным компаундом по методу «Монолит». Полюса сечением  $100 \times 110 \text{ мм}^2$  изготовлены также как и магнитопровод.

#### 4.5. Принцип работы блока управления разверткой

Восемь сигналов (K1-K2, K3-K8, K4, K5, K6, K7, ССМ Inhibit) являются основными управляющими импульсами системы развертки пучка и выходят непосредственно с микропроцессора, кроме последнего, который идет с транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Эти сигналы поступают в блок запусков развертки БЗР, где усиливаются и далее поступают на оптористорные ключи с соответствующими названиями K1-K10 (см. рис. 35). Последовательность подачи этих сигналов показана на рисунке 34.

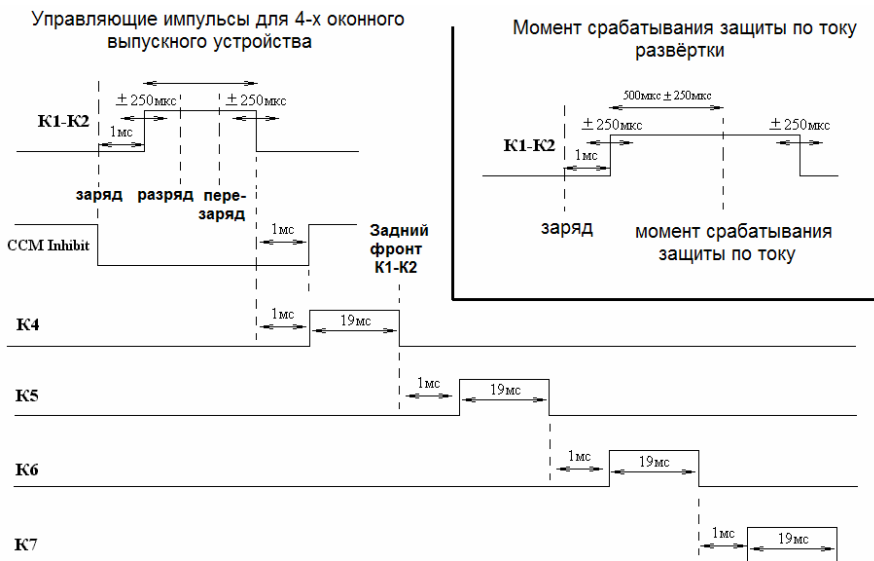


Рис. 34. Последовательность подачи сигналов в системе развёртки пучка.

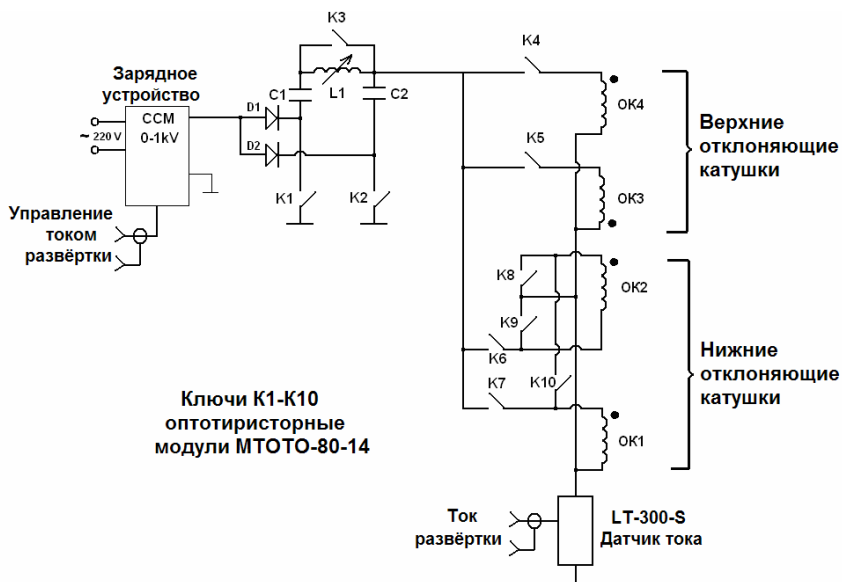


Рис. 35. Блок-схема системы развёртки ускорителя.

Когда ключи K1-K2 открываются, начинается процесс разряда конденсаторов через соответствующие катушки системы развертки, при этом ключ K3 закрыт, и разряд емкости C1 идет через регулируемую индуктивность L, что несколько увеличивает время её разряда. Все ключи кроме K9, K10 и K7 закрыты, поэтому разряд емкостей идет только двумя путями, через нижние отклоняющие магниты выпускного устройства. Путь тока следующий: через K7 ток идет сквозь нижнюю катушку ОК1 и параллельно через ключ K10 и катушку ОК2, далее через ключ K9 на землю.

В линейном режиме сигналы идут в такой последовательности: по импульсу «заряд» микропроцессор отсчитывает задержку приблизительно 1 мс, которую можно регулировать из программы в диапазоне  $\pm 250$  мкс (регулировка переднего фронта) и выдает передний фронт импульса K1-K2. После этого микропроцессор отсчитывает задержку 2 мс, которую тоже можно регулировать из программы  $\pm 250$  мкс (регулировка заднего фронта) и выдает задний фронт, оканчивая импульс K1-K2. Выстрел ускорителя происходит в течение импульса K1-K2. Сигнал заряда источником конденсаторов ССМ Inhibit (ССМ – модуль зарядки конденсаторов) подается через 1 мс после окончания K1-K2 и заканчивается по сигналу «заряд» непосредственно перед выстрелом. При этом сигналы K9-K10, K7 – в состоянии 1, а K3-K8, K4, K5, K6 – в состоянии 0. При этом частота выстрела может быть от 0 до 60 Гц. Глядя на рис.35, можно понять, что во время выстрела ускорителя заряд конденсаторов C1 и C2 прекращается, так как сигнал ССМ Inhibit, идущий в зарядное устройство, снимается.

В 4-оконом режиме работы развертки сигналы K1-K2 и ССМ Inhibit идут совершенно также, а сигналы K4, K5, K6, K7 запускают выстрел в соответствующие окна и подаются по очереди, передний фронт через 1 мс - после заднего фронта K1-K2, а задний фронт по переднему фронту K1-K2, далее следующее окно, а прочие не подаются и так по очереди. Подавая или не подавая импульсы K4, K5, K6, K7, можно стрелять как только в одно окно, так и в часть из них или во все по очереди. Ключи K9-K10 всегда в состоянии 0, а K3, K8 в состоянии 1.

Из написанного выше понятно, что в 4-оконом режиме ключи K3 и K8 всегда открыты, это означает, что ток разряда емкостей C1 и C2 идет непосредственно на одну из 4-х катушек, минуя индуктивность L. В зависимости от номера окна, в который происходит выстрел, путь тока лежит либо через ключ K4 и катушку ОК4, либо ключ K5 и катушку ОК3, либо через ключ K6, катушку ОК2 и ключ K8, либо, в последнем случае, через ключ K7 и катушку ОК1.

В блоке реализована двухуровневая защита от зависания микропроцессора. Она состоит, во-первых, из встроенного Watchdog таймера со временем срабатывания 15 мс, а, во-вторых, из внешней аппаратной защиты на базе RC генератора и делителя. В случае если микропроцессор не сбросит делитель за 15 мс, произойдет аппаратный сброс микропроцессора. При

срабатывании сброса микропроцессора по любой причине происходит отключение модулятора, и сигнал поступает на блок быстрых защит (ББЗ) для контроля причин срабатывания.

Программа управления ускорителем позволяет регулировать следующие параметры блока: задержка переднего фронта К1-К2 относительно сигнала «заряд» на  $1 \text{ мс} \pm 250 \text{ мкс}$  (включая независимую задержку переднего фронта для каждого из окон в режиме 4-оконного выпускного устройства), задержка заднего фронта относительно переднего на  $2 \text{ мс} \pm 250 \text{ мкс}$ . Также предусмотрена возможность включать и выключать окна выпуска пучка в любой последовательности и контролировать причины срабатывания защит блока в программе.

#### 4.6. Тепловой режим системы развертки ИЛУ-10

Расчет потерь в магните развертки и в разделительном по вакууму нержавеющей кожухе проводим, используя полученные при решении системы уравнений (4.1) зависимости токов и напряжений для эквивалентной схемы развертки (рис.32). Длительность цикла развертки для однооконного варианта выпуска равна 2.1 мс. В это время контурные токи  $I_1(t)$  и  $I_3(t)$  равны нулю и схемным образом, при применении тиристоров, колебания в контурах можно остановить. Емкость С1 практически полностью разряжается, а емкость С3 перезаряжается (для случая  $R_1 = R_3 = 0$ ).

Следовательно в контуре кожуха развертки рассеивается энергия, запасаемая в С1. Для рабочего напряжения равного 700 В эта величина равна 20 Дж и, соответственно, при частоте повторения 50 Гц мощность потерь в горловине составляет около  $P_2 = 1000 \text{ Вт}$ . Площадь поверхности горловины  $S_{\Gamma} = 400 \text{ см}^2$ , а тепловая нагрузка поверхности тонкостенного кожуха развертки составляет  $2.5 \text{ Вт/см}^2$ . Это значение практически равно тепловым нагрузкам выпускной фольги ускорителей типа ИЛУ. Также как и для фольговых систем выпуска, для охлаждения поверхности горловины применяется сжатый воздух. Через центральную часть полюса магнита с двух сторон подводится сжатый воздух. Для типовых устройств воздушного охлаждения скорость потока воздуха составляет 10 м/с. Для такой скорости потока коэффициент теплоотдачи в воздухе составляет  $0.05 \text{ Вт/см}^2\text{°C}$ . Оценочная величина температурного перепада между горловиной и элементами электромагнита равна  $50\text{°C}$ . Тепловыделение в обмотках магнита L1 и подстроечной индуктивности L3 определяем аналитически из решений системы уравнений (4.1). Потери в них на рабочей частоте повторения сравнительно малы и составляют величины  $P_1 = 55 \text{ Вт}$  и  $P_3 = 103 \text{ Вт}$ .

Следует еще раз отметить, что основным источником активных потерь в системе развертки являются вихревые потери в горловине, которые могут достигать 1 кВт. Реализуемый режим сканирования  $\pm 50^\circ$  для энергии



электронов, равной 5МэВ, является практически предельным по тепловыделению для данной конструкции горловины. Для предотвращения распространения тепла от горловины с ее обеих сторон установлены медные водоохлаждаемые диафрагмы.

## Литература

- [1] *Куксанов Н.К., Салимов Р.А., Черепков В.Г.* Выпуск в атмосферу развернутого электронного пучка с током до 100 мА. // ПТЭ №4, 1988.
- [2] *Свиньин М.П.* Расчет и проектирование высоковольтных ускорителей электронов для радиационной технологии. // М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [3] *Ауслендер В.Л. и др.* Импульсный высокочастотный линейный ускоритель электронов ИЛУ-10. Новосибирск, 2002 (Вестник «РАДТЕХ-ЕВРАЗИЯ»; № 1 (11)).
- [4] *Васильев В.В. и др.* Проводящие оболочки в импульсном электромагнитном поле. // М.: Энергоатомиздат, 1982.
- [5] *Auslander V.L. et al.* Technique of design and calculation of extraction devices for electron accelerators. // Preprint BINP 2004-27, Novosibirsk, 2004.
- [6] *Акрачкова Л.Л. и др.* Повышение эффективности облучения электронным пучком цилиндрических объектов с помощью магнитных систем. // Атомная энергия, 1982, Т.53, вып.5.
- [7] *Вейс М.Э. и др.* Подпучковое оборудование для расширения технологических возможностей ускорителей ЭЛВ. // Новосибирск, 2002 (Вестник «РАДТЕХ-ЕВРАЗИЯ»; № 1 (11)).
- [8] *Блейвас И.М. и др.* Программа для решения на ЭЦВМ БЭСМ-6 трехмерных задач электроники. Новосибирск, 1970. - Труды III Всесоюзного семинара.

*В.В. Безуглов, А.А. Брызгин, Л.А.Воронин,  
Е.Н. Кокин, А.Н. Лукин, А.М. Молокоедов,  
В.М. Радченко, Н.Д. Ромашко, Е.А. Штарклев*

**Методика расчёта и конструирования  
выпускных устройств для импульсных ускорителей  
электронов серии ИЛУ**

*V.V. Bezuglov, A.A. Bryazgin, L.A. Voronin,  
E.N. Kokin, A.N. Lukin, A.M. Molokoevov,  
V.M. Radchenko, N.D. Romashko, E.A. Shtarklev*

**Calculation and design technique of escapement mechanisms  
for pulse electron accelerators of ILU type**

ИЯФ 2008-23

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 27.08. 2008 г.

---

Сдано в набор 28.08. 2008 г.

Подписано в печать 29.08. 2008 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 2.9 печ.л., 1.7 уч.-изд.л.

Тираж 95 экз. Бесплатно. Заказ № 23

---

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11