

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

КОГУТ ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЗЛОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ
УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ПАРАМЕТРОВ**

01.04.20 - Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук

КУКСАНОВ Николай Константинович

Новосибирск 2020

Оглавление:

Введение.....	4
Глава 1. Системы высоковольтного питания и способы вывода через фольгу в атмосферу пучка электронов в ускорителях ЭЛВ.....	13
1.1 Типы промышленных ускорителей электронов.....	13
1.2 Архитектура и особенности ускорителей ЭЛВ.....	15
1.3 Использование пучка электронов. Обзор систем подпучкового оборудования ускорителей.....	20
1.4 Повышение эффективности использования ускорителей за счет интеграции с оборудованием технологических линий.....	25
Глава 2. Модели каскадных генераторов для модернизации высоковольтной колонны ускорителей ЭЛВ.....	27
2.1 Оценка требуемого уровня пульсаций энергии.....	27
2.2 Моделирование работы инвертора напряжения и высоковольтной колонны.....	29
2.3 Анализ параметров работы электронных компонентов высоковольтной колонны.....	38
2.4 Сравнение режимов работы каскадных генераторов по схеме удвоения и последовательно-параллельной схеме выпрямительных секций. Обоснование использования схемы на диодных мостах для секций на краях высоковольтной колонны.....	45
2.5 Сопоставление результатов моделирования высоковольтной колонны с секциями, собранными по последовательно-параллельной схеме с результатами измерений на реальных ускорителях ЭЛВ.....	53
2.6 Расчет пульсаций напряжения высоковольтной колонны для ускорителя БНЗТ.....	57
Глава 3. Методика повышения однородности электронно-лучевой обработки материалов ускорителями ЭЛВ.....	68
3.1 Модель отклоняющей системы.....	68

3.2 Анализ геометрии магнитов сканирующей системы.....	69
3.3 Сопоставление моделей с реальными измерениями и учет рассеяния пучка электронов на фольге и в воздухе.....	73
3.4 Изменение формы тока отклоняющих магнитов.....	75
Глава 4. Использование системы четырехстороннего облучения для оптимизации процесса радиационной обработки кабелей.....	84
4.1 Оценка азимутальной однородности дозы облучения для систем 2х- и 4х-стороннего облучения кабельной продукции.....	85
4.2 Описание работы системы четырехстороннего облучения.....	91
4.3 Настройка и установка устройства.....	94
4.4 Практика применения, результаты использования опыт эксплуатации.....	102
Глава 5. Информационное измерительное сопровождение ускорителей электронов ELV и сопутствующего технологического оборудования.....	107
5.1 Реализация информационной системы.....	108
5.2 Инсталляция на ОАО «Подольсккабель»: результаты и опыт использования.....	112
Заключение.....	114
Список литературы.....	116

Введение

В настоящее время во всем мире существует более 1400 сильноточных ускорителей электронов в промышленной коммерческой эксплуатации [1]. Технологии с применением электронно-лучевой обработки веществ и материалов в различных отраслях промышленности позволяют получать материалы как с лучшими, так и с качественно новыми физико-химическими свойствами. Ускорительное оборудование может входить в состав технологической цепочки как часть комплекса промышленного высокотехнологичного оборудования или использоваться независимо. Важным преимуществом применения ускорителей является отсутствие проблем безопасности, транспортировки и утилизации, которые имеют место при использовании долгоживущих изотопов, являющихся источниками гамма-излучения, таких, как кобальт-60, традиционно задействованных в промышленных применениях (в основном для стерилизации изделий). С появлением мощных ускорителей электронов их использование как в режиме прямого облучения пучком электронов, так и в режиме преобразования мощности электронного пучка в рентгеновское излучение в настоящее время является коммерчески жизнеспособной альтернативой промышленному использованию гамма-излучения [2, 3, 4], что подтверждается статистикой МАГАТЭ – количество мощных ускорителей электронов, осуществляющих коммерческую радиационную обработку в мире, превышает количество коммерческих изотопных источников в 8-9 раз.

Современные промышленные технологии, использующие радиационную модификацию материалов, предъявляют к ускорителям три основных требования [1]:

- **Большая мощность пучка.** В отличие от слабых ускорителей, используемых в исследовательских целях, таких как генераторы Ван-Де-Граафа, любой промышленный ускоритель электронов должен быть в состоянии обеспечить значительную мощность пучка. Типичное значение

лежит в диапазоне от 50 до 100 кВт, что соответствует при энергии 1,0 МэВ току пучка $50 \div 100$ мА, достигая в отдельных случаях 700 кВт.

- **Промышленная надежность.** Ускорители должны быть доступны для использования двадцать четыре часа в сутки, семь дней в неделю. В качестве примера можно привести организацию работ по техническому обслуживанию парк из более 20-ти ускорителей, описанную в [5], и частный опыт китайских компаний Shenzhen Woer Heat-Shrinkable Material Co. и Guangzou Kaiheng Enterprize Group Co., где комплексы из 12 ускорителей ЭЛВ организованы таким образом, что промышленные системы обработки электронным пучком готовы к использованию более 99% времени, показывая высокую надежность по сравнению с другим промышленным оборудованием, входящим в данные технологические процессы.
- **Промышленное доверие (промышленный авторитет)** определяется надёжностью работы оборудования, качеством гарантийного обслуживания и послегарантийного сервиса, готовностью поставщика адаптировать существующее оборудование к условиям новых техпроцессов. Поскольку установка и подготовка к работе электронных ускорителей в высоком и среднем диапазоне энергий требует значительных капитальных вложений, авторитет поставщика приобретает первостепенное значение для успеха всей отрасли.

Начиная с 1971г., Институт Ядерной Физики имени Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ) разрабатывает и производит модельный ряд ускорителей электронов типа ЭЛВ для применения их в промышленных и исследовательских радиационно-технологических установках [6], и по данным МАГАТЭ входит в число наиболее надежных производителей электронных ускорителей для промышленного применения. Ускорители электронов серии ЭЛВ перекрывают диапазон энергий ускоренных электронов от 0,3 до 2,5 МэВ при мощности пучка отдельной машины от 20 до 100 кВт [7]. Использование унифицированных систем и узлов позволяет с минимальными затратами адаптировать их к конкретным требованиям

технологических процессов, таким как диапазон энергий, мощность пучка ускоренных электронов, длина выпускного окна и т.д. Конструктивные и схемные решения предусматривают длительную и круглосуточную работу ускорителей в условиях промышленного производства.

Выход на рынок новых производителей ускорительного оборудования обостряет конкуренцию, а возрастающий спрос на радиационно-модифицированные материалы формирует у индустриальных пользователей потребность как в более мощных электронных ускорителях, позволяющих увеличить объемы выпускаемой продукции при низкой стоимости обслуживания, так и заинтересованность к увеличению эффективности уже работающего оборудования.

В связи с тем, что основные технологические процессы, в которых задействованы ускорители ЭЛВ, связаны с радиационной обработкой полимеров и используют диапазон энергий до 1,5МэВ, совершенствование модельного ряда ЭЛВ идет по следующим направлениям:

- увеличение тока пучка ускорителей с энергиями в диапазоне $0,5 \div 1,5$ МэВ [2] и при максимальной выходной мощности до 100кВт в пучке;
- разработка ускорителей ЭЛВ с параметрами, удовлетворяющими новым технологическим применениям и требованиям научных исследований;
- адаптация ускорителей ЭЛВ при модернизации существующего устаревшего ускорительного оборудования;
- более глубокая интеграция ускорителей с существующим технологическим оборудованием для повышения эффективности использования пучка и автоматизации производственных процессов, в том числе оптимизации рабочего времени обслуживающего персонала.

Поэтому исследования, направленные на решение указанных задач, сохраняют свою актуальность.

Цели работы:

- Проведение исследований и разработка моделей каскадных генераторов трансформаторного типа мощностью до 100 кВт для ускорителей ЭЛВ, предназначенных для работы в диапазоне энергий $0,8 \div 1,5$ МэВ и током пучка до 100мА, для расчета параметров работы элементов каскадных генераторов и пульсаций энергии пучка с учетом изменившейся компонентной базы высоковольтной колонны.
- Поиск возможностей для повышения эффективности использования инжектируемых пучков электронов и ускорителей при промышленной радиационной модификации материалов.

Для достижения данных целей предполагалось решить следующие **задачи**:

1. На основе анализа существующей современной компонентной базы предложить модели высоковольтной колонны, удовлетворяющие требованиям промышленных технологических процессов по величине пульсаций энергии. Сопоставить расчетные данные моделей с экспериментальными, проанализировать характер наблюдаемых пульсаций энергии.
2. Исследовать возможности повышения эффективности использования электронного пучка в технологических процессах, в том числе, предложить способы (методики) повышения однородности облучения для разных типов обрабатываемого материала (кабели и пленки).
3. Предложить способы повышения эффективности использования оборудования, предварительно проанализировав работу персонала ускорительных комплексов.

Научная новизна состоит в том, что:

1. Создан пакет программ в среде NL, позволяющий моделировать работу основных систем ускорителей ЭЛВ, таких как транзисторный преобразователь частоты и высоковольтный выпрямитель. На основе проведенного моделирования доказано положительное влияние существующих конструктивных емкостей высоковольтной колонны на размер пульсаций энергии. Проведен расчет работы новых схемных решений с учётом современной элементной базы. Подтверждена

эффективность последовательно-параллельной схемы включения повышающих секций высоковольтного трансформатора. Проведены расчеты пульсаций энергии при работе каскадного генератора для БНЗТ с учетом конструктивных емкостей высоковольтного фидера и ускорительных электродов.

2. Предложена простая методика повышения однородности дозы за счет изменения скорости сканирования электронного пучка вдоль длины выпускного окна, позволяющая достичь неравномерности дозы облучаемого материала менее 4% при использовании стандартной системы сканирования пучка.
3. Проведена количественная оценка азимутальной неоднородности дозы облучения для двух- и четырёхстороннего способов радиационной обработки типовой кабельной изоляции, показавшая преимущество 4-х стороннего способа облучения по степени однородности дозы. Проведены реальные испытания и приведены результаты сопоставления экспериментальных данных с расчётными. Результаты демонстрируют эффективность использования пучка ускоренных электронов и однородность азимутальной дозы облучения по сравнению с двухсторонним облучением.
4. Создана информационная система по визуализации текущих параметров ускорителя и технологического процесса облучения являющаяся эффективным примером интеграции ускорительного оборудования ЭЛВ в промышленно-технологические процессы

Практическая значимость работы:

1. Сделано сравнение пульсаций энергий при работе на высоковольтных конденсаторах К15-10 10нФ (старая компонентная база) и ТДК (AVX) 3,3÷3,5нФ (новая компонентная база) и обоснована возможность применения высоковольтных конденсаторов с емкостью 3300-3500pF, не ухудшающая основные параметры и надежность работы ускорительного оборудования. Предложенная методика замены неисправных

конденсаторов в схемах каскадных генераторов обеспечила совместимость с уже существующими ускорителями и ремонтпригодность с использованием новых компонентов, благодаря чему выпускаемые в настоящее время модели ускорителей ЭЛВ удовлетворяют требованиям современных технологических процессов.

2 Последовательно-параллельная схема включения повышающих секций высоковольтного выпрямителя позволила создать ускорители с максимальным током 100мА более компактного типоразмера в сравнении с аналогичной по параметрам моделью ЭЛВ-6 при эквивалентных параметрах и упрощенных процедурах обслуживания и ремонта.

3 Смоделирован высоковольтный каскадный генератор для проекта БНЗТ и проведен расчет пульсаций энергии с учетом конструкционных емкостей повышающих секций на экран первичной обмотки и высоковольтного фидера.

3 Методика повышения однородности дозы была реализована при реконструкции ускорителя в 2012 году, и используется при требованиях к распределению однородности дозы облучения менее 4% при обработке пленочных материалов шириной до 2000мм.

4. В настоящее время большинство ускорителей для облучения кабельной изоляции комплектуются системой четырехстороннего облучения.

5 Информационная система по визуализации текущих параметров ускорителя и технологического процесса облучения позволила оптимизировать работу персонала и увеличить выпуск продукции на комплексе из двух ускорителей ЭЛВ и шести приемо-подающих комплексов. Дополнительная фиксация параметров радиационной обработки материалов позволила контролировать качество выпускаемой продукции и используется в качестве арбитражных материалов при выяснении причин брака внутри технологической цепочки.

Личное участие автора состояло в создании моделей высоковольтного выпрямителя ускорителей ЭЛВ и расчете пульсаций энергии при использовании

выпрямительных секций собранных по схеме удвоения и учетверения напряжения и по последовательно-параллельной схеме, моделировании и оценке неравномерности распределения дозы облучения кабелей в поперечном сечении для 2х- и 4х-стороннего облучения, проверке практических результатов применения этой системы, обосновании и разработке метода повышения линейной однородности облучения вдоль длины выпускного окна, разработке и внедрении информационной системы сопровождения технологического процесса облучения кабелей но ОАО «НП «Подольсккабель».

Основные результаты работы, выносимые на защиту:

1. Моделирование схем каскадных генераторов (высоковольтной колонны) для ускорителей ЭЛВ-4 с диапазоном энергий от 0,8 до 1,5 МэВ и мощностью электронного пучка 100 кВт при токе пучка до 100мА с учетом конструктивных емкостей. Расчет пульсаций энергии (напряжения высоковольтной колонны) для проекта БНЗТ.
2. Предложена методика увеличения однородности дозы облучения вдоль длины выпускного окна.
3. Обоснование эффективности использования системы четырехстороннего облучения – количественный расчет и результаты измерений при практическом применении.
4. Информационная система визуализации основных параметров и протоколирования технологического процесса радиационной обработки кабелей.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформированы цели и основные задачи исследования, кратко представлено содержание работы, приведены положения, выносимые на защиту, раскрыты научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен краткий обзор архитектуры ускорителей ЭЛВ и стоящие при развитии этого модельного ряда проблемы, обоснованы и сформулированы конкретные задачи, решаемые в соответствующих последующих главах.

Во второй главе проведена оценка допустимого уровня пульсаций энергии при радиационной модификации изоляции кабелей и сформулированы особенности высоковольтных компонентов. Проведены расчеты эквивалентных схем высоковольтного трансформатора с учетом дисковой и цилиндрической частей магнитопровода. Промоделирована работа преобразователя частоты для каскадных генераторов трансформаторного типа от трехфазной сети переменного тока. Рассмотрены модели высоковольтных колонн с расчетом пульсаций энергии и параметров работы электронных компонентов выпрямительных секций с учетом конструктивных емкостей. Сделаны расчеты пульсаций энергии ускорителя БНЗТ.

В третьей главе дано обоснование и расчет моделей отклоняющей системы с переменной скоростью сканирования пучка электронов вдоль длины выпускного окна ускорителя. Приведены варианты изменения формы тока отклоняющих магнитов, и методика оценки дозы облучения вдоль координаты сканирования пучка. Показаны результаты реальных измерений дозы, полученных с применением описанной методики.

В четвертой главе описаны результаты моделирования в среде Mathcad распределений неоднородности дозы облучения для методов двусторонней и четырехсторонней радиационной обработки кабелей и их сравнительный анализ и изложена работа системы четырехстороннего облучения, Приведены результаты измерения азимутального распределения дозы. Описана методика настройки данной системы.

В пятой главе дано обоснование создания и реализации информационной системы контроля процесса облучения. Приведена описание системы, функциональная схема, программы управления и визуализации, результаты внедрения на ОАО «НП Подольсккабель».

Апробация работы: Основные результаты работ докладывались на следующих конференциях:

1. 1st International Symposium on Polymer Modification with High Energy Electrons (Дрезден, Германия, 2010),

2. X Международном семинаре по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В. П. Саранцева (Алушта, Россия, 2013),
3. XXII и XXIII Международных семинарах по ускорителям заряженных частиц (IWCPA-2011 и IWCPA-2013, Алушта, Россия),
4. X и XII Международных конференциях по электронно-лучевым технологиям (EVT-2014 и EVT-2016, Варна, Болгария),
5. XXII, XXIII и XXIV Российской конференциях по ускорителям заряженных частиц (RuPAC-2010 (Протвино), RuPAC-2012 (Санкт-Петербург), RUPAC-2014 (Обнинск)),
6. IV Российской конференции "Актуальные проблемы химии высоких энергий" (Москва, 2015), --
7. 24th Конференции по применению ускорителей в Исследованиях и Промышленности (CAARI-2016, Fort Worth, TA USA, 2016).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано **8 статей в отечественных (4) и зарубежных журналах(4), из которых 3 работы опубликована в реферируемом ВАК издании.**

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 76 иллюстраций, 15 таблиц и 66 наименований библиографии.

Глава 1

Системы высоковольтного питания и способы вывода через фольгу в атмосферу пучка электронов в ускорителях ЭЛВ

1.1 Типы промышленных ускорителей электронов

Ускорители электронов разрабатывались с начала 20-го века, в промышленности они стали применяться с 40-х годов [1]. Радиационно-химические технологии с применением ускорителей электронов к настоящему времени прочно закрепились в структуре мирового промышленного производства, подтвердив свою эффективность, а в ряде случаев и уникальность. Промышленность использует пучки электронов в диапазоне энергий от 80 кэВ до 10 МэВ.

Мощные промышленные ускорители электронов делятся на 2 основных класса – ускорители прямого действия и высокочастотные (ВЧ) ускорители (в частности, линейные ускорители, так называемые линаки). В рассматриваемых в данной работе ускорителях прямого действия ускорение электронов происходит под воздействием постоянного электрического поля, формируемого разницей потенциалов на концах ускорительной трубки. Сторона, на которой происходит инжекция электронов в трубку, обычно расположена под высоким отрицательным потенциалом, выпускной конец – заземлен. Электронный инжектор выполнен в виде электронной пушки с подогреваемым катодом и величина тока пучка регулируется изменением мощности накала катода или напряжением вытягивающего электрода. Энергия электронов определяется зарядом электрона, умноженным на разность потенциалов между катодом и землёй и традиционно измеряемым в электрон-вольтах (eV), поскольку устройство выпуска пучка находится под нулевым потенциалом.

В высокочастотных ускорителях электроны ускоряются переменным во времени электрическим полем, возбуждаемом в резонаторе или многорезонаторной ускоряющей структуре. В этом случае электроны приобретают

энергию равную произведению заряда электрона на интеграл электрического поля вдоль траектории движения электрона.

За десятилетия работы в промышленности произошёл процесс естественного отбора, и не все конструкции оказались подходящими для промышленного использования. Доверие рынка промышленных ускорителей (выражающееся в регулярных поставках машин определённого типа в промышленность) сумели завоевать 4 типа машин:

1. Ускорители прямого действия на основе каскадных генераторов с ёмкостной связью. Эти ускорители основываются на схеме с последовательным питанием каскадов Кокрофта-Уолтона [9], усовершенствованной «Nissin-High Voltage Co.» (Mizusawa), схеме с параллельной ёмкостной связью, предложенной М. Шенкелем (M. Schenkel) в 1919 усовершенствованной и используемой в разработанных в 60-х гг. К. Моргенштерном (K. Morgenstern) и М. Клиландом (M. Cleland) каскадных генераторах, получивших название динамитрон [10];
2. Ускорители прямого действия на основе каскадных генераторов с индуктивной связью с параллельным питанием каскадов, представленные на рынке семейством ЭЛВ с секционированным выпрямителем [8], ускорителями на основе высоковольтного трансформатора компании HVES (USA) с изолированным сердечником (ICT), предложенного Ван-де-Граафом в 1960, и ускорители на основе резонансного трансформатора НИИЭФА;
3. Высокочастотные ускорители ИЛУ и линейные ускорители (линаки);
4. Высокочастотные ускорители типа Родотрон (Rhodotron).

Ускорители первых двух типов являются машинами прямого действия, в которых электроны приобретают энергию равную напряжению, приложенному к ускорительной трубке. Отличаются эти ускорители конструкцией высоковольтного генератора (выпрямителя), который обеспечивает генерацию постоянного (с небольшими пульсациями) напряжения. Ускорители последних двух типов – высокочастотные машины.

Выбор типа ускорителя при практическом промышленном, медицинском или научно-исследовательском применении определяется необходимым уровнем энергии использующего облучение процесса и мощностью пучка электронов. Рассматриваемые в данной работе ускорители электронов на основе высоковольтных каскадных генераторов нашли широкое технологическое и научное применение в диапазоне энергий от 400 кэВ до 3 МэВ.

1.2 Архитектура и особенности ускорителей ЭЛВ

Ускорители ЭЛВ построены с использованием унифицированных систем и узлов, что позволяет с минимальными затратами адаптировать их к конкретным требованиям технологических процессов, таким как диапазон энергий, мощность пучка ускоренных электронов, длина выпускного окна [6].

Общий вид ускорителя ЭЛВ показан на Рис. 1.1. Внутри сосуда, заполненного электроизолирующим газом SF_6 расположены первичная обмотка, высоковольтный выпрямитель со встроенной внутрь ускорительной трубкой, высоковольтный электрод и блок управления инжектором. Характерной особенностью этих ускорителей является расположение ускорительной трубки внутри колонны выпрямительных секций, что позволило создать ускоритель с компактными размерами. Под сосудом расположены элементы вакуумной системы и выпускное устройство (раструб). Электроны, эмитированные катодом на верхнем конце ускорительной трубки, на выходе из ускорителя имеют полную энергию – eU_0 , U_0 – напряжение, создаваемое высоковольтным выпрямителем. Пройдя сквозь элементы вакуумной системы, ускоренные электроны попадают в выпускное устройство, где с помощью электромагнитов сканирования (развертки) равномерно распределяются по площади выпускного окна и выводятся в атмосферу через титановую фольгу $40 \div 60$ мкм под которой располагается облучаемый материал.

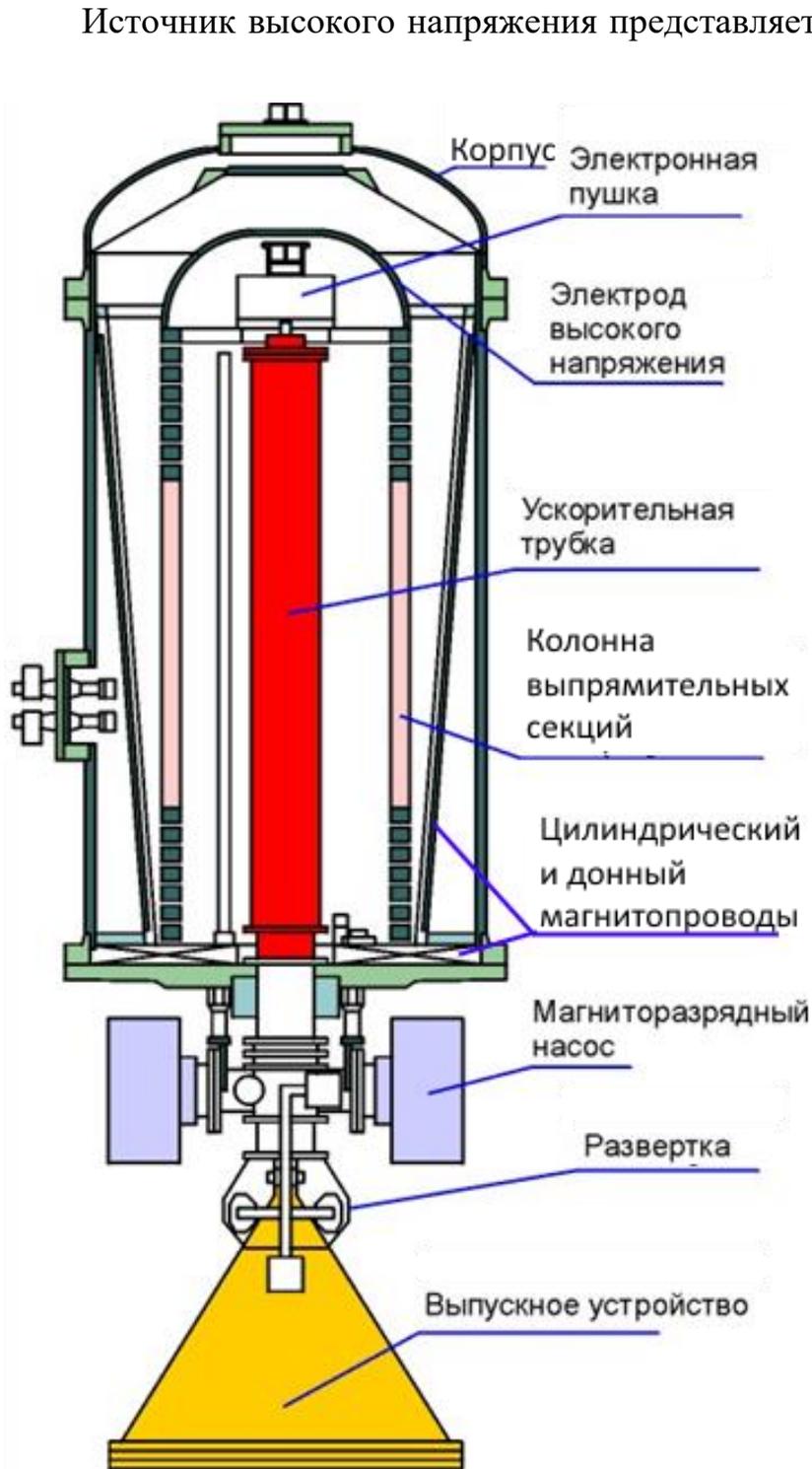


Рисунок 1.1. Структура ускорителя ЭЛВ с одной выпрямительной колонной.

которого расположен блок управления инжектором электронов. Ускорители ЭЛВ с разными диапазонами энергии и мощности различаются числом выпрямительных

параллельной индуктивной связью. Первичная обмотка генерирует переменный магнитный поток частотой $400 \div 1000$ Гц, который индуцирует в каждой из катушек секций вторичной обмотки напряжение до 20кВ. Каждая секция представляет из себя отдельный унифицированный узел, включающий кроме катушки вторичной обмотки схему выпрямления (Рисунок 1.2), преобразующую переменное напряжение, поступающее с катушки, в постоянное. Между собой секции соединяются последовательно по постоянному напряжению. Сверху колонна заканчивается высоковольтным электродом, внутри

секций и применяемой схемой выпрямления. Энергия электронов регулируется изменением напряжения первичной обмотки.

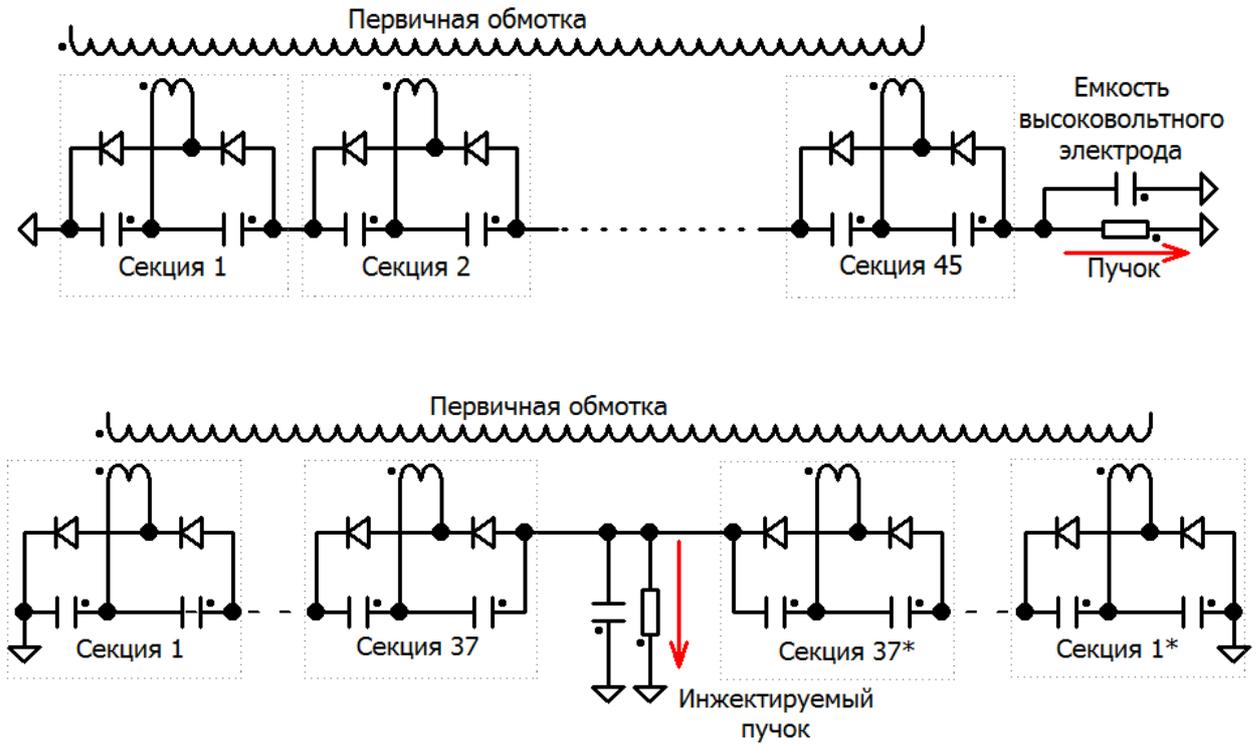


Рисунок 1.2. Последовательное включение секций ускорителей ЭЛВ-4 (а – вверху), параллельное включение высоковольтных колонн повышающих секций в ЭЛВ-6 (б – внизу).

Отличительной чертой архитектуры такого каскадного генератора является отсутствие центрального магнитопровода [13]. В ускорителях ЭЛВ-4 и ЭЛВ-8 генераторы строятся на одной колонне с последовательным соединением секций по схеме, показанной на Рисунке 1.2а. Для увеличения тока пучка до $80 \div 100$ мА в предыдущем поколении ускорителей применялся вариант этой схемы с двумя колоннами (Рисунок 1.2б). Использующий двухколонную архитектуру ускоритель ЭЛВ-6 способен генерировать пучки электронов мощностью до 100Квт в диапазоне энергий 0,8-1,2МэВ [10].

Основным направлением развития серии ускорителей ЭЛВ является повышения мощности выпускаемого пучка электронов. Это позволяет увеличить скорость (объемы) обработки облучаемых материалов, а также снизить

относительные затраты на обслуживающую ускорители инфраструктуру, как-то: систем охлаждения и вентиляции, технологического оборудования и т.д.[14].

При создании новых моделей ускорителей ЭЛВ-4 (Таблица 1) учитывались следующие привходящие условия:

Таблица 1.1. Сравнение параметров ЭЛВ-6 и новых ускорителей ЭЛВ-4-1х

Модель ускорителя	ЭЛВ-6	ЭЛВ-4-1	ЭЛВ-4-1.2	ЭЛВ-4-1.5
Максимальная энергия, МэВ	1,2	1	1,2	1,5
Максимальный ток пучка, мА	83	100	83	70
Мощность пучка, кВт	100	100	100	100
Количество секций	2x37	45	50	45

- Параметры новых ускорителей должны удовлетворять требованиям современных технологических процессов по уровню пульсаций энергии;
- Должна быть обеспечена совместимость новых схем каскадных генераторов с уже существующим оборудованием без усложнения конструкции, обеспечивающая существующую надежность работы и простоту обслуживания;

Необходимо учесть особенности элементной базы высоковольтной колонны, поскольку из-за прекращения выпуска керамических конденсаторов К15-10 10нФ 40кВ, были применены импортные конденсаторы производства AVX и ТДК емкостью 3300÷3500рF с максимальным напряжением 30кВ. Паспортные параметры работы этих элементов приводятся производителем только при работе с постоянным напряжением и без описания допустимых пульсаций. Для оценки возможности использования этих конденсаторов в высоковольтной колонне ускорителей ЭЛВ были проведены испытания ограниченной партии в форсированных режимах, соответствующим требованиям работы конденсаторов в ускорителях. Тестирование высоковольтных колонн ускорителей ЭЛВ-4 и ЭЛВ-8,

собранных на этих компонентах, выявило, что в реальных условиях максимальное рабочее напряжение импортных компонентов значительно снижается, при этом с ростом среднего напряжения размер допустимых пульсаций уменьшается. На Рисунке 1.3 красным цветом отмечена область режимов работы, приводящая к пробоям конденсаторов, зеленым – область стабильной работы, точками обозначены основные режимы

работы конденсаторов в экспериментах;

- по сравнению с предыдущими моделями ЭЛВ4 увеличено количество секций в высоковольтной колонне с 37 до 45;

- для облегчения теплового режима работы

ускорителя желательное уменьшение активной мощности, выделяемой в элементах высоковольтного (в дальнейшем – в/в) выпрямителя;

Для согласования с этими требованиями во второй главе производится оценка допустимого уровня пульсаций энергии пучка электронов при радиационной обработке материалов, рассмотрены математические модели каскадных генераторов, учитывающие особенности вышеуказанных компонентов и проведено сопоставление с реальными измерениями. Также показано, что построенные модели могут эффективно применяться при разработке новых и модернизации существующих каскадных генераторов. В качестве примера на базе данных моделей была смоделирована работа высоковольтной колонны ускорителя для проекта БНЗТ.

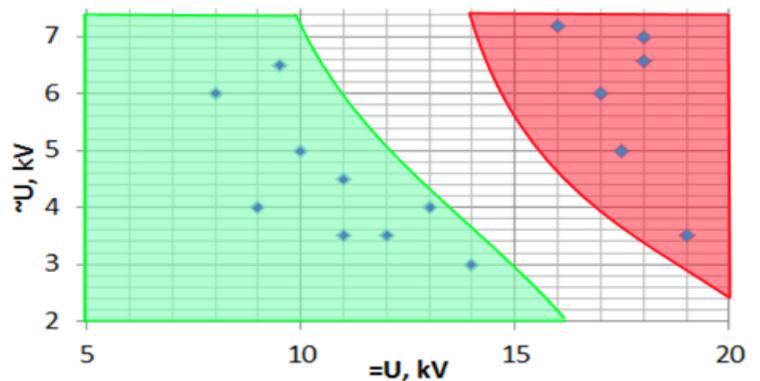


Рисунок 1.3. Диапазоны работы конденсаторов AVX 3300pF 30kV.

1.3. Использование пучка электронов. Обзор систем подпучкового оборудования ускорителей

На протяжении многих десятилетий промышленного использования основные сегменты рынка, применяющие радиационные технологии (Рис. 1.4), подтвердили, что современные промышленные ускорители обладают достаточной надежностью и подходят к их требованиям [1]. На практике, эффективность, с которой используется мощность пучка, во многом зависит от размера и формы облучаемого объекта, организации его транспортировки в зоне облучения. Системы, представляющие собой набор корзин-тележек и обычно используемые в сервисных центрах, могут иметь КПД используемого электронного пучка от 20% до 30%. Как показано в [15, 16] для обработки изоляции кабелей и термоусаживаемых изделий эффективность использования пучка составляет ~ 35%; для толстого листа (в том числе для компонентов авторезины) – ~ 60%.

Эти цифры позволяют оценить значимость повышения эффективности использования электронного пучка за счет применения специализированного подпучкового оборудования. Другим немаловажным требованием, предъявляемым к промышленным облучающим комплексам, является формирование однородного дозного поля, обеспечивающего равномерность облучения.

В ИЯФ СО РАН разработан ряд систем подпучкового оборудования и методов, которые позволяют повысить эффективность использования

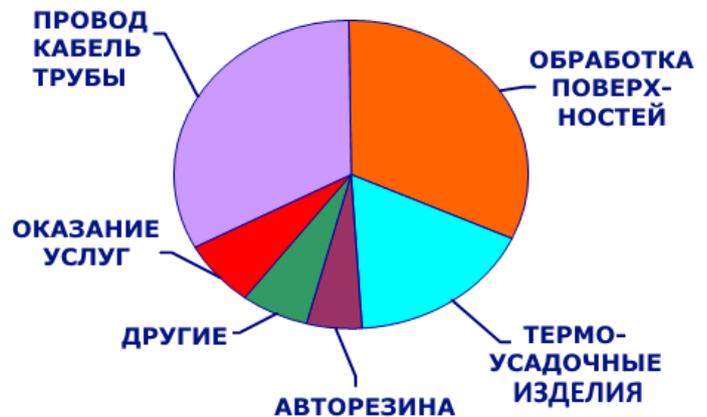


Рисунок 1.4. Основные приложения, использующие сильноточные ускорители электронных пучков

электронного пучка, равномерность дозы облучения [18], адаптированы к типу облучаемого продукта и требованиям технологических процессов [1, 19].

Одностороннее облучение практически не применимо для облучения кабельной продукции, поскольку оно не обеспечивает требуемую однородность поглощенной дозы, так как токопроводящая металлическая жила экранирует часть изоляции от пучка [35]. Тем не менее, оно широко используется для радиационной обработки лент и пленок, и достаточно часто такие технологические процессы предъявляют жесткие требования к однородности облучения. Одним из примеров таких требований может служить условие обеспечения равномерности распределенной дозы не менее 95% при радиационной модификации широких лент, предъявленные не только при инсталляции ускорителей ЭЛВ, но и при модернизации ускорителей других типов. Решение этой задачи и разработка соответствующей методики описываются в Главе 3.

Традиционным способом радиационной обработки изоляции кабелей и термоусаживаемых трубок является многократное экспонирование этих изделий под пучком электронов, разворачиваемым по площади выпускного окна ускорителя (раструба) [36]. Раскладка кабеля под пучком выполнена так, что на каждом витке верхняя и нижняя поверхность кабеля меняются местами, и проводится обработка противоположного участка изоляции. Такой двухсторонний способ облучения позволяет избежать «затемнения» создаваемого металлом жилы и наиболее эффективен при облучении тонких (до ~3-5 мм по диаметру изоляции) проводов [20].

Увеличение количества направлений, с которых производится облучение проводов, позволяет понизить минимальную энергию и увеличить однородность дозы при заданной толщине изоляции. Наиболее эффективно использование кольцевой системы облучения (Рисунок 1.5), позволяющее получить равномерное по азимуту облучение изоляции за один проход провода под пучком и обрабатывать толстостенные термоусаживаемые трубы и провода диаметром до 60 мм. Основным ограничением данной системы является то, что изделие обрабатывается за один проход, что приводит к сильному его разогреву и

неприемлемо при больших дозах. Эффективность использования тока пучка для кольцевых систем не превышает 50%. [21]. Несмотря на это такие системы пользуются спросом, поскольку это единственный метод для радиационной обработки изделий большого диаметра.

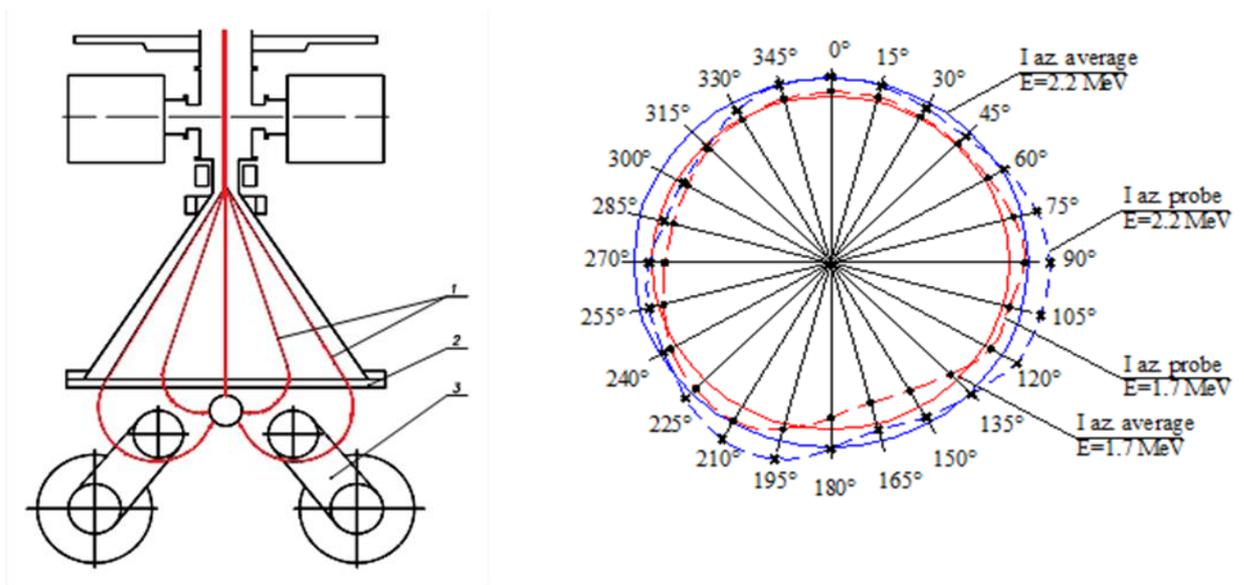


Рисунок 1.5. Система кольцевого облучения (1 - траектории электронов, 2 - выпускное окно, 3 - поворотные магниты) и данные реальных измерений равномерности дозы облучения по азимутальной составляющей.

При двустороннем облучении, особенно для кабелей с толщиной изоляции более 2÷4 мм, характерна азимутальная неравномерность облучения, для уменьшения которой кабель облучается электронным пучком под различными углами [37,38]. Примером такого подхода служит способ перемотки кабеля в процессе облучения, разработанный Шкундиным Л. Р., Финкелем Э. Э., Мироновым Е. И. и Вдовиным В. М. При этом способе облучаемое изделие проходит через две группы роликов разного радиуса, расположенных с противоположных сторон источника облучения. Это обеспечивает поворот кабеля вокруг продольной оси на угол, определяемый соотношением диаметров применяемых роликов [61]. Такая подпучковая транспортная система обеспечивает высокую азимутальную однородность дозы обрабатываемого кабеля, но имеет существенный недостаток, заключающийся в необходимости защиты

механических узлов, находящихся в зоне облучения и трудоемкости их обслуживания с применением специализированных смазочных и очищающих средств, поскольку вся установка находится под воздействием как высокого радиационного фона, так и в агрессивной атмосфере озона и окислов азота.

рисунок

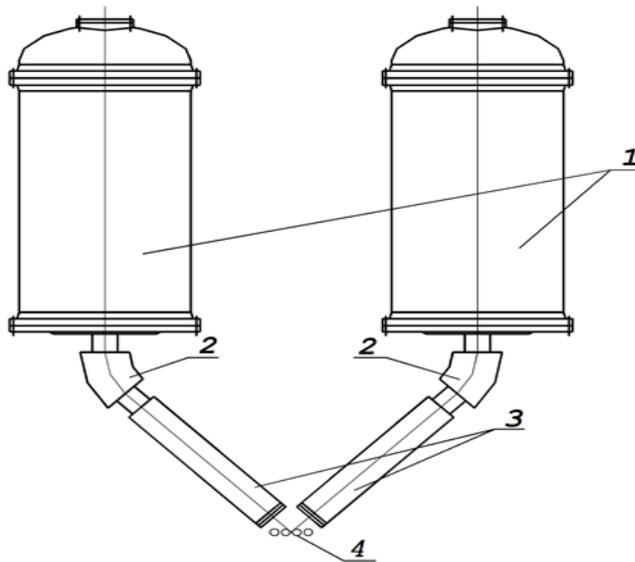


Рисунок 1.6. Схема

четырёхстороннего облучения с использованием двух ускорителей: 1- ускорители электронов; 2-поворотные магниты; 3-выпускные камеры; 4- облучаемое изделие.

подходы, основанные на повороте электронных пучков относительно облучаемого материала, как представленное на Рисунке 1.6 использование двух ускорителей [66] для облучения кабельной заготовки. Такая система помимо высокой стоимости по сравнению со схемами на базе одного ускорителя требует сложного согласования режимов работы двух ускорителей с подпучковой транспортной системой. Более целесообразно использовать облучательный комплекс, состоящий из одного ускорителя и независимой системы электромагнитов, разворачивающих

на 180 градусов неиспользованные электроны, прошедшие через зону размещения кабеля – так называемое «магнитное зеркало». Схема такого комплекса описана в [62] и успешно применялась в течении 30-ти лет, но может быть использована для радиационной обработки не всех типов кабелей.

Дальнейшим развитием данного подхода стала разработанная в ИЯФ система четырехстороннего облучения, которая позволяет увеличить азимутальную однородность при использовании одного ускорителя и является оптимальной для

обработки кабельных изделий и проводов с наружным диаметром до 40 миллиметров. Оборудование, реализующее четырехстороннее облучение гибко расширяет возможности ускорителей, позволяя на одной установке реализовывать как обычную одно- и двухстороннюю, так и многостороннюю обработку. Устройство разрабатывалось для применения с ускорителями серии ЭЛВ, однако может использоваться на любом промышленном ускорителе электронов, использующим низкочастотную развертку пучка [22], и не привязана к типу применяемой подпучковой транспортной системы.

Раскладка кабеля производится аналогично двухстороннему способу, но экспонирование пучками электронов, траектории которых перекрещены под углом 90° , дает эффект четырехстороннего облучения (Рисунок 1.7).

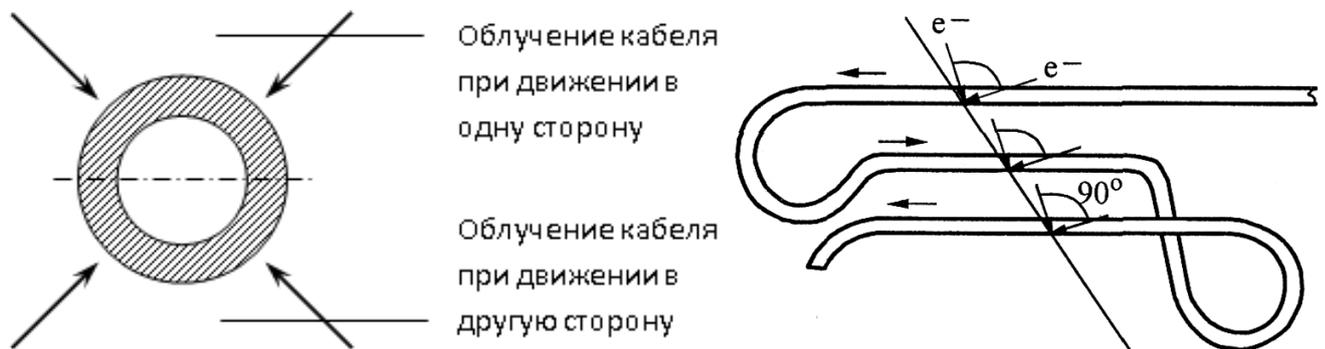


Рисунок 1.7. Формирование 4х-стороннего облучения при движении кабеля под выпускным окном ускорителя (слева), организация четырехстороннего облучения (справа).

Достаточно важно, чтобы кабель проходил через зону облучения несколько раз. Заправка кабеля не обязательно должна быть плоской, приемлемой является и традиционная «восьмерка» (Рисунок 1.8).



Рисунок 1.8. Расположение кабельной заготовки на подающем барабане и направляющем ролике транспортной системы облучения (слева) и под выпускным окном ускорителя (справа).

Более подробно система описана в Главе 4, где приводятся оценки эффективности этого метода в сравнении с двухсторонним, процедура настройки и результаты измерений неоднородности облучения в промышленном применении.

1.4 Повышение эффективности использования ускорителей за счет интеграции с оборудованием технологических линий



Рисунок 1.9. Ускоритель ЭЛВ в местной радиационной защите в составе линии по производству авторезины.

Объединение независимых технологических участков, задействованных в рамках одного производственного процесса, в унитарный промышленный комплекс, управляемый единой автоматизированной системой управления, является современным трендом, поскольку позволяет снизить количество задействованных работников, а

также остановок и неполадок, связанных с человеческим фактором. Кроме того, такие агрегированные системы упрощают обслуживание технологического процесса. Благодаря гибкой системе управления ускорители ЭЛВ легко интегрируются в производственные линии (Рисунок 1.9) [23].

В ряде случаев, когда такая полная интеграция невозможна, положительный экономический эффект может быть достигнут за счёт создания программно-аппаратных комплексов, не только объединяющий под единым управлением ускорительное и сопутствующее оборудование, но и оптимизирующий работу операторского персонала. Реализация такой информационно-измерительной системы описывается в пятой главе.

Глава 2

Модели каскадных генераторов для модернизации высоковольтной колонны ускорителей ЭЛВ

Использование новой компонентной базы (высоковольтных конденсаторов, описанных в Главе 1, диодов и т.д.) не должно сказываться на качестве и надежности работы высоковольтной колонны ускорителя и снижать качество облучения. Поскольку энергия является основным параметром работы ускорителя, поэтому рассмотрим влияние пульсаций энергии на поглощенную дозу облучения.

2.1 Оценка требуемого уровня пульсаций энергии

Оценить допустимый (т.е. не изменяющий мощность дозы, и, следовательно, качество радиационной обработки материалов) уровень пульсаций энергии можно исходя из характера распределения мощности дозы [24]. Согласно методике, описанной в [25] и достаточно точно аппроксимирующей распределение мощности дозы, были сделаны сравнительные расчеты для моноэнергетического пучка и с учетом пульсаций энергии для полиэтилена, широко применяемого для радиационной сшивки (Рисунок 2.1). Синим показано распределение мощности дозы тормозного излучения моноэнергетичного пучка с энергией 1МэВ , красным – распределение для пучка, синтезированного из пучков с энергиями $1,13$ (черный цвет) и $0,91$ (зеленый цвет) со средней энергией $E_{\text{сред}} = \frac{E_{1,13\text{MeV}} + E_{0,91\text{MeV}}}{2} =$

$1,02\text{MeV}$, при пульсациях энергии $\Delta E = \frac{E_{1,13\text{MeV}} - E_{0,91\text{MeV}}}{E_{1,13\text{MeV}} + E_{0,91\text{MeV}}} = \pm 10,8\%$. Из

приведенных графиков видно, что распределение мощности дозы в пределах рабочего участка (т.е. при условии, что линейная плотность дозы по глубине проникновения в веществе $D_{\text{out}}=D_{\text{in}}$) для монохроматического и пульсирующего пучков эквивалентны, если средняя энергия пульсирующего пучка на $2 \div 2,5\%$ выше моноэнергетичного.

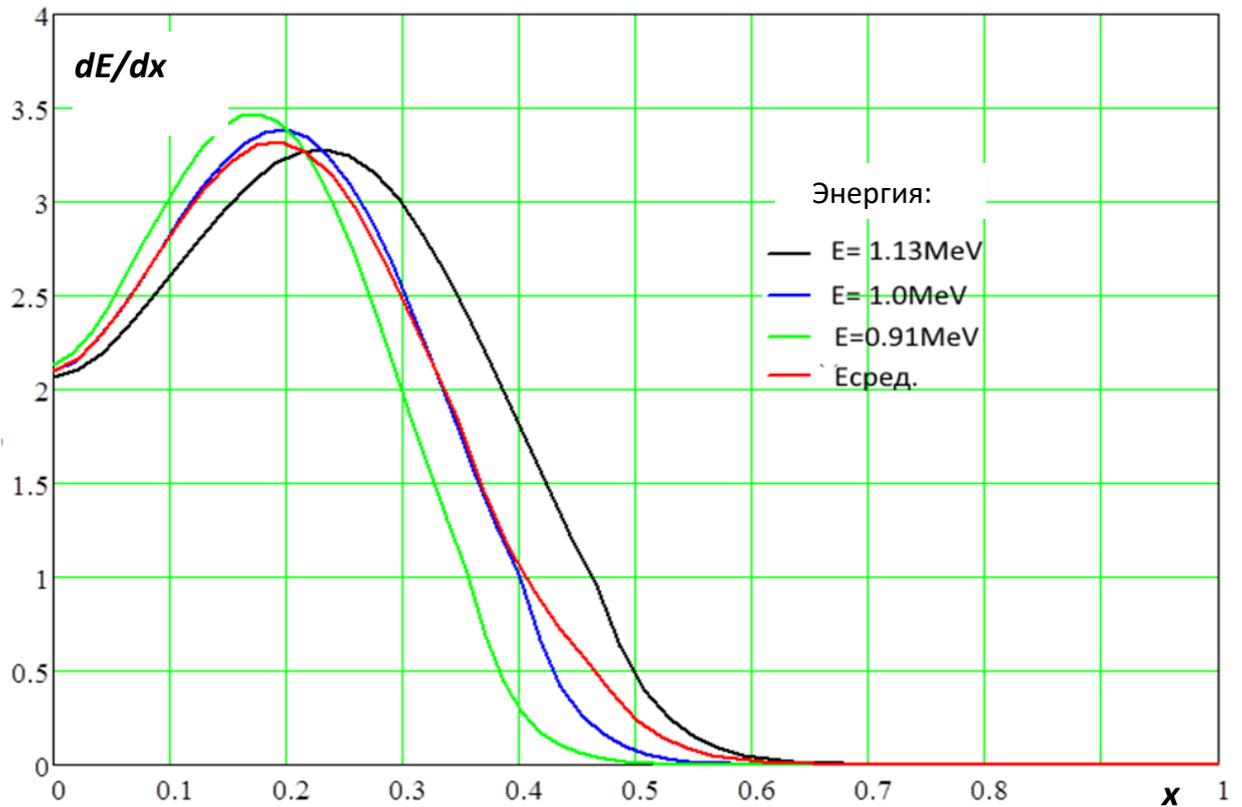


Рисунок 2.1. Мощность поглощенной дозы тормозного излучения в полиэтилене по глубине в зависимости от энергии электронов.

Данные оценки показывают, что **10%**-ные пульсации энергии вполне допустимы, а учитывая, что обычно все производственные работы проводятся с запасом по энергии, то, из личного опыта автора, изменение энергии в пределах 5% не сказывается на качестве продукции.

На основании вышесказанного существующие и предлагаемые схемы каскадных генераторов при использовании новой компонентной базы должны обеспечивать уровень пульсаций энергии не выше **10%**. При применении новых элементов необходимо обеспечить их работу с уже существующей компонентой базой ускорителя. Поскольку энергия, получаемая электронами при ускорении и выраженная в электрон-вольтах, численно равна выходному напряжению, создаваемому высоковольтной колонной каскадного генератора, в дальнейшем будем рассматривать пульсации высокого напряжения, генерируемого каскадными генераторами.

2.2. Моделирование работы инвертора напряжения и высоковольтной колонны

Моделирование работы ускорителя (преобразователя и высоковольтной колонны) проводилось с помощью программы NL5 [26]. Выбор данного пакета базируется на следующих основаниях:

- моделирование узлов и отдельных составных частей ускорителя «исторически» моделировалось в предыдущих версиях программы;
- для целей моделирования при учете известных ограничений программы, таких как идеализированное представление компонентов, и применяемой модели (не учитывалось взаимоиндукция между секциями), результаты достаточно близко совпадают с результатами реальных измерений;
- достаточно высокая скорость работы программы.

При моделировании учитывалась компоновка обмоток высоковольтного трансформатора, влияние конструктивных емкостей секций и высоковольтного электрода на экран первичной обмотки [27].

При архитектуре с одной колонной (Рисунок 2.2) внутри первичной обмотки PW находится выпрямительная колонна, обмотки которой обозначены как SW . Снаружи высоковольтный трансформатор окружен магнитными экранами. Индуктивность первичной обмотки L_{pw} пропорциональна площади ее поперечного сечения. Эта индуктивность складывается из индуктивности намагничивания L_{μ} , величина которой пропорциональна площади поперечного сечения вторичной обмотки и индуктивности рассеяния L_s , величина которой пропорциональна площади кольца между обмотками. Такая структура каскадного генератора обуславливается необходимостью высоковольтного зазора между первичной и вторичной обмотками. Этот фактор и отсутствие внутреннего магнитопровода приводит к тому, что индуктивность рассеяния такого трансформатора оказывается сопоставимой и может даже превосходить индуктивность намагничивания [13]. Данное обстоятельство не позволяет использовать методики, применяемые для расчета обычных трансформаторов к данной машине [8].

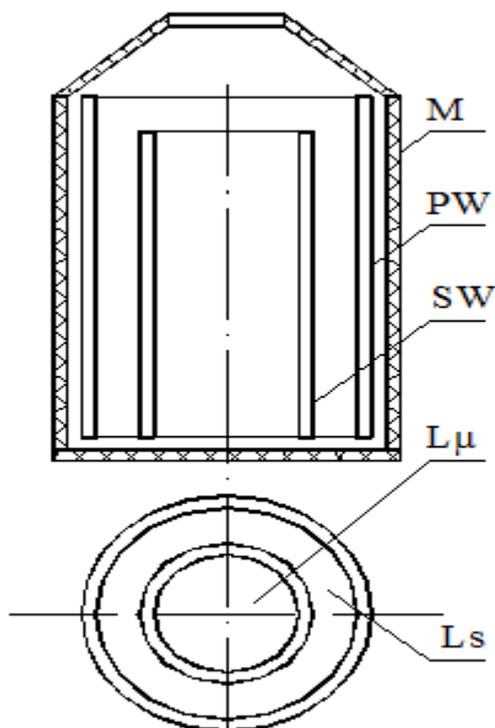


Рисунок 2.2. Схема компоновки ускорителя ЭЛВ с одной выпрямительной колонной: M – внешние магнитопроводы, PW – первичная обмотка, SW – вторичная обмотка, S_{μ} – площадь внутри вторичной обмотки, определяющая индуктивность намагничивания L_{μ} , S_s – площадь кольца между обмотками, определяющая индуктивность рассеяния L_s первичной обмотки.

Для расчета передаточных амплитудно-частотных характеристик при моделировании применялась линейная схема замещения, описанная в [28]. Поскольку преобразователь напряжения, рассматриваемый ниже, собран на IGBT транзисторах, работающих в ключевом режиме, и не способен работать на емкостную нагрузку, схема компенсации реактивной мощности (Рисунок 2.3) построена на индуктивности L_{Dr} и емкости C , R – сопротивление нагрузки, приведенное к индуктивности намагничивания первичной обмотки, PW и SW – первичная и вторичная обмотки.

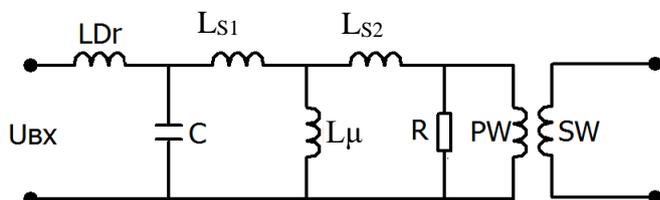


Рис. 2.3. Расчетная линейная схема замещения для модели высоковольтной колонны в программе NL5.

вносимой наличием магнитопровода:

Расчет индуктивности первичной обмотки высоковольтного трансформатора проводился по методикам, описанным в [29], принимая во внимание, что значение L_{PW} складывается из расчетной индуктивности соленоида и поправки

$$L_{PW} = L_{sol} + \Delta L_{M/провода} \quad 2.1$$

Влияние магнитопровода для первичной обмотки рассчитывается как сумма идеальных индуктивностей ($\mu=\infty$), вносимых наличием цилиндрической части и нижнего плоского магнитопровода, с поправкой на коэффициент экранирования:

$$\Delta L_{M/провода} = [\Delta L_{цил} + \Delta L_{п/плоскости}](1 - k_э),$$

$$k_э = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\mu \Delta}{\mu_0 R}} \quad 2.2$$

Где Δ – толщина, R – радиус реального магнитопровода.

Собственная индуктивность первичной обмотки может быть вычислена как индуктивность соленоида. Для ускорителя ЭЛВ-4 соотношение длины соленоида к его диаметру $\alpha = a/d > 1$, поэтому применима формула для длинного соленоида:

$$L_{long sol} = \frac{\mu_0}{4\pi} N_{PW}^2 \Phi D \quad 2.3$$

где D – средний диаметр обмотки

N_{pw} – количество витков.

Φ – параметр, зависящий от $\alpha = a/D$ и определяемый как:

$$\Phi = \frac{\pi^2}{\alpha} \left[1 - \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{8} \frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{64} \frac{1}{\alpha^4} + \dots \right] \quad 2.4$$

Если отношение длины (a) к диаметру (D) первичной обмотки $\alpha = a/D \approx 1$, как рассматриваемый далее в этой главе проект ВNST, то для расчета индуктивности соленоида корректно использовать формулу для короткого соленоида:

$$L_{short sol} = \frac{\mu_0}{4\pi} N_{pw} D \tilde{\Phi} \quad 2.5$$

где N_{pw} – число витков, $\tilde{\Phi}$ – параметр, определяемый для короткого соленоида, как

$$\tilde{\Phi} = 2\pi \left[\left(1 + \frac{\alpha^2}{8} - \frac{\alpha^4}{64} + \dots \right) \ln \left(\frac{4}{\alpha} \right) - \frac{1}{2} + \frac{\alpha^2}{32} + \frac{\alpha^4}{96} + \dots \right], \quad \alpha = \frac{2a}{D} \quad 2.6$$

Вносимая собственная индуктивность плоского экрана, расположенного перпендикулярно оси соленоида определяется как

$$\Delta L_{полуплоскости}^{\infty} = \frac{\pi \mu_0 N_{pw}^2 D^2 [(2h_{gr} + a)K_{\alpha 1} + (2h_{gr} - a)K_{\alpha 2} - 4h_{gr}K_{\alpha 3}]}{8a}, \quad h_{gr} = h + \frac{a}{2},$$

h – расстояние между экраном и первичной обмоткой, $K_{\alpha 1}, K_{\alpha 2}, K_{\alpha 3}$ – табличные коэффициенты из [29].

Собственная индуктивность цилиндрического экрана конечной длины рассчитывается по формуле:

$$\Delta L_{\text{цилиндр}}^{\infty} = \frac{2\pi\mu_0 N_{PW}^2 R_{\text{экп}}^2}{h_{gr}} \sum_{p=1}^{\infty} c_j \vartheta_0(\rho) I_1^2(\rho_0) \frac{(\sin \frac{va}{2})^2}{(\frac{va}{2})^2} \quad 2.8$$

В этой формуле $R_{\text{экп}}$ – радиус цилиндрического экрана, $\vartheta_0(\rho) = K_0(\rho)/I_0(\rho)$; $\rho = vR$; $\rho_0 = vR_0$; $v = r\pi/(a + 2h_{gr})^2$; $c_j = 1$ при p – четном, и -0 при нечетном p .

Расчет индуктивностей рассеяния и намагничивания для схемы замещения возможен различными способами [13]. Грубую оценку (с точностью 15-20%) можно провести, рассматривая соотношения площадей поперечного сечения первичной и вторичной обмоток, и учитывая наличие экранирующих колец ускорительной трубки (высоковольтного фидера в случае ВNST ускорителя), по формулам:

$$L_{\mu} = L_{PW} \frac{D_{sec}^2 - D_{scr}^2}{D_{PW}^2}, \quad L_S = L_{PW} \frac{D_{PW}^2 - D_{sec}^2}{D_{PW}^2},$$

где D_{PW}^2 – усредненный диаметр первичной обмотки,

D_{sec}^2 – диаметр повышающих секций,

D_{scr}^2 – диаметр экранирующих колец.

Значения L_{μ} и L_S , вычисленные по этим формулам составят $\sim 230 \text{ мГ}$ и $\sim 240 \text{ мГ}$ для высоковольтного трансформатора ускорителя ЭЛВ-4.

Более точный расчёт получается при рассмотрении взаимных индуктивностей обмоток высоковольтного трансформатора, приводимый в [13]. Так коэффициент взаимоиндукции может быть вычислен по формуле:

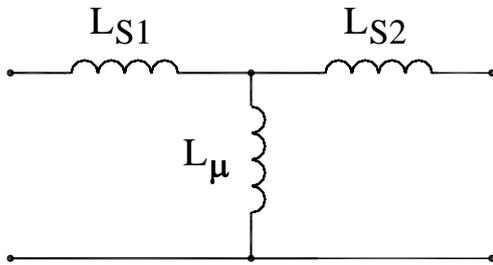
$$M = \mu_0 \frac{n_{SW} N_{PW}}{a^2} \Psi, \quad 2.9$$

где n_{SW} и N_{PW} -- количество витков вторичной и первичной обмоток, а параметр Ψ можно определить из выражения:

$$\Psi = \frac{\pi}{8} D_{sec}^2 D \left[q_1 + \frac{\delta^2}{8} q_3 + \frac{\delta^4}{64} q_5 + \dots \right],$$

Здесь $\delta = d/D$; $q_1 = -1 + 1/\gamma$; $q_3 = 1 - \gamma^3$; $q_5 = 1 + 4\gamma^5 - 5\gamma^7$; $\gamma = D/\sqrt{D^2 + 4a^2}$

После приведения индуктивности к первичной обмотке (Рисунок 2.4)



$$M' = L_{\mu} = M \left(\frac{n}{N} \right)^2; L'_2 = L_2 \left(\frac{n}{N} \right)^2 \quad 2.10$$

индуктивности рассеяния вычисляются как $L_{S1} = L_1 - M'$, $L_{S2} = L_2 - M'$.

Для ускорителя ЭЛВ-4 данные расчеты дают следующие значения индуктивностей:

$$L_{S1} = 0.33mH \quad L_{\mu} = 0.24mH$$

$$L_{S2} = 0.011mH, \quad 2.11$$

Рисунок 2.4. Схема замещения. L_{S1} , L_{S2} – индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток, L_{μ} – индуктивность намагничения. измерения и использующихся в нижеописанных моделях каскадных генераторов.

хорошо совпадающих с реальными

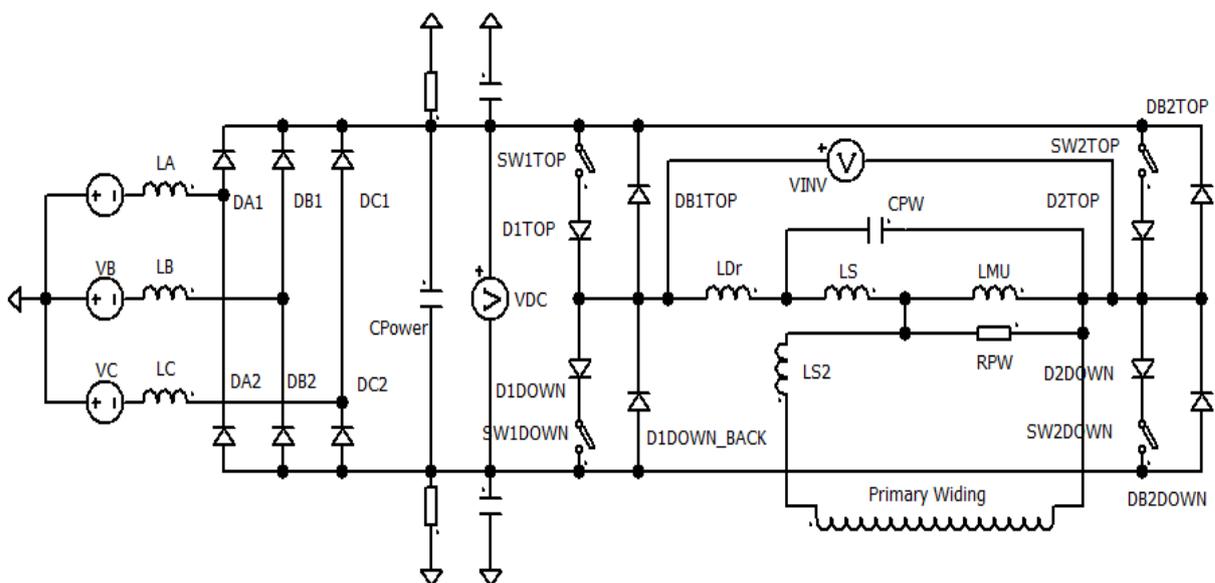


Рисунок 2.5. Модель силовой части ускорителя ЭЛВ-4.

Модель силовой части ускорителя (Рисунок 2.5) воспроизводит трехфазное питание ускорителя, диодный мост Ларионова, ключи SW1TOP-SW1DOWN и SW2TOP-SW2DOWN с включенными последовательно и параллельно диодами – полумосты на IGBT транзисторах.

Нагрузка и ее согласование с инвертором были смоделированы по аналогии с методикой, подробно описанной в [28]. Согласно этой методике при фиксированном импедансе нагрузки инвертора передаточная характеристика в модели может рассматриваться как функция трех аргументов – частоты преобразователя f_{INV} , емкости и индуктивности согласующих конденсаторов C_{pw} и дросселей L_{Dr} (рисунок 2.5). В дальнейшем при моделировании работы каскадных генераторов в качестве определяющих параметров будут использованы максимальные значения выходного напряжения E_{beam} и тока I_{beam} как эквивалентов энергии и тока пучка. По этой причине согласование выхода модели преобразователя частоты с рассматриваемыми моделями высоковольтных каскадных генераторов на отдаваемую мощность $P_{beam} = 100\text{кВт}$ (исключая каскадные генераторы проекта БНЗТ, рассматриваемые отдельно) производилась вариацией этих параметров с учетом ряда условий, имеющих место при работе реальных ускорителей:

- поскольку изменение индуктивности согласующего дросселя затруднено, были учтены ограничения, определяемые его конструктивными особенностями – средний ток инвертора ограничивался 400А , индуктивность выбрана равной $\sim 500\text{мкН}$ и при моделировании не изменялась;

- если не оговаривается отдельно, расчеты проводились при частоте инвертора $f_{INV} \sim 425\text{Гц}$ для каскадных генераторов с секциями, имеющими катушки вторичных обмоток в 3000 витков, максимум передаточной характеристики изменением согласующей емкости C_{pw} (типовое значение $\sim 400\div 500\text{мкФ}$);

- при настройке модели инвертора на максимальную отдаваемую мощность 100кВт рабочая фаза выбиралась равной 138° , что соответствует отношению длительности управляющих полумостами импульсов к полупериоду управляющего сигнала равному $\sim 46/60$. Соотношение установлено

экспериментально и учитывает минимальный «запас» по фазе для отработки инвертором нестабильности питающей сети и время между переключением транзисторов полумоста (deadtime), составляющий **30 мкс**;

– приведенное сопротивление $R_{PW}=10\div 12 \text{ Ом}$ выбиралось из расчета активных потерь в первичной обмотке и колонне выпрямительных секций не более **10кВт**.

– падения напряжения на «обратных» диодах и диодах, включенных последовательно с ключами SW, соответствуют параметрам применяемых полумостов SkiiP942GB фирмы SEMIKRON.

Высоковольтная колонна. При моделировании различных вариантов высоковольтной колонны не учитывалось взаимоиндукция между соседними секциями. Следующие характеристики элементов выпрямительных секций выбирались соответствующими параметрам компонентов, применяемым в настоящее время в ускорителях ЭЛВ:

– Падение напряжения на высоковольтных диодах составляет $\sim 100\text{V}$;

– в конструкции секций используются по 2 высоковольтных конденсатора на каждое плечо выпрямителя (Рис. 1.2), включенные параллельно. Поэтому при моделировании рассматривались случаи применения отечественных керамических конденсаторов К15-10 и производства TDK (суммарная емкость на плечо – **20нФ** и **7нФ** соответственно).

Расчет эквивалентных параметров. В силу масштабируемости модели для расчета пульсаций энергии в качестве высоковольтной колонны использовалась модель, состоящая из одной секции (Рисунок 2.6). Эквивалентные значения $C_{HVelectrode}$, $C_{section}$ и $R_{вем}$ в схеме замещения вычисляются из законов сохранения. Для конструктивной емкости высоковольтного электрода, которая составляет $\sim 60\text{pF}$:

$$\frac{C_{HVelectrode} \cdot U_0^2}{2} = \frac{C_{HVelectrode}^{ЭКВ} \cdot U_{ЭКВ}^2}{2} \Rightarrow C_{HVelectrode}^{ЭКВ} = C_{HVelectrode} \cdot \frac{N_0^2}{N_{ЭКВ}^2}, \quad 2.12$$

где U_0 – максимальное рабочее напряжение ускорителя (для описываемых ниже схем удвоения напряжения и последовательно-параллельной – 1,5МВ и

1,0МВ соответственно), $U_{\text{ЭКВ}}$ – напряжение для колонны модели из $N_{\text{ЭКВ}}$ числа секций,

рассчитанное как, $U_{\text{ЭКВ}} = U_0 \cdot N_{\text{ЭКВ}} / N_0$, $N_0 = 45$ (количество секций ЭЛВ-4).

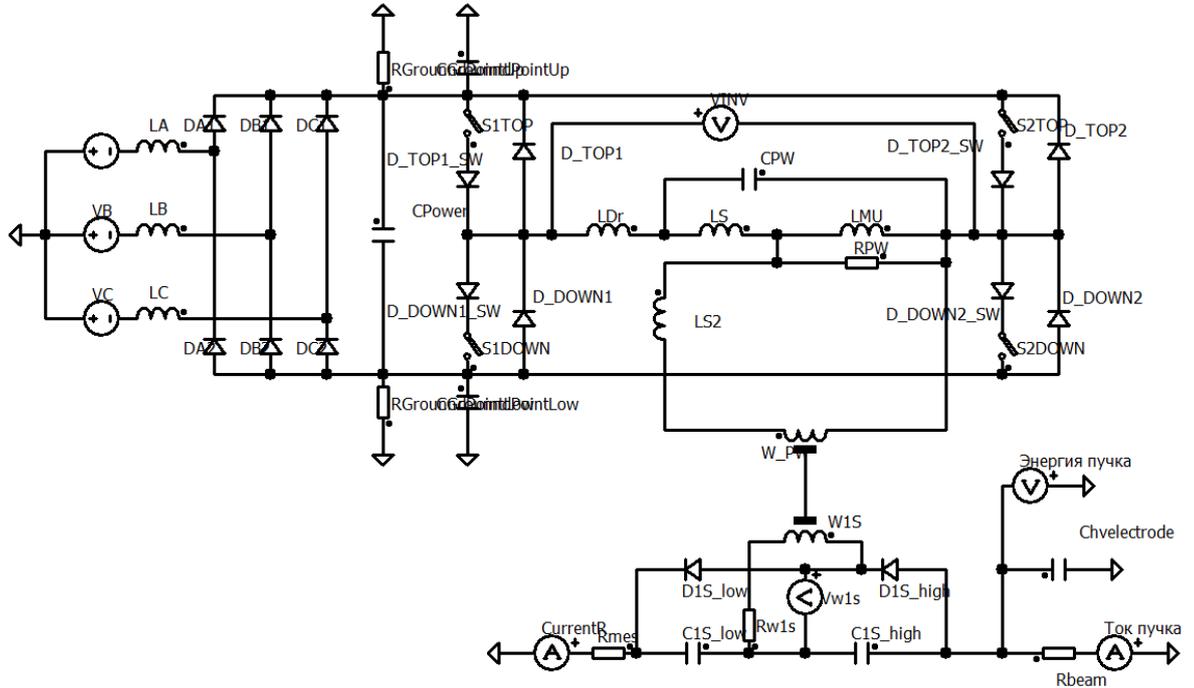


Рисунок 2.6 Модель ускорителя для схемы удвоения напряжения.

Поскольку в схеме удвоения секции последовательно соединены два конденсатора, суммарная последовательная емкость колонны из N секций для схемы удвоения напряжения равна $C_{\Sigma} = C_{\text{пл}} / 2N$, где $C_{\text{пл}}$ – емкость плеча секции, эквивалентное значение будет равно

$$\frac{C_{\Sigma} \cdot U_0^2}{2} = \frac{C_{\Sigma}^{\text{ЭКВ}} \cdot U_{\text{ЭКВ}}^2}{2} \Rightarrow C_{\Sigma}^{\text{ЭКВ}} = C_{\Sigma} \cdot \frac{N_0^2}{N_{\text{ЭКВ}}^2} \quad 2.13$$

При количестве секций в ускорителе ЭЛВ-4 $N_0 = 45$ и максимальной рабочей напряжении – **1,5МэВ** эквивалентные емкости для односекционной модели составляют:

$$C_{\text{HVelectrode}}^{\text{ЭКВ}} = 122 \text{ nF}; C_{C_{\text{пл}}=20 \text{ nF}}^{\text{ЭКВ}} = 900 \text{ nF}; C_{C_{\text{пл}}=7 \text{ nF}}^{\text{ЭКВ}} = 315 \text{ nF}; \quad 2.14$$

Но при моделировании необходимо также учесть существующую емкость с внешних экранов секций на экран первичной обмотки (Рисунок 2.7), средняя

величина которой оценивалась как $C_{screen} \approx 6pF$. В приближении, что отсутствует спад магнитного поля на краях первичной обмотки и, не учитывая взаимоиндукцию между секциями колонны, для расчета эквивалентной емкости можно воспользоваться методикой, описанной в [27].

Действительно, в режимах с большой подсадкой высоковольтного трансформатора, изменением тока катушек за счет непостоянства выходного напряжения можно пренебречь, представляя катушки вторичной обмотки генераторами тока. Тогда высоковольтную колонну можно представить в виде эквивалентной схемы

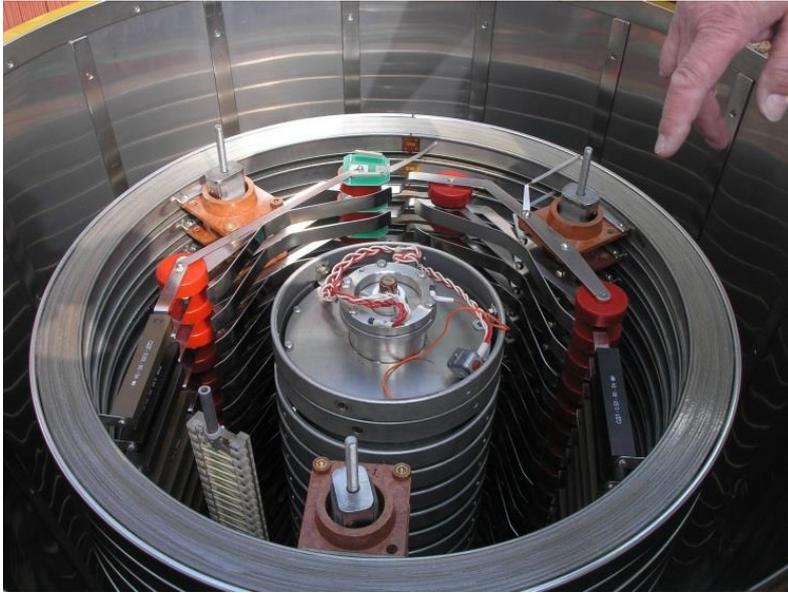


Рисунок 2.7. Собранная колонна выпрямительных секций.

2.8 (вверху).

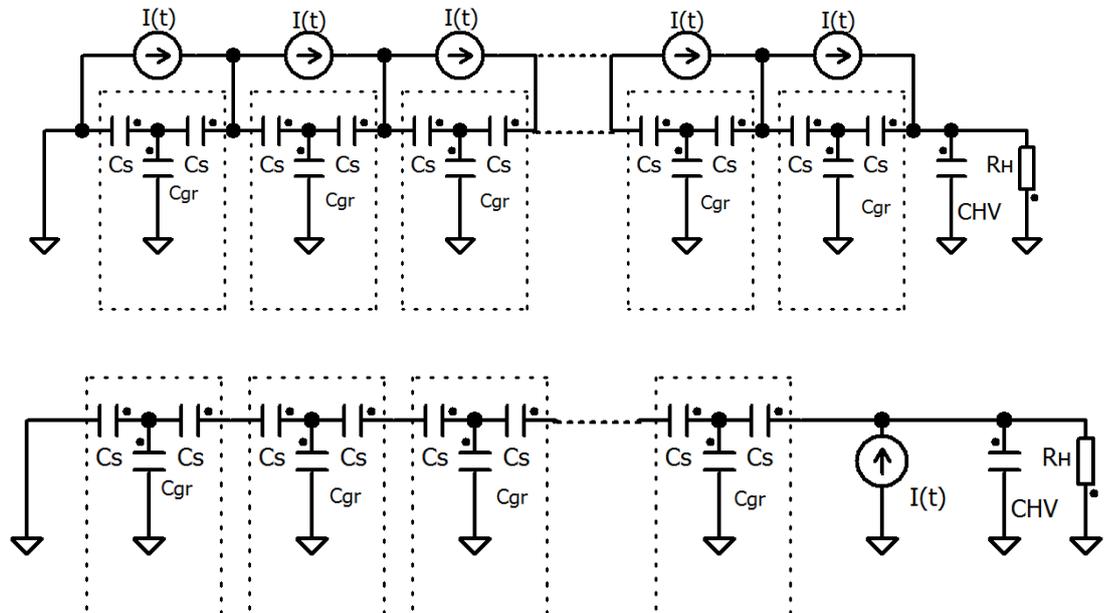


Рисунок 2.8. Схемы высоковольтной колонны для расчета эквивалентной емкости с учетом конструктивной емкости на «заземленный» экран первичной обмотки.

Поскольку связь каждой секции с первичной обмоткой в такой схеме одинакова, поэтому источники переменного тока $I(t)$ идентичны, и, следовательно, их можно заменить одним общим генератором тока $I(t)$ (Рис. 2.8 внизу). В этом случае эквивалентная емкость колонны с учетом конструктивной емкости на землю равна емкости цепочки последовательно-параллельно соединенных конденсаторов, рассчитываемый по рекурсивной формуле:

$$C_1^\Sigma = \frac{(C_{пл} + C_{screen}) \cdot C_{пл}}{2C_{пл} + C_{screen}} \text{ — для первой секции и колонны из одной секции,}$$

$$C_k^\Sigma = \frac{\left(\frac{C_{k-1}^\Sigma \cdot C_{пл}}{C_{k-1}^\Sigma + C_{пл}} + C_{screen} \right) \cdot C_{пл}}{\frac{C_{k-1}^\Sigma \cdot C_{пл}}{C_{k-1}^\Sigma + C_{пл}} + C_{screen} + C_{пл}} \text{ для колонны из } k \text{ секций} \quad 2.15$$

Для 45 секционной колонны эквивалентная емкость замещения для конденсаторов номиналом 7 и 20нF будет соответственно 616 и 1238pF.

Поскольку максимальная мощность пучка равна $P_{MAX}=100\text{кВт}$, эквивалентное сопротивление R_{beam} для модели определяется как:

$$R_{beam}^{ЭКВ} = \frac{U_{ЭКВ}}{I_{beam}^{ЭКВ}} = \frac{U_{ЭКВ}^2}{P_{MAX}} = \frac{U_0^2 \cdot N_{ЭКВ}^2}{P_{MAX} \cdot N_0^2}$$

Параметры тока пучка электронов в ускорителях ЭЛВ определяются свойствами инжектора электронов, работающего в режиме отбора полного тока, и являются функцией температуры его нагрева. Поэтому значения тока резистивной нагрузки, получаемые при моделировании, коррелируют с током пучка только в средних величинах, и далее под I_{beam} далее будем понимать ток, а под R_{beam} — активное сопротивление этой нагрузки, если иное не оговаривается отдельно.

2.3 Анализ параметров работы электронных компонентов высоковольтной колонны

Параметры работы преобразователя напряжения для модели, представленной на Рисунке 2.6 аналогичны параметрам, описанным для ЭЛВ-8 и ЭЛВ-6, с учетом

особенностей характерных для ЭЛВ-4 в [28]. Формы токов и напряжений инвертора и согласующих элементов приведены на Рисунке 2.9, расчетные предельные и средние величины – в таблице 2.1, и соответствуют значениям, регистрируемым при работе реальных ускорителей.

Таблица 2.1

	Min	Max	Δ	среднее	сред.кв.
V_{DC} , В	419	633	213	526	529
V_{INV} , В	-633	633	1266	-	453
I_{Dr} , А	-433,3	434	867	-	278
P_{Rbeam} , кВт	90,2	115,4	24,5	101,4	-
V_{CPW} , В	-940	940	1880	-	642

На графике и в таблице приняты следующие обозначения:

V_{DC} – выпрямленное шестифазным диодным выпрямителем сетевое напряжение,

V_{INV} – выходное напряжение преобразователя,

V_{CPW} – напряжение на согласующем конденсаторе,

I_{Dr} – ток согласующего дросселя,

P_{Rbeam} – мощность выделяемая на эквивалентной нагрузке R_{beam} колонны.

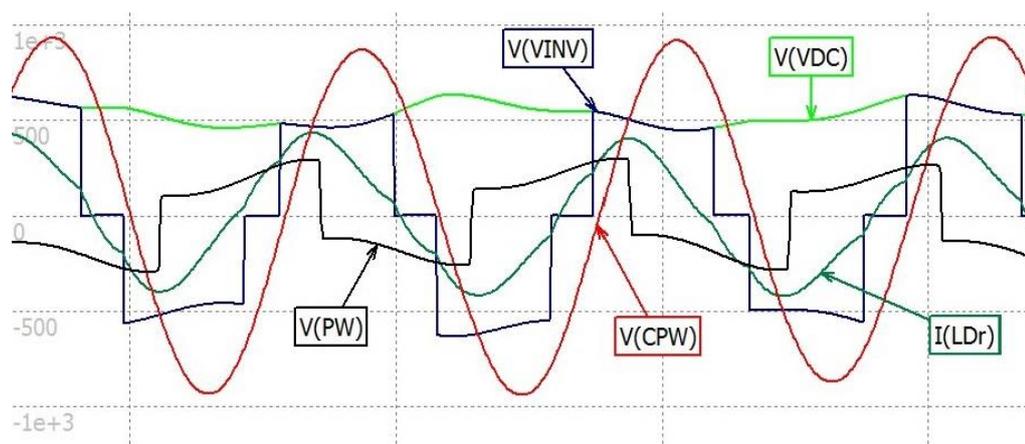


Рисунок 2.9. Формы смоделированных сигналов

Пульсации энергии. На Рисунке 2.10 и Таблице 2.2 приведены результаты моделирования пульсаций выходного напряжения каскадного генератора

ускорителя с емкостями эквивалентными 7 и 20нF в плече секции (на рисунках обозначены как $C_{пл}$) с учетом и без учета конструктивных емкостей секций и

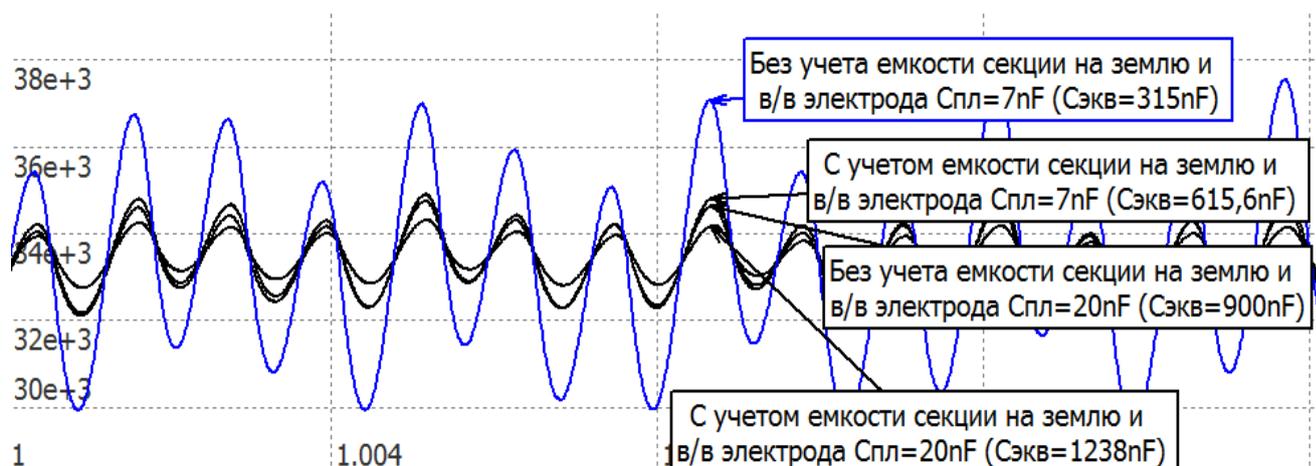


Рис. 2.10. Расчет выходного напряжения в схеме замещения при различных вариантах расчета емкости в/в колонны при частоте инвертора 425Гц.

высоковольтного электрода при условии 100кВт мощности, отдаваемой в нагрузку. Максимальные параметры работы ускорителя **1,5МэВ/66мА** пересчитаны в схему замещения для модели с 1 секцией.

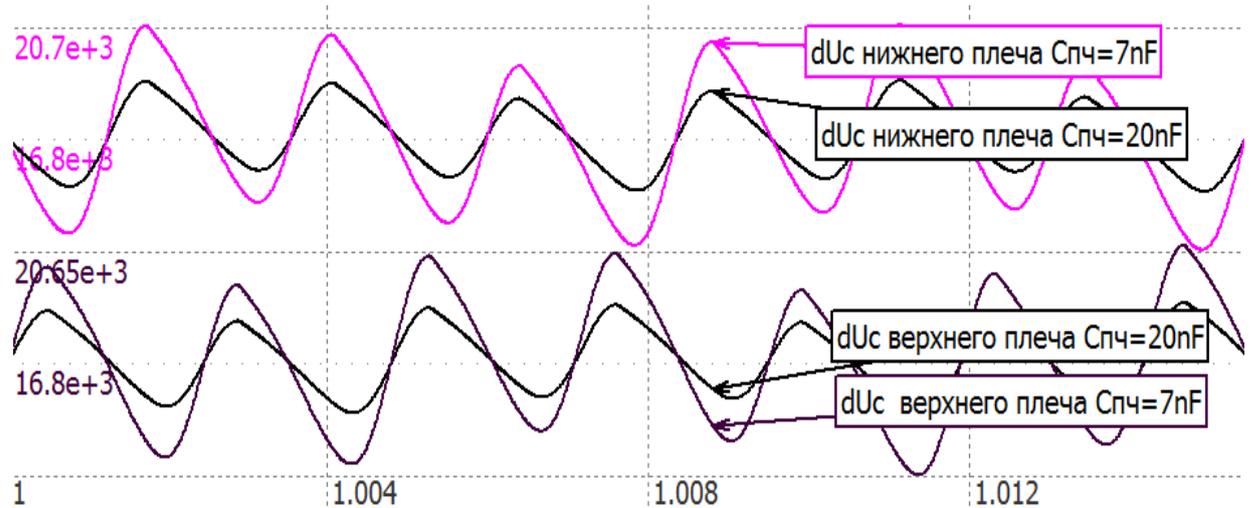
Таблица 2.2

	Umin, kV	Umax, kV	ΔU , kV	Uсред., kV	%
Без учета емкости секции на «землю» и в/в электрода, $C_{пл}=20\text{nF}$ ($C_{экв}=900\text{nF}$)	31,9	34,7	2,84	33,3	4,21
Без учета емкости секции на «землю» и в/в электрода, $C_{пл}=7\text{nF}$ ($C_{экв}=315\text{nF}$)	37,8	30,2	8,21	33,3	11,17
С учетом емкости секции на «землю» и в/в электрода, $C_{пл}=20\text{nF}$ ($C_{экв}=1238\text{nF}$)	32,5	34,3	1,83	33,4	2,69
С учетом емкости секции на «землю» и в/в электрода, $C_{пл}=7\text{nF}$ ($C_{экв}=615,6\text{nF}$)	31,8	34,9	3,06	33,4	4,64

Параметры работы конденсаторов. Из приведенных графиков и таблицы значений пульсаций напряжения видно, что уровень пульсаций энергии при

переходе с конденсаторов емкостью 20nF на 7nF (изменение «чистой» емкости колонны в 3 раза) при учете конструктивных емкостей секций и высоковольтного электрода реально возрастает примерно в 2 раза.

Ниже приведены сравнительные параметры работы компонентов секций с учетом конструктивных емкостей высоковольтного электрода и секции на экран первичной обмотки.



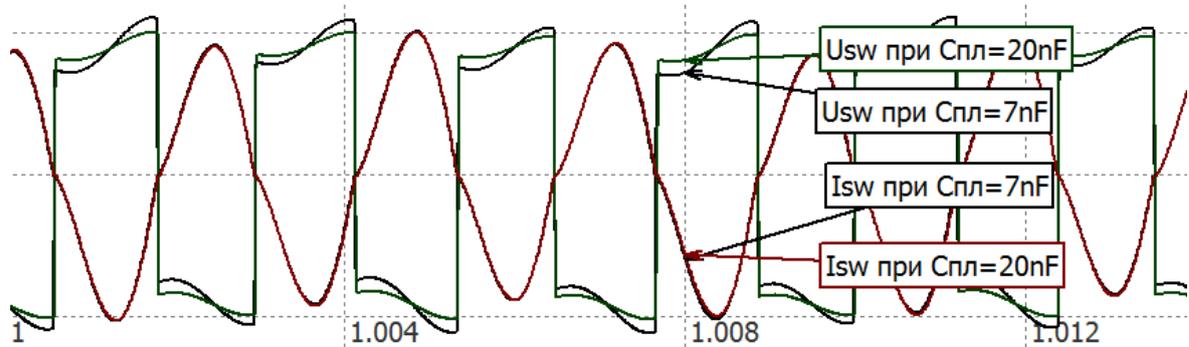
	U_{\min} , kV	U_{\max} , kV	$U_{\text{сред.}}$, kV	%
$C_{\text{пл}}=20\text{nF}$	14,9	18,9	16,9	11,8
$C_{\text{пл}}=7\text{nF}$	12,9	20,9	16,9	22,7

Рисунок 2.11 Пульсации напряжения на конденсаторах верхнего и нижнего плеча секции с учетом конструктивных емкостей при частоте инвертора равной 425Гц.

Из графиков и таблицы параметров работы на Рисунка 2.11 видно, что уменьшение емкости с 20nF до 7nF привело к росту пульсаций напряжения в 1,9 раза, при этом максимальное напряжение на конденсаторах находится ниже паспортных предельных значений.

Параметры работы катушек вторичных секций. Форма напряжения (U_{sw}) и тока (I_{sw}) на катушках вторичных секций, а также активная мощность (P_{sw}), выделяемая на катушках вторичных обмоток высоковольтного

трансформатора, показаны на Рисунке 2.12. Из приведенных данных видно, что параметры работы катушек секций изменились незначительно, и практически не отличаются при замене конденсаторов.

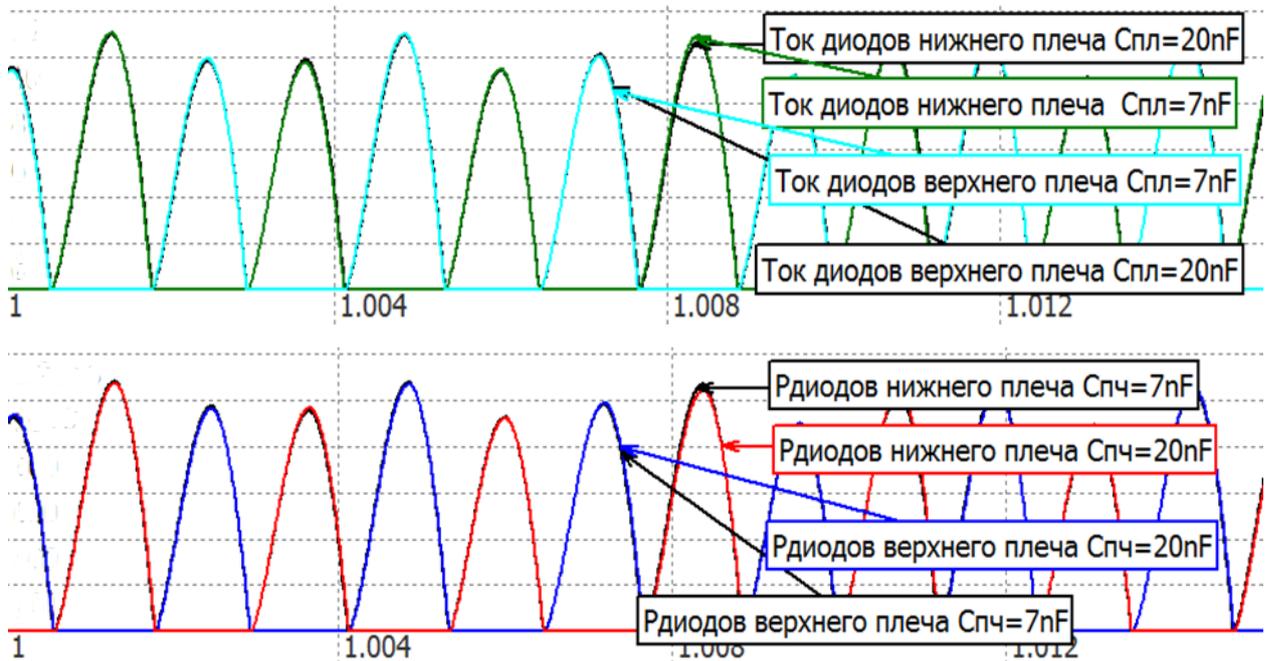


Напряжение на вторичных обмотках высоковольтного трансформатора (U_{sw})			
Для конденсаторов плеча $C_{пл}$	$U_{min} \times 10^3 V$	$U_{max} \times 10^3 V$	$U_{rms} \times 10^3 V$
20нF	-18.97	18.97	16.75
7нF	-20,95	20,99	16,72
Ток вторичных обмоток высоковольтного трансформатора (I_{sw})			
	I_{sw}^{min}, A	I_{sw}^{max}, A	I_{sw}^{rms}, A
20нF	-0,24	0,24	0,15
7нF	-0,25	0,25	0,15
Мощность, выделяемая на вторичных обмотках (P_{sw})			
	P_{sw}^{max} пиковая, Вт	$P_{sw}^{средняя}$, Вт	
20нF	52.6	22,5	
7нF	62.5	22,5	

Рисунок 2.12. Расчетная форма напряжения и тока на активном сопротивлении катушек секций (в таблице приведены пересчитанные для колонны из 45 секций значения напряжения, тока и мощности при частоте инвертора равной 425Гц).

Параметры работы диодов. Применяемые для выпрямления переменного напряжения диоды СДЛ-0,55-800 имеют ограничение по среднему прямому

току, равное 0,55А (данные параметры гарантируются производителем при использовании диодов в масляной среде при температуре $T = +60^{\circ}\text{C}$), причем эта величина снижается при повышении температуры. Экспериментально, на аналогичных по конструкции СДЛ-0,55-1300 было установлено, что в условиях нормального атмосферного давления при температуре $20 \div 25^{\circ}\text{C}$ критический нагрев и выход из строя наблюдается при постоянном токе более $260 \div 270\text{mA}$. Температура внутри котла ускорителя при работе на полной



Режимы работы диодов при различных значениях $C_{пл}$	Максимальное пиковое значение	Среднее значение
Ток I_d при 20nF, мА	244,4	66,88
Ток I_d при 7nF, мА	244,4	66,88
Мощность P_d при 20nF, Вт	23,96	6,56
Мощность P_d при 7nF, Вт	24,11	6,56

Рисунок 2.13. Расчетная форма тока и мощности, выделяемая на диодах секций (в таблице приведены пересчитанные к стандартной колонне значения тока и мощности при частоте инвертора равной 425Гц).

Расчет режимов работы диодов, изображенные на Рисунке 2.13, показывают наличие существенного запаса по средней и по пиковой величине тока,

гарантирующего надежную работу компонентов в тех случаях, когда эксплуатация ускорителей происходит в жестких климатических условиях повышенных температур без принудительного внешнего охлаждения котла ускорителя или с использованием локальной защиты.

Методика замены конденсаторов. Моделирование работы ускорителя и реальные измерения пульсаций энергии доказывают возможность замены конденсаторов в высоковольтной колонне ускорителей ЭЛВ-4 при существующих технологических требованиях без потери надежности составляющих элементов. Приемлема замена вышедших из строя конденсаторов K15-10 на действующих ускорителях ЭЛВ на рассматриваемые конденсаторы производства TDK и AVX. Поскольку при пробоях на конденсаторах выпрямительных секций происходит перераспределение напряжения по высоковольтной колонне, то скачок напряжения в плечах секций, собранных на имеющих меньшую емкость конденсаторах, может привести к выходу их из строя. Поэтому для сохранения надежности работы колонны предлагается следующий порядок замены:

1. При обнаружении неисправного конденсатора K15-10 на его место устанавливается AVX (TDK).
2. Если в плече обнаруживается два неработающих K15-10, то с работающего плеча ремонтируемой или соседней секции берется один рабочий конденсатор K15-10, на место которого устанавливается AVX (TDK). Таким образом, конденсаторы в колонне должны быть перераспределены в первую очередь образуя пары K15-10 и AVX.
3. При последующих заменах вышедших из строя конденсаторов K15-10 сначала проводится замена на AVX (TDK) в указанных парах.

2.4. Сравнение режимов работы каскадных генераторов по схеме удвоения и последовательно-параллельной схеме выпрямительных секций.

Обоснование использования схемы на диодных мостах для секций на краях высоковольтной колонны

Достаточно широкий спектр технологий промышленного облучения материалов не требует энергии излучаемых электронов более 1МэВ, достаточным является диапазон от 0,5 до 1МэВ. Максимальный ток пучка при этом составляет 100 мА. Для работы с таким током пучка в ИЯФ СО РАН был разработан ускоритель ЭЛВ-6 [28] (Рисунок 2.14 справа), собранный по схеме повышающего трансформатора с двумя колоннами из 37 повышающих секций каждая,

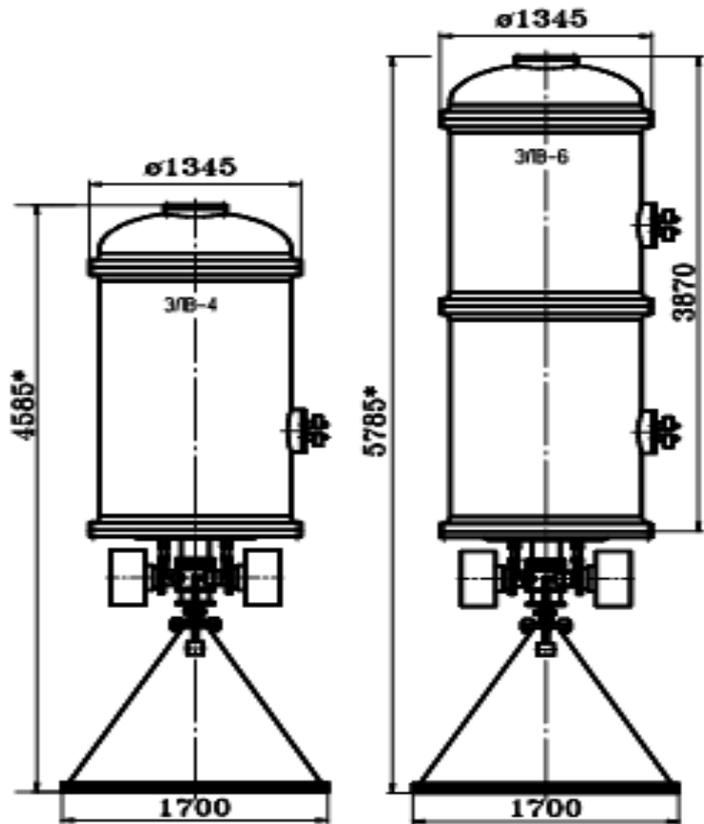


Рисунок 2.14. Сравнение габаритов ускорителей ЭЛВ-4(слева) и ЭЛВ-6(справа).

работающими на общую нагрузку (Рисунок 1.26). Секции собраны по схеме удвоения напряжения с конденсаторами К15-10 емкостью 10нФ в каждом плече. При работе ускорителя на максимальной мощности 100 кВт каждая высоковольтная колонна обеспечивает генерацию половины тока пучка – 50 мА при энергии 1МэВ (43мА при энергии 1,2МэВ). Сравнительный расчет пульсаций высоковольтного напряжения при переходе на два параллельно соединенных конденсатора AVX/TDK суммарной емкостью 7нФ показан в таблице 2.3. Расчет

проводился в моделях ЭЛВ-6 из 4х секций. Также для сравнения показаны пульсации для одноколонной архитектуры.

Таблица 2.3				
Модель	Величина пульсаций напряжения колонны E, %	U_{\min} на конденсаторах плеча секции, kV	U_{\max} на конденсаторах плеча секции, kV	Величина пульсаций напряжения на конденсаторах, %
2 колонны по 4 секции ЭЛВ-6 (2*37 секций и $C_{\text{плеча}}^{\Sigma}=10\text{nF}$)	4,9	10,7	16,5	21,4
2 колонны по 4 секции ЭЛВ-6 (2*37 секций и $C_{\text{плеча}}^{\Sigma}=7\text{nF}$)	6,3	9,82	17,46	27,8
1 колонна из 5 секций ЭЛВ-4 (45 секций и $C_{\text{плеча}}^{\Sigma}=7\text{nF}$)	10,9%	12,6	20,1	56%

В таблицу 2.3 также включены расчетные данные по напряжению на конденсаторах в плечах повышающих секций. Из сравнения значений, приведенных для $C_{\text{плеча}}^{\Sigma}=7\text{nF}$ с диаграммой Рисунка 1.3, что напряжения и пульсации на конденсаторах при использовании схемы удвоения для

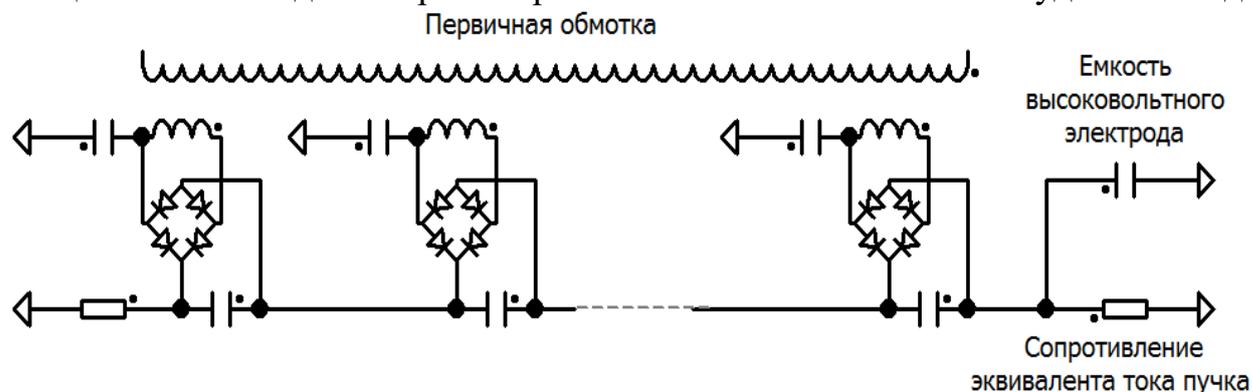


Рисунок 2.15 Модель высоковольтной колонны, построенной на диодных мостах

вышеуказанных моделей лежат вне зоны стабильной работы. Использование

двуполупериодной схемы выпрямления в каскадном генераторе позволяет снизить уровень пульсаций этих конденсаторах [27].

Модель высоковольтной колонны из 5-ти секций, собранных на основе диодного моста (Рис. 2.15) с 4-мя фильтрующими конденсаторами $3,5 \text{ нФ}$,

Таблица 2.4

	U_{\min} , kV	U_{\max} , kV	ΔU , kV	$U_{\text{сред}}$, kV	Величина пульсаций U, %
Выходное напряжение каскадного генератора, пересчитанное к 1МэВ	877	1147	270	1012	13,3
Напряжение на фильтрующем конденсаторе секции емкостью 3,5нФ	19,6	25,6	5,98	22,58	13,2
Напряжение на отдельном конденсаторе	9,8	12,8	3,0	11,3	6,6

включенными последовательно-параллельно ($C_{\text{section}}=3,5 \text{ нФ}$), и без учета емкости с секций на экран первичной обмотки дает следующие оценки, показанные в таблице 2.4:

Применение непосредственно схемы на основе диодного моста (Рисунок 2.15) имеет следующие существенные особенности:

– напряжения на конденсаторах можно оценить из соотношения $U_C \approx U_L \approx U_{\text{HVelectrode}} / N_{\text{section}}$, что при энергии 1МэВ составит $22 \div 23\text{kV}$, и в силу описанных выше ограничений на максимальное значение применяемых конденсаторов оправдывает применение последовательно-параллельного включения их в секциях (поэтому в вышеуказанной модели были рассмотрены случаи параллельного и последовательного включения конденсаторов с емкостью $3,5 \text{ нФ}$);

– в случае частичного пробоя с внешних экранов внутренних секций колонны на экран первичной обмотки ток разряда конструктивных емкостей течет через выпрямительные диоды, что снижает надежность работы такой схемы;

Поэтому целесообразно использовать последовательно-параллельное включение секций, показанное на Рисунке 2.16. В этом случае, при частичном пробое указанный ток разряда не проходит через диоды секции.

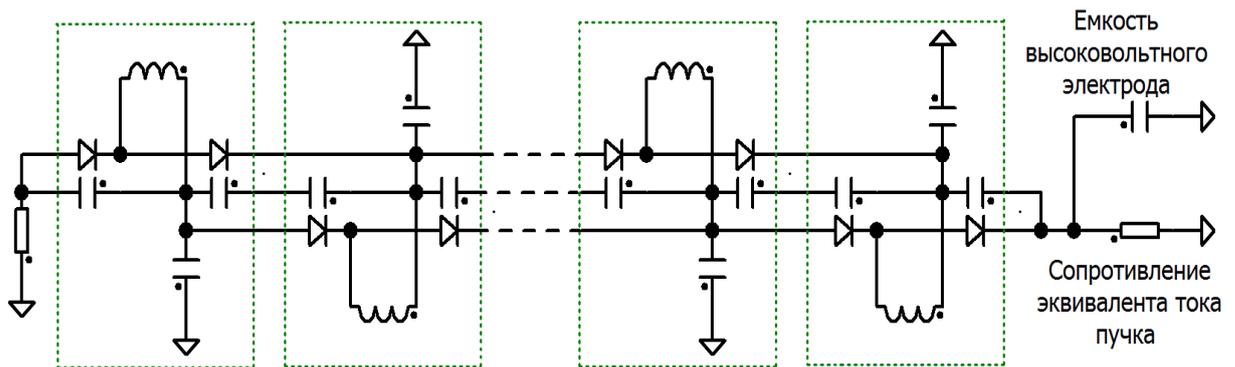
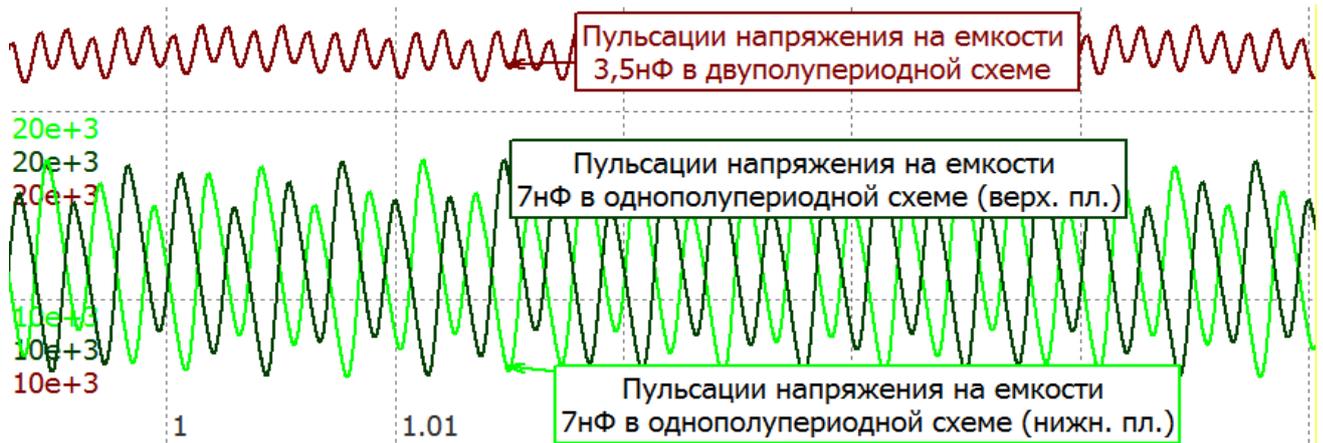


Рис. 2.16 Модель высоковольтной колонны, построенной по последовательно-параллельной схеме.

Последовательное соединение пары конденсаторов с одного плеча секции с соответствующей парой соседней уменьшает напряжение на каждом конденсаторе схемы в 2 раза относительно напряжения на выпрямительной секции в регулярной части колонны (рисунок 2.17). Для выравнивания напряжения при последовательном соединении пар конденсаторов в реальной колонне параллельно каждой паре подключено сопротивление номиналом $\sim 100\text{Мом}$. При сохранении количества и типа конденсаторов в секциях суммарная емкость плеча секции составит $3,5\text{ нФ}$.

При такой архитектуре колонны крайние конденсаторы первой и последней секций заряжаются только в течение одного полупериода. При моделировании эквивалентной колонны, состоящей из 11-ти секций, расчеты показывают 3-х кратный по пиковому и двукратный по среднему значениям рост среднего тока диодов и выделяемой активной мощности по сравнению с аналогичными в регулярной части колонны (Таблица 2.5) и увеличение максимального напряжения конденсаторов на краях колонны на $\sim 30\%$, а пульсаций – в 6 раз (Рисунок 2.17).



	U_{\min} kV	U_{\max} kV	ΔU kV	$U_{\text{средн.}}$ kV	Пульсации напряжения на конденсаторах плеча секций, %
$U_{\text{удв}}$	5,69	17,41	11,54	11,62	50,74%
$U_{\text{мост}}$	21,56	24,65	3,1	23,18	6,69%

Рисунок 2.17. Расчетная форма напряжения (пульсации) на крайних плечах первой и последней секций для однополупериодной и двухполупериодной схем каскадного генератора в/в колонны при частоте инвертора 425Гц (шкала 10кВ/дел.).

Избежать такой ситуации позволяет использование в этих секциях диодного моста. Для первой и второй секций схема соединения показана на Рисунок 2.18. При этом опасность выхода из строя элементов первой и последней секции не

Таблица 2.5 Сравнение токов и выделяемой мощности на диодах в различных частях колонны

	Ток диодов, mA		Мощность, Вт	
	max	средний	max	средняя
На краях колонны	787	103	77,0	9,9
В регулярной части	203	47	20	4,9

возникает, поскольку пробой с этих секций на экран первичной обмотки не возможен – максимальное напряжение на первой секции намного ниже пробойного, а над верхней секцией расположен высоковольтный электрод,

имеющий больший внешний диаметр, с которого и должен происходить пробой с колонны.

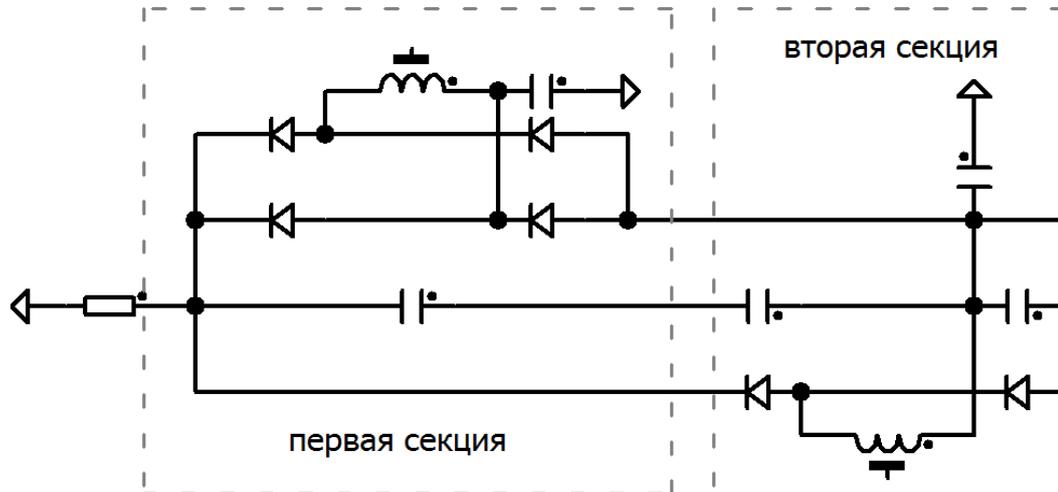


Рисунок 2.18. Соединение крайней секции на основе диодного моста с регулярной секцией в колонне, собранной по последовательно-параллельной схеме.

Резюмируя сделанные замечания, была разработана модель последовательно-параллельного каскадного генератора с введенными эквивалентными конструктивными емкостями (Рисунок. 2.19).

Расчет эквивалентной емкости данной высоковольтной колонны проводится аналогично описанной выше модели высоковольтной колонны согласно схеме, показанной на Рисунке 2.20. Суммарная емкость колонны с учетом конструктивных емкостей для модели из 11-ти секции составила

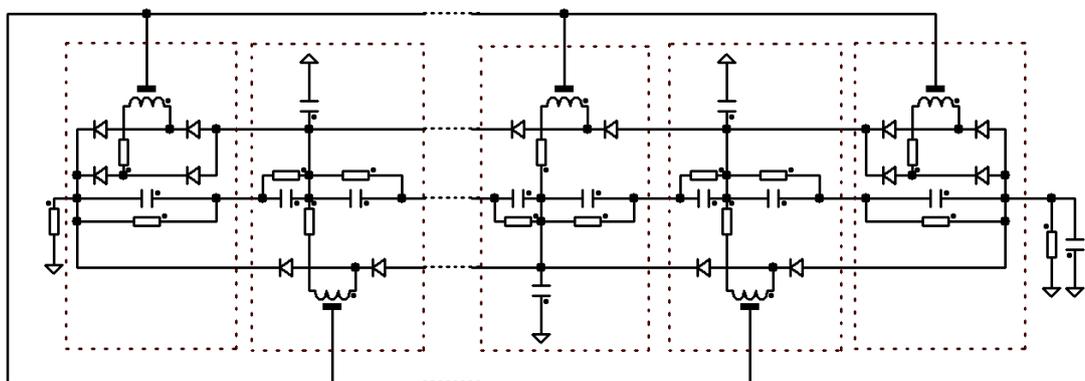


Рисунок 2.19. Двуполупериодная схема высоковольтного выпрямителя с мостами на диодах на краях колонны.

$$C_{\Sigma+gr} = 160 pF, \Rightarrow C_{\Sigma+gr}^{эКБ} = C_{\Sigma+gr} \left(N_{section}^2 / N_{эКБ}^2 \right) = 2,66 nF$$

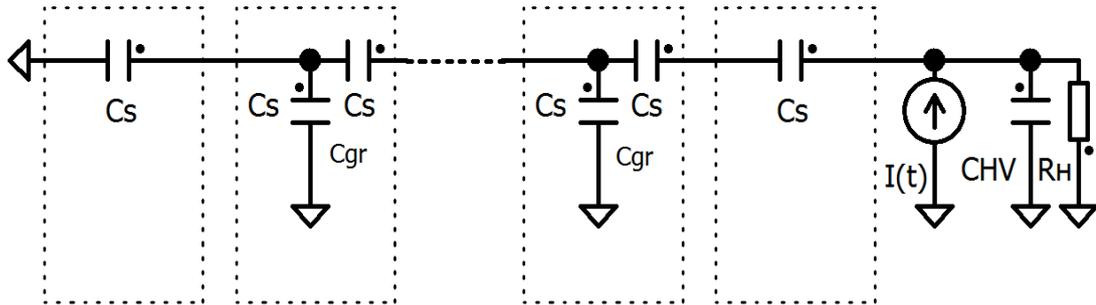


Рисунок 2.20. Схема замещения для расчета эквивалентной емкости колонны

Была предложена следующая методика расчета эквивалентных конструктивных емкостей C_{gr} :

– по (2.13) рассчитывается суммарная емкость колонны без учета C_{gr} , по которому определяются эквивалентные значения C_{Σ} и C_s :

$$C_{\Sigma} = \frac{C_s}{2 * (N_{section} - 1)} = 79 pF, \Rightarrow C_{\Sigma}^{эКБ} = \frac{C_{\Sigma} N_{section}^2}{N_{эКБ}^2} = 1301 pF, \Rightarrow$$

$$C_s^{эКБ} = 2 C_{\Sigma}^{эКБ} (N_{section} - 1) = 26,6 nF$$

– подбирая значение $C_{gr}^{эКБ}$, получаем значение $C_{\Sigma+gr}^{эКБ}$ равным **2,66 nF**,

вычисленному выше. Для колонны из 11-ти секций $C_{gr}^{эКБ}$ составило **625 pF**.

Методика расчета и параметры остальных элементов не изменялись.

Анализ пульсаций напряжений на конденсаторах первой секции и в регулярной части колонны для обеих моделей, представленных на Рисунке 2.16 и 2.21, учитывая ограничения диапазона работы (Рисунок 1.3) и то, что напряжение $U_{\text{мост}}$ распределяется между двумя последовательно соединенными конденсаторами, однозначно определяет преимущество использования

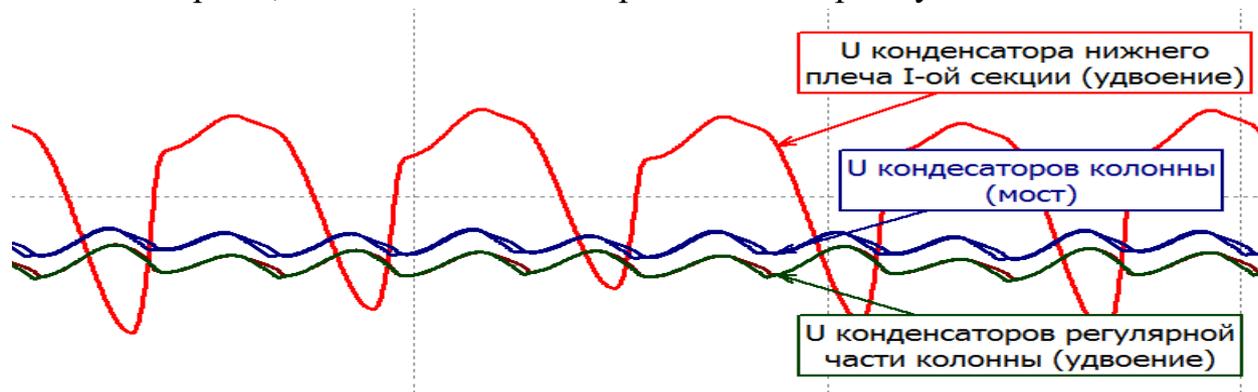


Рисунок 2.21. Формы расчетных пульсаций для конденсаторов в различных частях высоковольтной колонны с применением мостовой схемы и без неё.

двуполупериодного варианта с использованием на краях секций, собранных по схеме диодного моста (Таблица 2.6 и Рисунок 2.21). Такая архитектура позволит

Таблица 2.6

	$U_{C\min}$ $\times 10^3 \text{V}$	$U_{C\max}$ $\times 10^3 \text{V}$	ΔU_C $\times 10^3 \text{V}$	$U_{C\text{средн}}$ $\times 10^3 \text{V}$	Пульсации $U_C, \%$
U_C на крайних плечах без мостовой схемы	4,69	23,11	18,42	17,17	66,3%
U_C в регулярной части без мостовой схемы	9,39	12,18	2,8	10,7	12,9%
U_C крайних секций на основе мостовой схемы	10,98	13,69	2,7	12,35	10,9%
U_C в регулярной части (крайние секции – мост)	10,94	13,69	2,7	12,35	10,7%

значительно снизить ток через диоды крайних секций (Рисунок 2.22). Расчетный максимальный через диоды составил **202** и **50 мА**, выделяемая на диодах средняя за период мощность – **19** и **5 Вт**.

Аналогичных характер имеет и сравнение активной мощности, выделяемой на катушках вторичных обмоток. За счет применения последовательно-

параллельной схемы обеспечивается снижение тока в $\sim 1.5 \div 2$ раза. Такое уменьшение активной мощности на диодах и катушках секций позволяет облегчить тепловой режим работы высоковольтной колонны по сравнению с однополупериодной схемой.

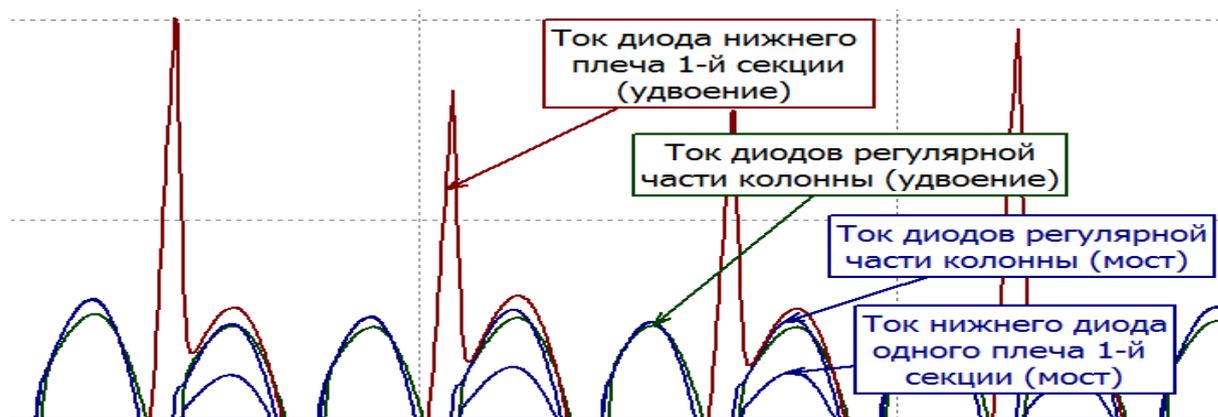


Рисунок 2.22 Сравнение расчетных форм тока диодов крайних секций

2.5 Сопоставление результатов моделирования высоковольтной колонны с секциями, собранными по последовательно-параллельной схеме с результатами измерений на реальных ускорителях ЭЛВ

Методика измерения реальных пульсаций энергии при работе ускорителя ЭЛВ-4 приведена в [30]. Измерения пульсаций проводились на стандартном ускорителе ЭЛВ-4 с высоковольтной колонной, собранной по последовательно-параллельной схеме, разработанном для скоростной рентген-томографии [65]. Результаты этих измерений представлены в Таблице 2.7 совместно с численными результатами моделирования описанных выше двух моделей (с использованием эквивалентных конструктивных емкостей и без оных). Данные реальных измерений достаточно хорошо коррелируются с расчетами модели, использующие вышеописанные введенные емкости (Рисунок 2.23).

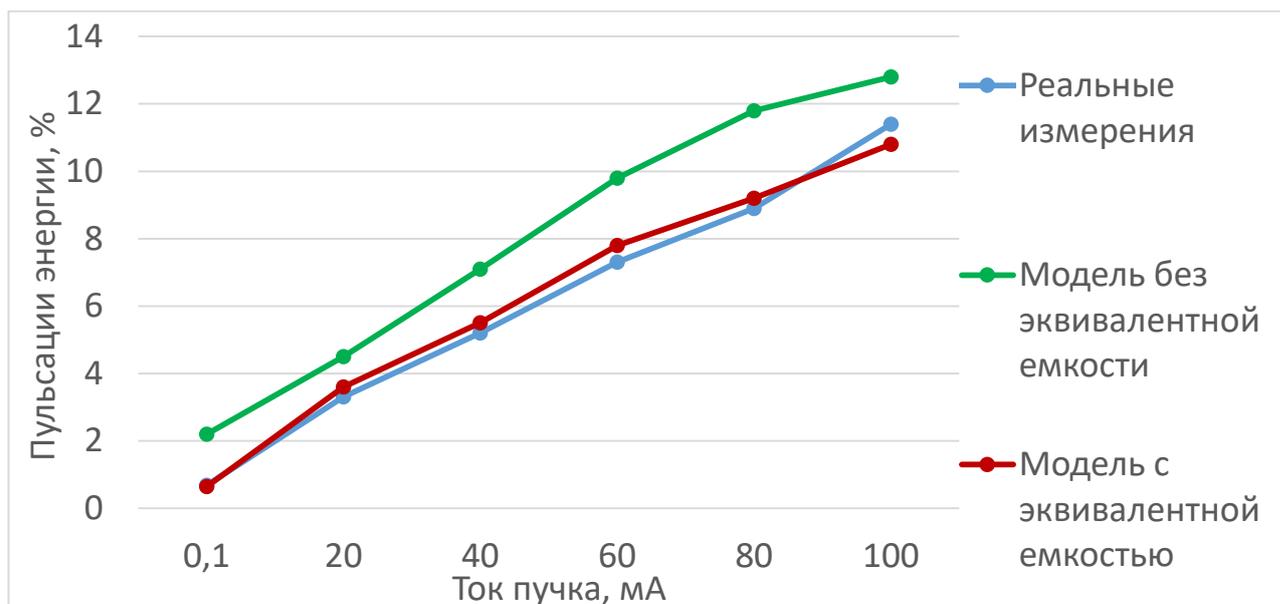


Рисунок 2.23 Сравнение расчетных и измеренных пульсаций (таблица 2.7) энергии в зависимости от тока пучка (А, ось x).

Из анализа осциллограммы энергии (Рисунок 2.24) видно, что форма пульсаций имеет более сложный характер. Спектральное разложение сигнала пульсаций [31] приведено на Рисунке 2.25. Оно показывает три отчетливых пика. Пик частоты 300 герц обусловлен пульсациям напряжения сетевого

Таблица 2.7. Сравнение пульсаций энергии в расчетных моделях и при реальных измерениях

Источник данных	Ток пучка, mA					
	0,1	20	40	60	80	100
Реальные измерения	0,68	3,3	5,2	7,3	8,9	11,4
Модель без эквивалентной емкости	0,4	4,5	7,1	9,2	11,8	12,8
Модель с эквивалентной емкостью	0,64	3,6	5,5	7,8	9,2	10,8

выпрямителя инвертора, пик с частотой **840 герц** (основной) обусловлен двуполупериодным режимом работы высоковольтного выпрямителя, третий пик имеет частоту питающего напряжения **420 Гц**.

Его появление связано с тем, что конденсаторы выпрямительных секций в разные полупериоды питаются от разных обмоток. Распределение напряжения по

вторичным обмоткам не совсем равномерно, оно слегка уменьшается от центра колонны к ее верхнему концу. Поэтому в тот полупериод, когда кон-

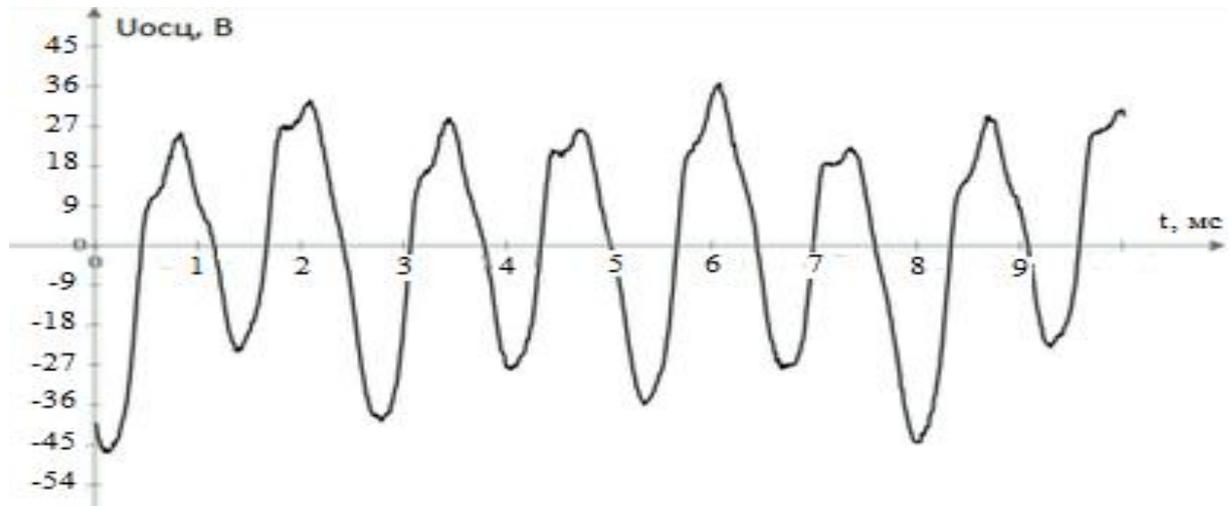


Рисунок 2.24 Сигнал пульсаций энергии при $E=1\text{МэВ}$, $I_{\text{пучка}}=80\text{ мА}$.

денсаторы заряжаются от верхней обмотки, они получают меньший заряд и наоборот, когда заряжаются от нижележащей обмотки, получают больший заряд, т.е. появляется пульсация с частотой питающего напряжения. Это вполне согласуется с теми допущениями на высоковольтный трансформатор, которые были оговорены при создании расчетной модели.

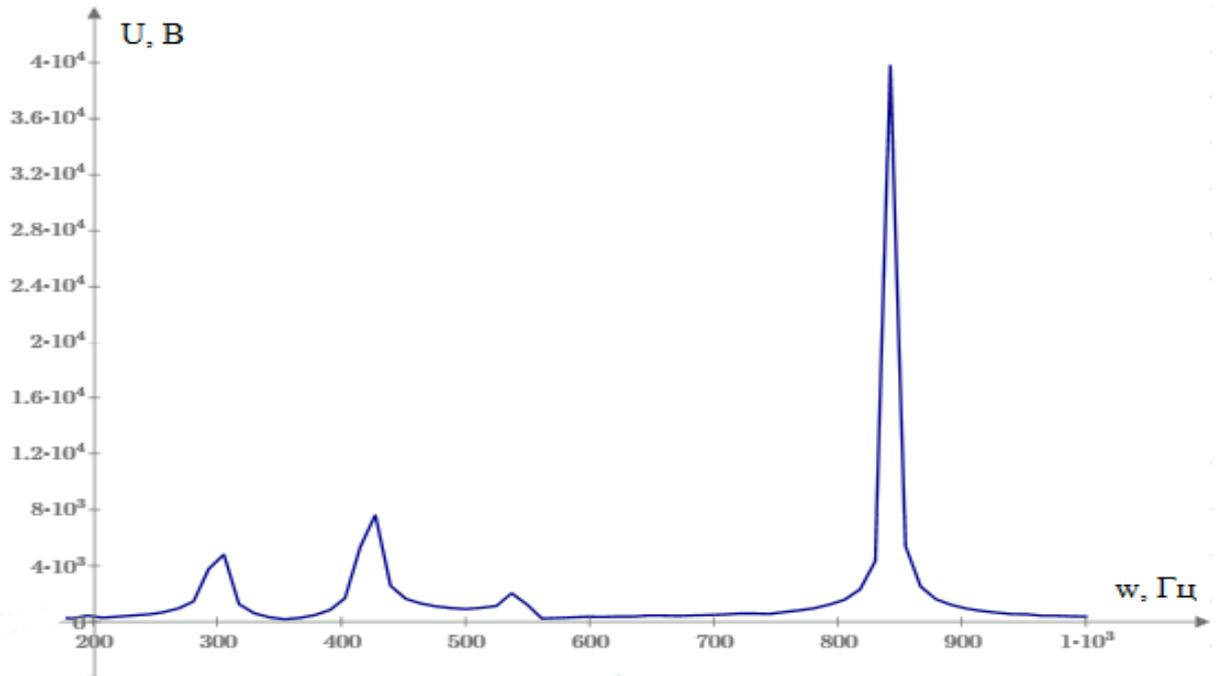


Рисунок 2.25. Спектр сигнала пульсаций энергии при $E=1\text{МэВ}$ $I_{\text{пучка}}=100\text{ мА}$,
 $C_{\phi}=4130\text{ мкФ}$

Дальнейшее снижение пульсаций энергии возможно исходя из анализа спектра гармоник (Рис 2.25). В работе [32] подробно проанализировано снижение пульсаций на частоте питающей сети (350-380Гц) за счет увеличения емкости фильтрующих конденсаторов на входе преобразователя частоты.

Другим эффективным способом может стать увеличение рабочей частоты транзисторного преобразователя [34]. В своей работе [27] Куксанов Н.К. показал, что пульсации энергии обратно пропорциональны частоте работы высоковольтного трансформатора $\Delta E/E \sim 1/(2\pi f_{\text{пр}})$. Расчетная зависимость пульсаций энергии от частоты работы преобразователя, сделанная для однополупериодной модели из 11 секций показана на Рис. 2.26. С другой стороны, в той же работе приводится, что удельная (как функция от высоты колонны) выходная мощность высоковольтного генератора $P \sim \frac{U_{\text{витковое}}^2}{f_{\text{преобр.}}}$. Поэтому для сохранения уровня максимальной мощности без изменения массогабаритных параметров увеличивая частоту, на которой работает ускоритель, необходимо увеличить $U_{\text{витковое}}$.

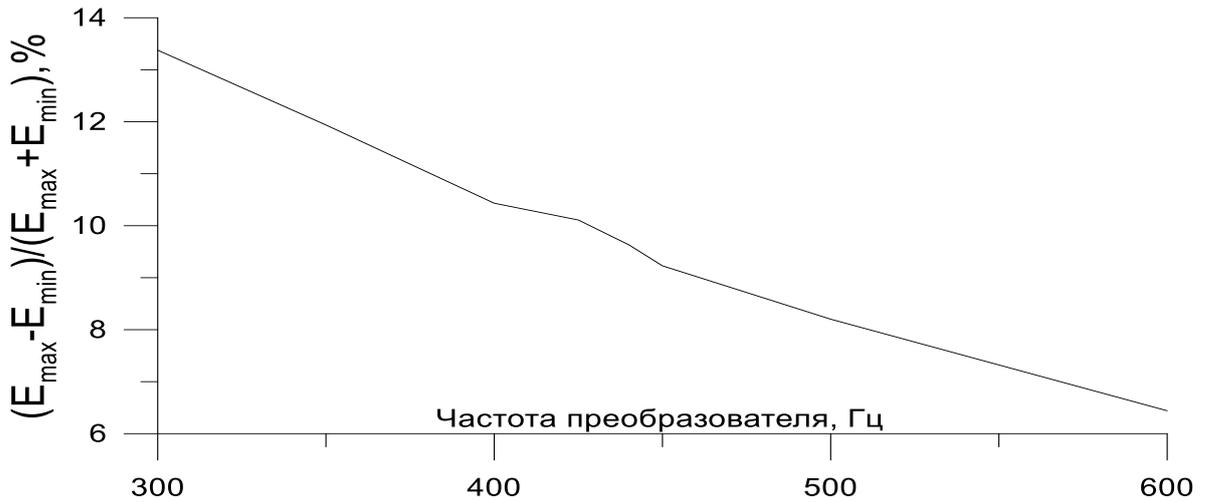


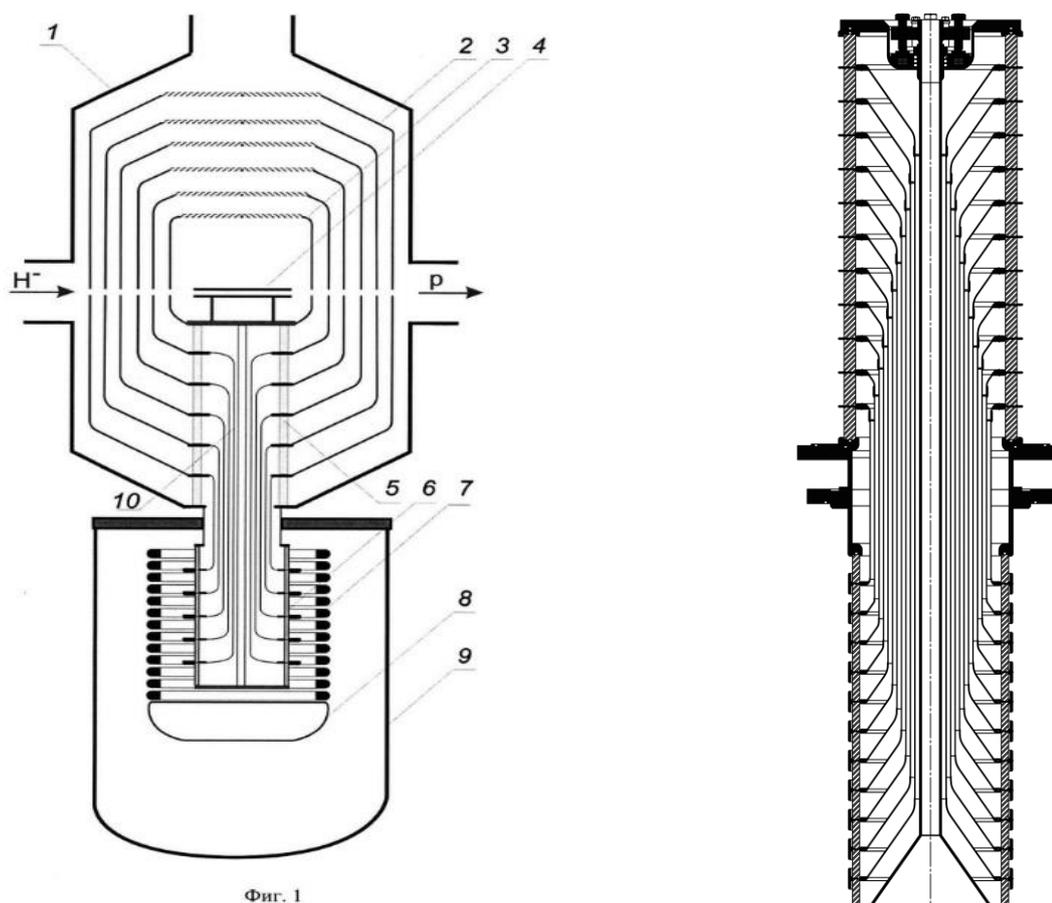
Рисунок 2.26. Пульсации энергии в зависимости от частоты преобразователя

При использовании описанных выше моделей было проведено сравнение работы каскадного генератора с колонной на повышающих секциях с катушками, содержащими 3000 витков на частоте 425Гц и генератора, собранного на повышающих секциях с 2000 витками и работающего на частоте 720Гц, не являющееся предметом рассмотрения данной работы.

2.6 Расчет пульсаций напряжения высоковольтной колонны для ускорителя БНЗТ.

Особенностью высоковольтного каскадного генератора для проекта установки бор-нейтрон захватной терапии (БНЗТ) по сравнению с обычными ускорителями ЭЛВ является ограничение по высоте высоковольтной колонны (Рисунок 2.27) и низкие пульсации выходного напряжения (не более 2%). Поэтому при моделировании высоковольтного источника расчет параметров в схеме замещения трансформатора, учитывая длина и высота первичной обмотки примерно равны ($H_{pw} \approx D_{pw}$), использовались выражения (2.5) и (2.6), согласно которым:

$$L_{PW}^{BNCT} = 0,386\text{мГ}, \quad L_{\mu}^{BNCT} = 0,151\text{мГ}, \quad L_S^{BNCT} = 0,235\text{мГ}, \quad 2.16$$



Фиг. 1

Рисунок 2.27. Общий вид высоковольтного трансформатора проекта БНЗТ (слева) и осевое сечение высоковольтного фидера(справа): 1 – сосуд ускоряющих электродов, 2-3 – ускоряющие электроды, 4 – перезарядная мишень, 5 – изоляторы, 6 – основание высоковольтного фидера, 7 – выпрямительные секции каскадного генератора, 8 – экран, 9 – котел каскадного генератора, 10 – трубчатый высоковольтный фидер для передачи потенциалов от колонны к ускоряющим электродам.

При построении модели и последующих испытаниях стенда использовалась выпрямительная колонна, состоящая из 18-ти секций. Поскольку требуемые параметры высоковольтного генератора – 1,2МэВ при максимальном токе 20мА, выпрямители секций собраны по схеме четырехкратного умножения напряжения. Ограничения, накладываемые применением высоковольтных конденсаторов TDK, сужают максимальное напряжение на применяемых емкостях до ~17кВ (напряжения катушки секции). При превышении этого параметра необходимо использовать последовательно-параллельное включение конденсаторов для

получения одинаковой емкости. Из известных схем четырехкратного умножения напряжения (Рисунок 2.28), была выбрана симметричная, использующая минимальное количество последовательно-параллельно включенных элементов

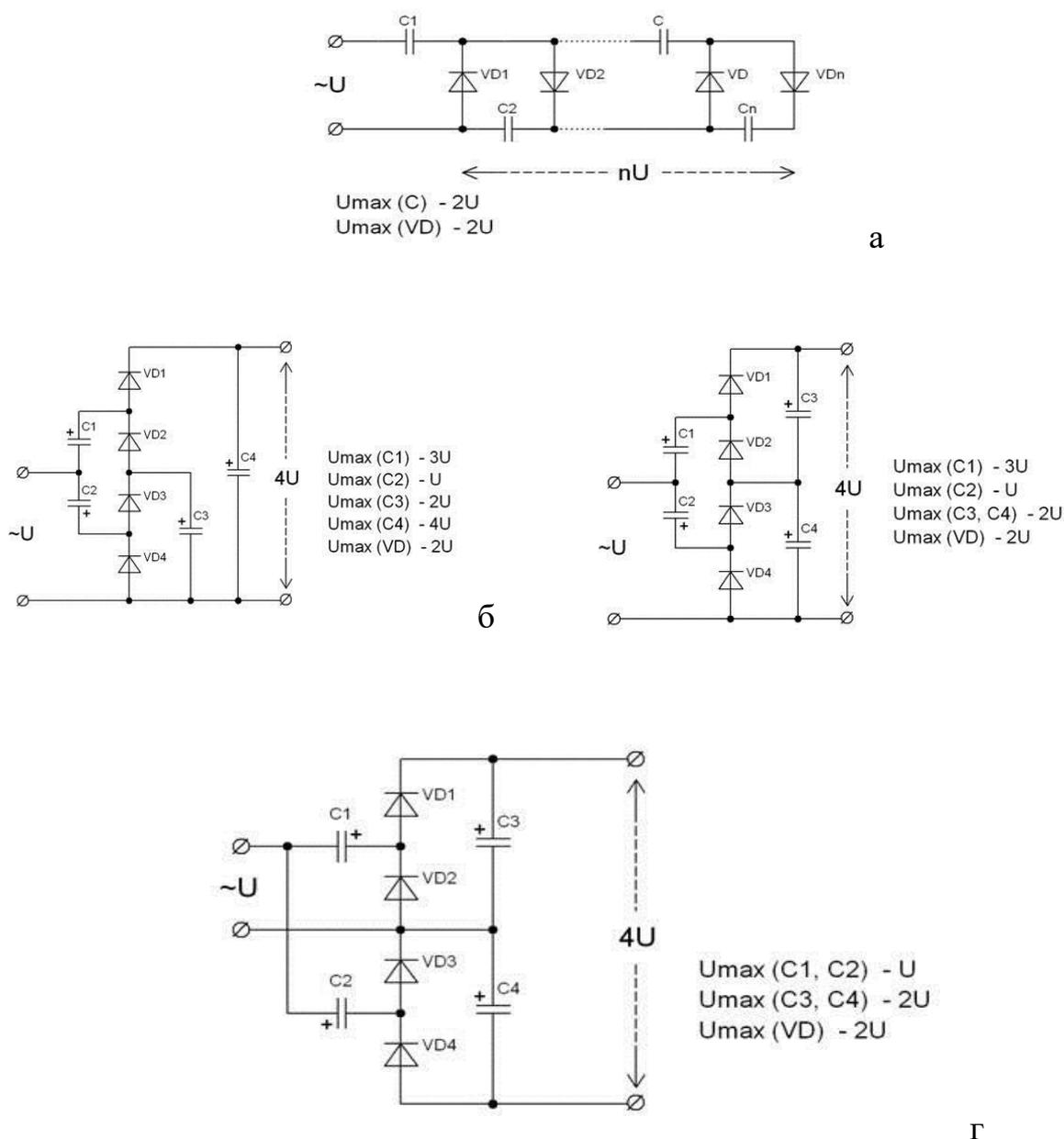


Рисунок 2.28. Схемы четырехкратного умножения напряжения: а – несимметричный умножитель напряжения (Кокрофта-Уолтона), б, в – несимметричные умножители I и II рода, г – симметричный умножитель напряжения.

Конструктивные емкости для высоковольтного фидера и ускорительных электродов ускорителя БНЗТ. Помимо этого, была произведена оценка взаимных

конструктивных емкостей внутри высоковольтного фидера и ускоряющих электродов. по методикам, предлагаемым в [33]. Поскольку фидер представляет собой набор вложенных соосных металлических трубок, то аналитическое решение для емкости идеализированного конденсатора (без учета краевого эффекта), состоящего из пары длинных соосных цилиндров определяется как

$$C_{\phi i} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 L_{i+1}}{\ln(R_i/R_{i+1})}, \quad 2.17$$

где L_{i+1} – длина $(i+1)$ -ой трубки, R_i и R_{i+1} – соответствующие радиусы.

Аналогично, с учётом верхних дисковых и нижних кольцевых частей были оценены конструкционные ёмкости ускорительных электродов. Результаты расчета представлены в Таблицах 2.8 и 2.9. и были использованы при моделировании как дополнительные конденсаторы.

Модель высоковольтного генератора для режима работы $E=1,2MV$ и $I_{beam}=20mA$ аналогична показанной на Рисунке 2.6 со следующими изменениями:

- уменьшена в два раза индуктивность согласующего дросселя;
- высоковольтная колонна, составлена из 18-ти повышающих секций, собранных по схеме, показанной на рис 2.31(слева);
- к секциям подключены последовательные цепи конденсаторов, образованные конструктивными емкостями высоковольтного фидера и ускорительных электродов.

Таблица 2.8. Конструктивные емкости высоковольтного фидера стенда							
№	1	2	3	4	5	6	7
Сф, pF	69	343	542	554	300	325	377
№	8	9	10	11	12	13	14
Сф, pF	426	288	409	391	360	262	241
Таблица 2.9. Конструктивные емкости ускорительных электродов стенда							
№	I	II	III	IV	V	VI	VII
Су, pF	90	72	132	29	34	19	4

Расчеты пульсаций высокого напряжения были произведены с учетом и без

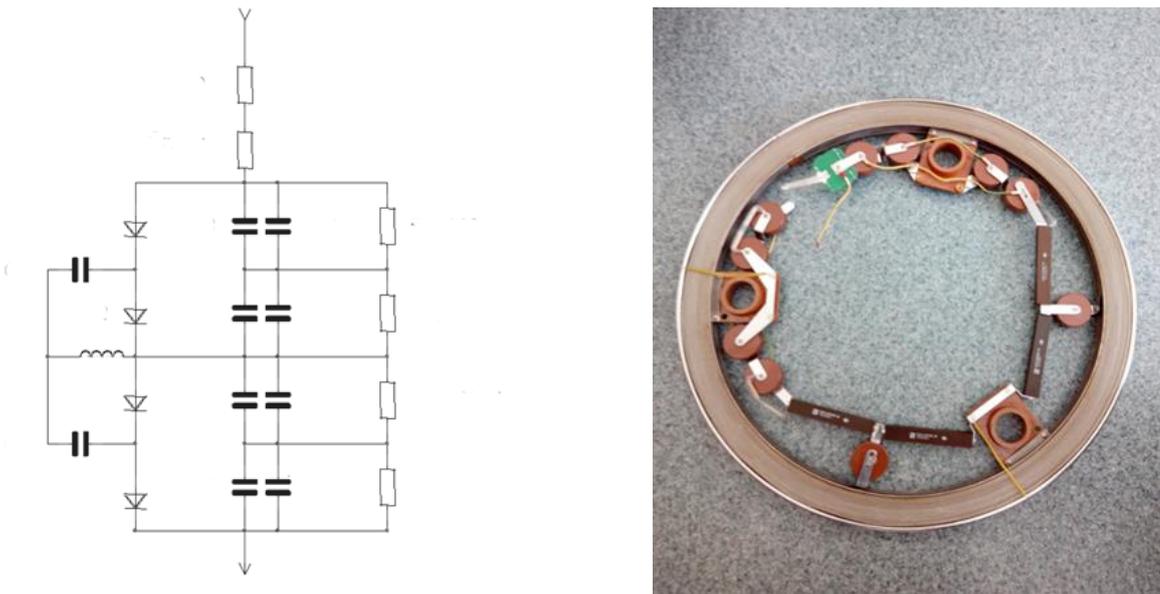


Рисунок 2.29. Электрическая схема секции с четырехкратным умножением напряжения и внешний вид собранной секции

учета конструктивных емкостей, для высоковольтных колонн, собранных из секций с двух- (для сравнения) и четырехкратным умножением напряжения. Результаты моделирования представлены в Таблице 2.10, а расчетный вид пульсаций -- на Рисунке 2.30.

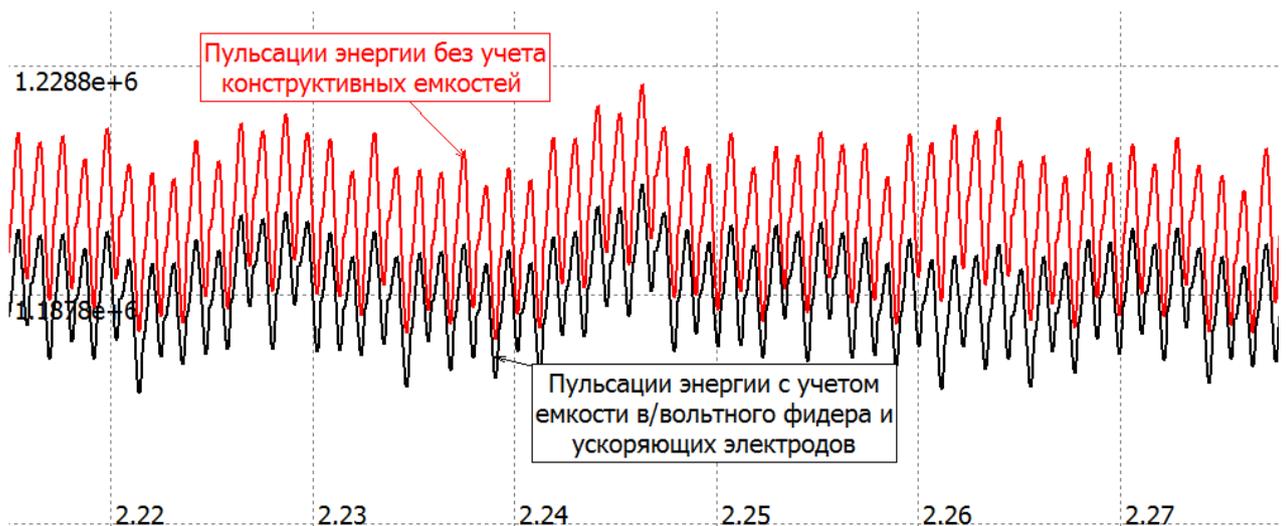


Рисунок 2.30. Расчетные пульсации энергии для вариантов высоковольтной колонны с секциями с четырех кратным умножением напряжения.

Из результатов моделирования (таблица 2.10) можно сделать вывод о том, что получение уровня пульсаций энергии $\Delta E \sim 3\%$ достижимо при существующей конструкции каскадного генератора.

Таблица 2.10. Пульсации энергии с учетом и без учета конструктивных емкостей

	$E_{\text{мин}}$, MV	$E_{\text{мак}}$, MV	$E_{\text{сред}}$, MV	ΔE , %
Реальные измерения в режиме 1МэВ 20мА	-	-	1,12	4%
Модель схемы учетверения напряжения без учета фидера	1,226	1,284	1,246	4,17%
Модель схемы учетверения напряжения с учетом фидера	1,220	1,255	1,236	2,87



Рисунок 2.31. Медная обкладка ёмкостного датчика для измерения пульсаций.

Результаты реальных измерений. Испытания собранного генератора с пучком проводились по стандартным методикам работы ускорителя ЭЛВ.

Измерение пульсаций ускоряющего напряжения производилось с помощью ёмкостного датчика, медная изолированная обкладка которого была размещена на верхнем фланце сосуда (см. Рисунок 2.31). Перед окончательным закрытием сосуда ёмкостной датчик калибровался от внешнего источника переменного напряжения 400 Гц [30].

При испытаниях была исследована возможность работы при режимах до $E=1,2$ МэВ, $I_{\text{beam}}=20$ мА. Измерения пульсаций при работе ускорителя в режиме

$E=1,1$ МэВ, $I_{\text{beam}} = 20$ мА показали $\Delta E = 22$ кВ, что составляет ± 2.0 % (Таблица 2.10).

По результатам работы стендовой модели было сформулировано требование максимального снижения пульсаций напряжения и в конструкцию высоковольтного генератора БНЗТ был внесен ряд изменений, как-то:

- изменены параметры и размеры первичной обмотки (20 витков);
- частота работы преобразователя изменена на 720 Гц и 1440 Гц;
- емкость конденсаторов, подсоединенных к катушкам секций, составляет $2*3400\text{pF}=6800\text{pF}$, в плечах выпрямителя -- $3*3400\text{pF}/2=5100\text{pF}$;
- изменены размеры и уменьшено количество витков (до 2000) вторичных секций;
- изменены размеры и порядок подключения электродов высоковольтного фидера, рассчитанные конструктивные емкости приведены в таблицах 2.11 и 2.12, а схема подключения изображена на Рисунке 2.32;

Таблица 2.11. Конструктивные емкости высоковольтного фидера

№	1	2	3	4	5	6	7
C_{ϕ} , pF	70	431	528	585	240	348	394
№	8	9	10	11	12	13	14
C_{ϕ} , pF	417	419	413	390	354	309	209

Таблица 2.12. Конструктивные емкости ускорительных электродов

№	I	II	III	IV	V	VI	VII
C_y , pF	935	820	633	475	334	206	0

- увеличена емкость фильтрующих конденсаторов питания на входе преобразователя[34].

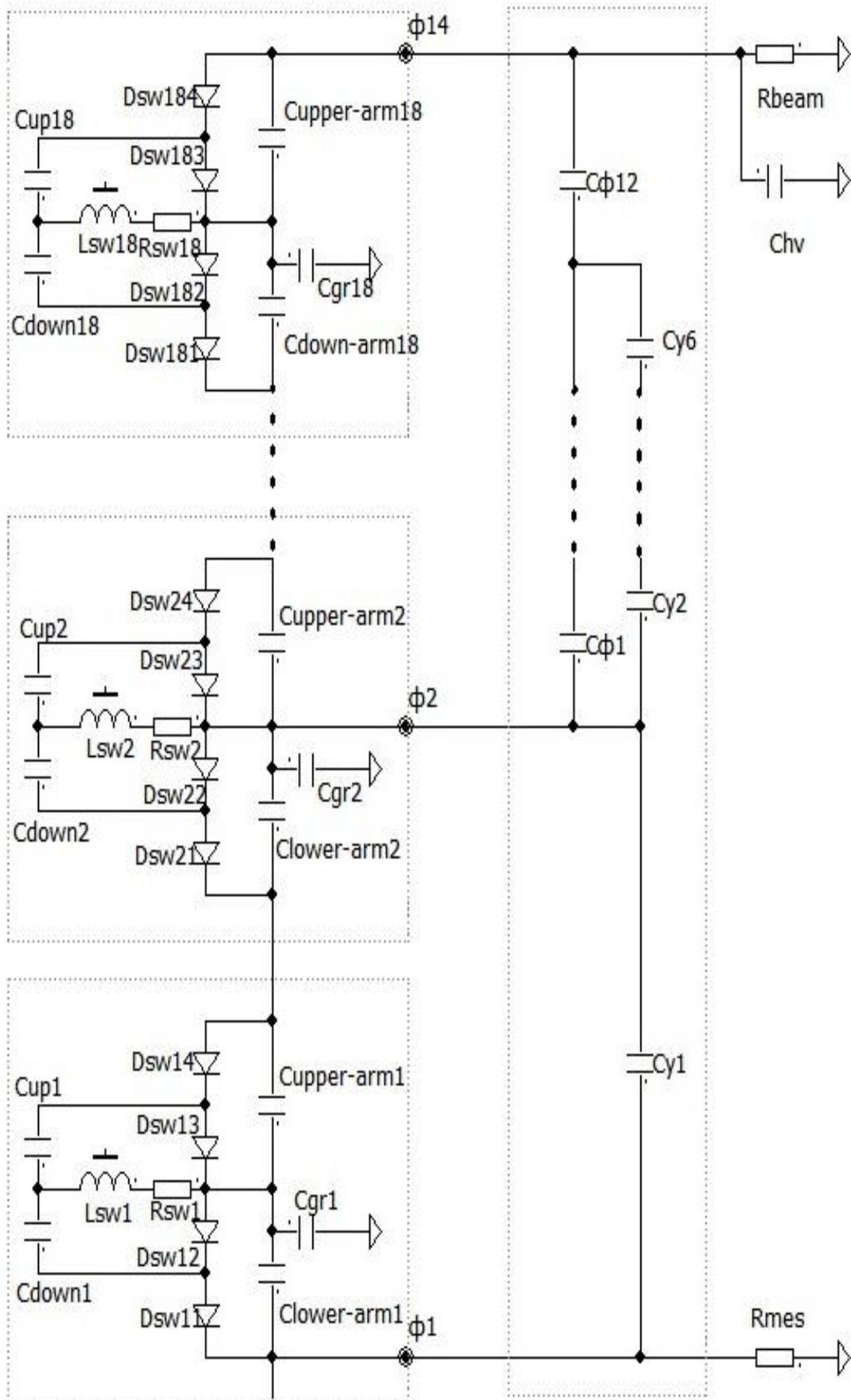


Рис 2.32. Функциональная схема выпрямительной колонны для БНЗТ

Расчет пульсаций для окончательно утвержденной конструкции

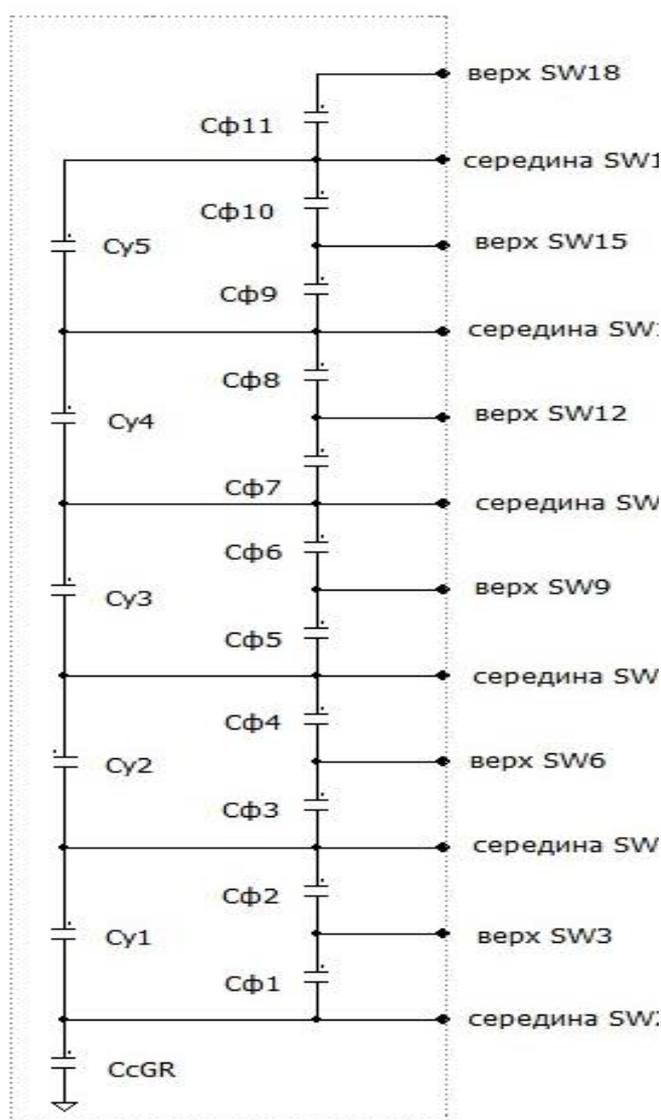


Рис 2.33. Порядок подключения конструкционных емкостей к выпрямительной колонне.

высоковольтного генератора

БНЗТ проводился с учетом

указанных выше изменений.

Расчет эквивалентных

индуктивностей с учетом

магнитопровода дает следующие

значения для схемы замещения:

$$L_{pw} = 0,331\text{мГ}, L_{\mu} = 0,137\text{мГ}, L_{s1} = 0,165\text{мГ}.$$

Этот вариант генератора был

промоделирован и показал

возможность снижения пульсаций

энергий ниже 1% с увеличением

частоты преобразователя выше 700

(1400) Гц при режиме работы

$E=1,2\text{МэВ}$ $I_{\text{beam}}=20\text{мА}$. Основные

результаты моделирования для

различных значений фильтрующих

емкостей на входе преобразователя

C_{Power} (Рисунок 2.5) приведены в

Таблице 2.13, а расчетный

характер пульсаций при частоте преобразователя 720Гц – на Рисунке 2.34.

Дальнейшая работа по отладке ускорителя, в том числе и по снижению уровня пульсаций, проекта БНЗТ будет проводиться на реальном оборудовании.

Резюмируя все изложенное в данной главе, можно сделать следующие **выводы**:

- рост пульсаций энергии, связанный с переходом на импортные конденсаторы, находится в пределах, устанавливаемых требованиями

основных существующих технологических процессов, и не ограничивает применение ускорителей ЭЛВ в режиме 1,5МэВ/67мА, при этом выполняются ограничения, предъявляемые к работе высоковольтных конденсаторов и диодов;

Таблица 2.13. Пульсации энергии в расчетной модели БНЗТ при частоте преобразователя 720 и 1440Гц.

	C_{Power} , μF	Е мин., МэВ	Е макс., МэВ	Пульсации, %
Без учета конструкционных емкостей ($f_{FC}=720$ Гц)	3000	1,190	1,292	4,11
С учетом емкости фидера и ускорительных электродов ($f_{FC}=720$ Гц)	2000	1,191	1,224	1,37
	3000	1,190	1,216	1,08
	4130	1,187	1,209	0,92
С учетом емкости фидера и ускорительных электродов ($f_{FC}=1440$ Гц)	4130	1242	1265	0,92
	7200	1194	1213	0,79

- использование предложенной схемы с последовательно-параллельным соединением выпрямительных секций позволило ограничить пульсации на уровне 10% и коррелируется с реальными измерениями) при работе ускорителей ЭЛВ-4 в режиме 1МэВ/100мА, обеспечивая безаварийную работу элементов выпрямительных секций колонны. Переход с двухколонной архитектуры на вышеуказанную схему позволил уменьшить массогабаритные характеристики ускорителя на 1МэВ/100мА (Рис. 2.14).
- Описанные выше варианты моделей каскадных генераторов позволяют достаточно точно прогнозировать работу каскадных генераторов ускорителей ЭЛВ для различных применений, что продемонстрировано при создании каскадного генератора проекта БНЗТ.

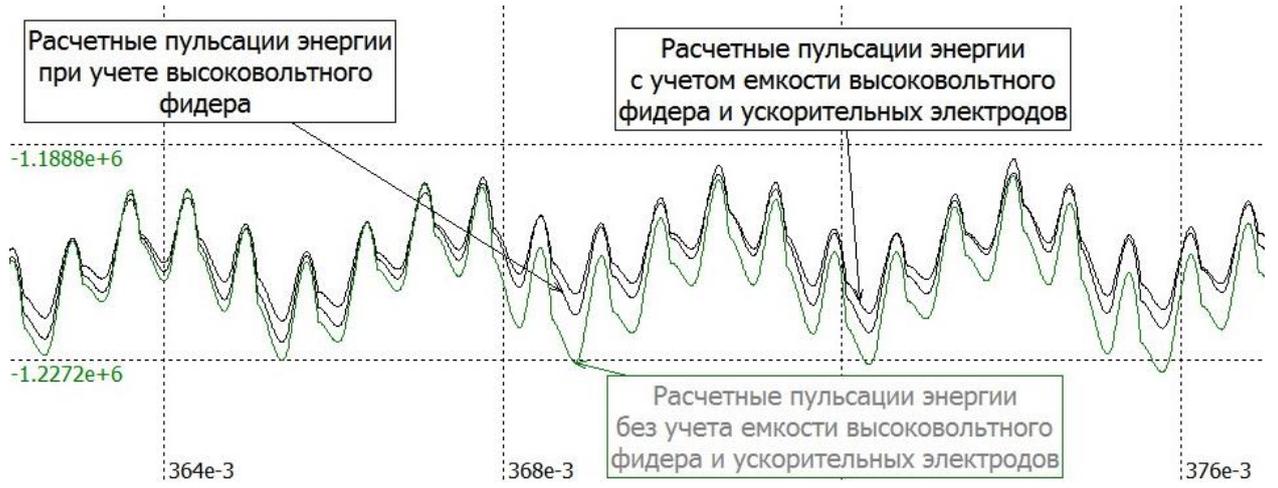


Рисунок 2.34. Расчетные пульсации энергии высоковольтного каскадного генератора проекта БНЗТ на частоте $f_{FC}=720$ Гц.

Глава 3

Методика повышения однородности электронно-лучевой обработки материалов ускорителями ЭЛВ

Выпуск электронного пучка в атмосферу в ускорителях ЭЛВ традиционно осуществляется через окно из тонкой фольги [49]. При развитии модельного ряда ускорителей ЭЛВ выпускное устройство (раструб) неоднократно модернизировалось – увеличивался линейный размер выпускного окна до 980, а потом и до 1600 мм [51], при этом угол отклонения выпускаемого пучка составляет 30°. В настоящее время ряд ускорителей комплектуется раструбами с длиной выпускного окна 2000 мм [52]. Поскольку линейные плотности тока пучка и, следовательно, дозы облучения зависят от угла отклонения [50], то такие изменения актуализируют требования к однородности дозы по всей длине зоны облучения, т.к. на краях выпускного окна удельная плотность дозы уменьшается.

3.1 Модель отклоняющей системы

Величина дозы облучения определяется плотностью тока пучка и линейной скоростью его сканирования по длине выпускного устройства. Введем среднюю локальную плотность тока на фольге как $j(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T J(x, y, t) dt$, где T – время развертки пучка электронов вдоль длины фольги (в ускорителях ЭЛВ эта величина $\sim 10 \text{ мс}$), а $J(x, y, t)$ – функция тока пучка после прохождения отклоняющей системы. В дальнейшем под термином средняя плотность тока будем понимать величину, усредненную за время T . Интеграл плотности тока пучка вдоль оси y (перпендикулярно длине раструба) $j_x = \int_{-a}^a j(y) dy$, называется линейной плотностью тока. Он пропорционален заряду, следовательно, и энергии,

поглощенной в обрабатываемом материале при однократном проходе зоны облучения, т.е. величине дозы.

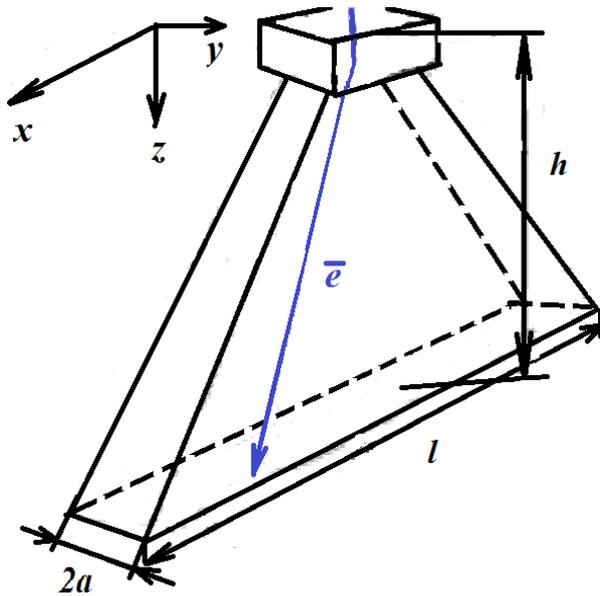


Рисунок 3.1. Схема сканирования и вывода пучка электронов через выпускное окно (раструб).

Выразим зависимость линейной плотности тока от угла отклонения пучка (Рисунок 3.1) $j_x = \frac{j}{v_x} = J \frac{2\cos^2\varphi}{T \cdot h \cdot \frac{d\varphi}{dt}}$, где J – полный ток пучка, φ – угол отклонения, T – период развертки, h – высота раструба. Чтобы проанализировать зависимость тока пучка и мощности дозы от φ рассмотрим величины, приведенные к $\varphi=0$:

$$Y_j = \frac{j_x(\varphi)}{j_x(0)} = \frac{\cos^2(\varphi) \cdot \frac{d\varphi}{dt} \Big|_{\varphi=0}}{\frac{d\varphi}{dt}} \quad (3.1).$$

Учитывая, что эффективная толщина облучаемого материала увеличивается на $1/\cos\varphi$, то

приведенная доза, набираемого материалом при прохождении поперек выпускного окна составит

$$Y_D = \frac{D(\varphi)}{D(0)} = Y_j \cdot \frac{1}{\cos(\varphi)} \sim \frac{\cos(\varphi)}{\frac{d\varphi}{dt}} \quad (3.2)$$

Из полученных формул видна зависимость плотности тока и дозы от угла отклонения φ как функции времени. Поведение и форма $\varphi(t)$ определяется как геометрией полюсов отклоняющих электромагнитов, формирующих магнитное поле, так и формой питающего их тока.

3.2. Анализ геометрии магнитов сканирующей системы

Простейшим способом отклонения пучка электронов вдоль окна выпускного устройства ускорителя является система отклоняющих магнитов в виде

неограниченных вдоль оси x полос шириной l . На Рисунке 3.2 показан этот вариант

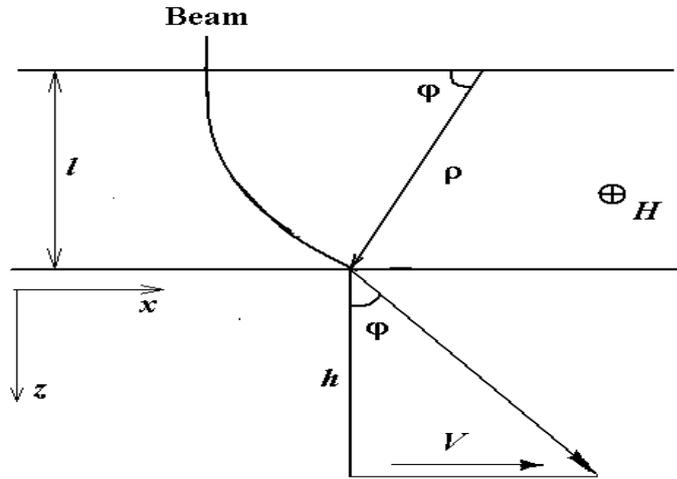


Рисунок 3.2. Отклонение пучка полюсами в виде бесконечных лент шириной l .

геометрии полюсов. Ускоренный вдоль оси z пучок электронов

попадает магнитное поле B , являющееся перпендикулярным его движению и отклоняющие его на угол φ , синус угла которого может быть вычислен как

$$\sin(\varphi) = l/\rho \Rightarrow$$

$$\sin(\varphi) = Bl/(H\rho) \quad (3.3)$$

где ρ – радиус кривизны вращения электрона в однородном магнитном поле, а

$(H\rho)$ – приведенный релятивистский импульс электрона. Bl – можно представить в виде интеграла $Bl = \int_l B dl = K \cdot I(t)$, где K – некоторая константа, $I(t)$ – ток в катушках отклоняемых магнитов. Тогда формулы для скорости пучка и дозы могут быть представлены как

$$V^{belt} = h \cdot \frac{K}{(H\rho)} \cdot \frac{1}{\cos^2(\varphi)} \cdot \frac{dl}{dt}; D^{belt} \sim \frac{1}{V} \cdot \frac{1}{\cos(\varphi)} \sim \frac{\cos^2(\varphi)}{dI/dt} \quad (3.4)$$

Для приведенных величин соответственно

$$Y_V^{belt} = \frac{V(\varphi)}{V(\varphi=0)} = \frac{1}{\cos^3(\varphi)} \cdot \frac{dI(t)/dt}{dI(t=T/2)/dt}; Y_D^{belt} = \cos^2(\varphi) \cdot \frac{dI(t=T/2)/dt}{dI(t)/dt}, \quad (3.5)$$

где углу $\varphi=0$ соответствует время середины развертки $T/2 = 5mS$. Ток сканирующих магнитов имеет пилообразную форму, т.е. $dI(t)/dt = const$, и (3.5) примет вид:

$$Y_V^{belt} = \frac{V(\varphi)}{V(\varphi=0)} = \frac{1}{\cos^3(\varphi)}; Y_D^{belt} = \cos^2(\varphi) \quad (3.6)$$

Приведенный выше способ отклонения пучка электронов имеет эффект краевой фокусировки, особенно заметный на больших углах отклонения и

подробно описанный [53]. За счет существования z -компоненты составляющей магнитного поля на нижних краях магнитных полюсов и составляющей скорости пучка вдоль длины раструба (x -компонента) появляющейся после прохождения отклоняющего поля, на электроны начинает действовать сила Лоренца, приводящая к уменьшению размера растра пучка по оси y . С практической точностью эквивалентное фокусное расстояние можно считать равным

$$f_{\varphi} = \frac{R}{\operatorname{tg}\phi} = l \cdot \left(\frac{\cos\phi}{\sin^2\phi} \right)$$

Заметим, что данный эффект не влияет на распределение линейной дозы, однако

при увеличении ϕ приводит к локальному перегреву фольги на краях выпускного устройства и снижению её срока службы.

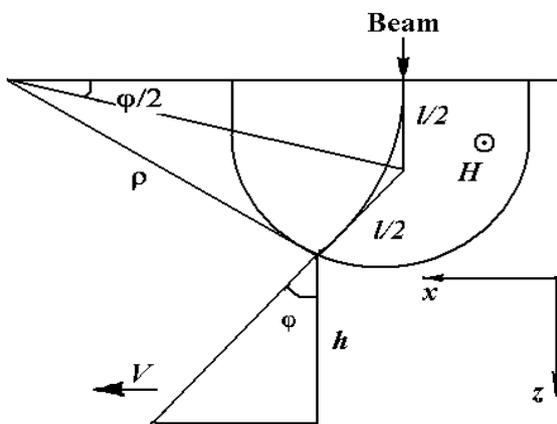


Рисунок 3.3. Отклонение пучка цилиндрическими магнитными полюсами.

Изображенная на Рисунок 3.3 отклоняющая система с цилиндрическими магнитными полюсами свободна от вышеописанного недостатка. В этом случае пучок выходит по нормали к эквимагнитным линиям и эффекта фокусировки по оси, перпендикулярной отклонению электронов, не наблюдается и

происходит увеличение поперечного размера пучка по краям раструба.

Из геометрических построений можно вычислить величину угла отклонения:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{Hl}{(H\rho)},$$

тогда зависимости скорости и дозы от угла φ , представляются как:

$$V^{cil} = h \cdot \frac{K}{(H\rho)} \cdot \frac{\cos^2(\varphi/2)}{\cos^2(\varphi)} \cdot \frac{dI}{dt}; D^{cil} \sim \frac{\cos(\varphi)}{\cos^2(\varphi/2) dI/dt}, \quad (3.7)$$

а приведенные значения:

$$Y_V^{cil} = \frac{V(\varphi)}{V(\varphi = 0)} = \frac{\cos^2(\varphi/2)}{\cos^2(\varphi)} \cdot \frac{dI(t)/dt}{dI(t = T/2)/dt};$$

$$Y_D^{cil} = \frac{\cos(\varphi)}{\cos^2(\varphi/2)} \cdot \frac{dI(t=T/2)/dt}{dI(t)/dt} \quad (3.8)$$

и для пилообразного тока:

$$Y_V^{cil} = \frac{V(\varphi)}{V(\varphi=0)} = \frac{\cos^2(\varphi/2)}{\cos^2(\varphi)} \quad Y_D^{cil} = \frac{\cos(\varphi)}{\cos^2(\varphi/2)} \quad (3.9)$$

На рисунке 3.4 приведены расчеты значений распределения приведенных доз в зависимости от угла φ для обеих рассмотренных моделей.

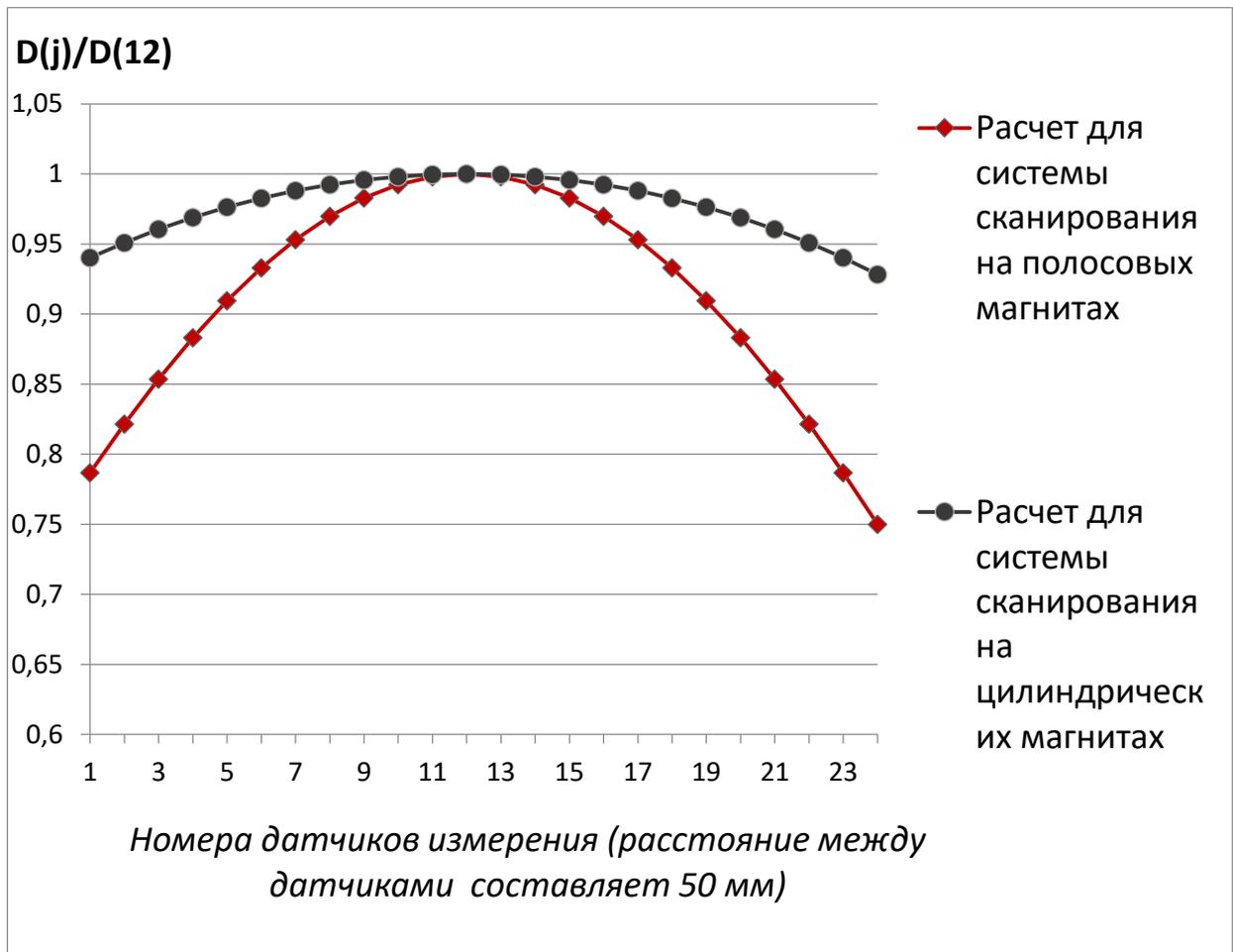


Рисунок 3.4. Сопоставление расчетных приведенных доз для различных систем отклоняющих магнитов.

3.3. Сопоставление моделей с реальными измерениями и учет рассеяния пучка электронов на фольге и в воздухе

Реальная форма электромагнитов показана на Рисунке 3.5. Топология эквивалентных линий в этом случае промежуточна для рассмотренных вариантов, краевая фокусировка ослаблена, и размер раstra поперёк выпускного окна остается постоянным. Реальные измерения однородности облучения проводились при энергиях 0,4МэВ, 0,6МэВ, 0,8МэВ (Рисунок 3.6). Датчики цилиндрической формы диаметром $\sim 10 \div 15$ мм и длиной, перекрывающей поперечный размер растроба, располагались на расстоянии 50 мм от нижнего края растроба и на расстоянии 50 мм друг от друга. Поскольку при любом угле



Рис 3.5. Система магнитов, отклоняющих пучок вдоль выпускного окна.

отклонения пучка площадь нормального относительно траектории электронов сечения датчиков остается неизменной, измеряемый ток пропорционален получаемой дозе.

Отклонение расчетных величин от реальных измерений на края растроба могут быть объяснены рассеянием пучка электронов, как в фольге выпускного устройства, так и в

воздухе. Оценить эффект рассеяния электронов можно, если использовать формулу расчета среднеквадратичного угла отклонения для тонких фольг[53]:

$$\sqrt{\Theta^2} = \frac{21}{\beta \cdot p} \sqrt{\frac{x}{t_k}},$$

где p – импульс электрона, выраженный в МэВ/с2 ,

x – толщина фольги,

t_k – радиационная длина, вычисляемая согласно [54]:

$$t_k = \frac{716,4 \cdot A}{Z(Z+1) \ln \frac{287}{\sqrt{Z}}} [g \cdot cm^{-2}] = \frac{1432,8 \cdot A}{Z(Z+1)(11,319 - \ln Z)} [g \cdot cm^{-2}]$$

в которой: Z – атомный номер, A – атомная масса [г./моль].

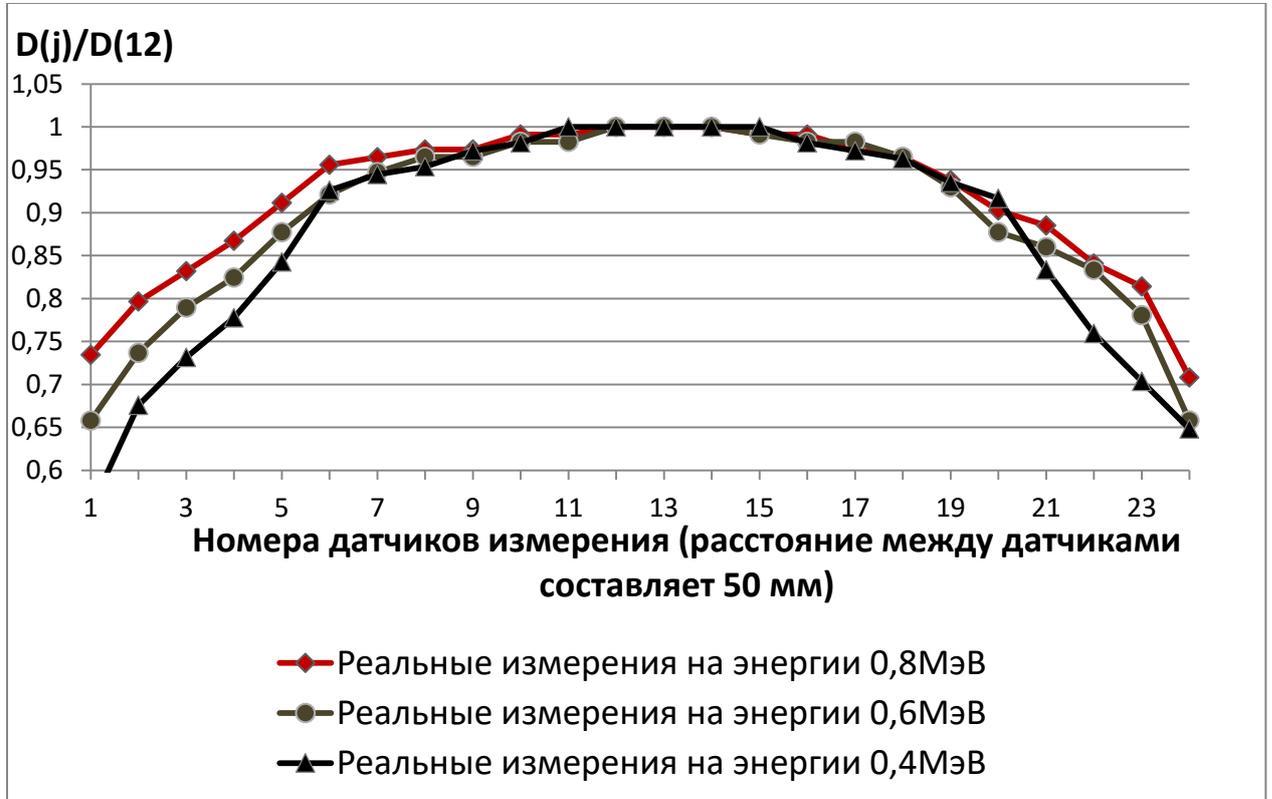


Рисунок 3.6. Измерения однородности облучения по длине выпускного окна для различных энергий.

Для титановой фольги численное значение составляет $t_k^{Ti} = 16,16$. Для рассматриваемых значений энергий угол $\sqrt{\Theta^2}$ приведен в таблице как для нормального падения ($\varphi = 0^\circ$), так и при максимальном отклонении электронов ($\varphi = 30^\circ$). Как видно из Таблицы 3.1 углы рассеяния значительны и должны сказываться на распределении.

Таблица 3.1

Формы кривых на

Энергия, МэВ	$\sqrt{\Theta^2}$ ($\varphi=0^\circ$)	$\sqrt{\Theta^2}$ ($\varphi=30^\circ$)
0,4	39,98	42,97
0,6	30,44	32,71
0,8	25,42	27,31

Рисунке. 3.4 и 3.6 показывают, что доза распределена по длине выпускного окна неравномерно, с «завалами»

на краях раструба. Следовательно, для улучшения равномерности дозы необходимо снижать скорость сканирования пучка на краях раструба при соблюдении следующего условия:

$$Y_D \left[\varphi = 0, \frac{T}{2} \right] \geq \frac{1}{2} [Y_D[-\varphi_{max}, 0] + Y_D[\varphi_{max}, T]] \quad (3.10),$$

другими словами – изменить закон сканирования (форму тока сканирования).

3.4. Изменение формы тока отклоняющих магнитов

Упрощенная электрическая схема питания разверток представлена на Рисунке 3.7, где через L обозначена индуктивность отклоняющей системы (типовое значение порядка **200 мН**), а через R – её активное сопротивление и сопротивление проводов (реальная величина **~2 Ом**).

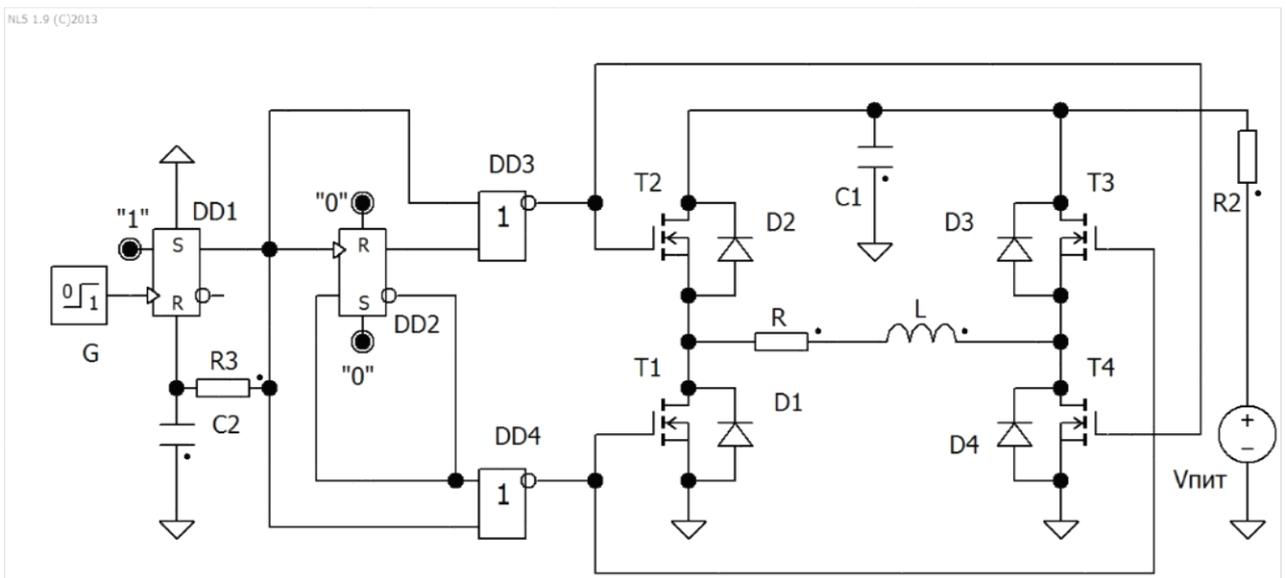


Рисунок 3.7. Упрощенная схема питания электромагнитов развертки.

Инверторы, вырабатывающие прямоугольное напряжение построены по классической мостовой схеме инвертора напряжения на полевых ключевых транзисторах (MOSFET) типа IRFPC37N50A со встроенными защитными диодами. Инвертор напряжения питается от источника напряжения, регулируемого в диапазоне от **0** до **+200В** в зависимости от значения энергии. Схема управления транзисторами моста реализована с помощью КМОП логики, генерирующей

управляющие сигналы с частотой ~ 50 или 100 Гц, таким образом, время развертки вдоль выпускного окна составляет ~ 10 мс (в дальнейшем эта величина будет отображаться в формулах как T), что составляет половину периода управляющих сигналов. Цепь R_3C_2 формирует время задержки управляющих сигналах, которое для реальных генераторов находится в диапазоне $2,4 \div 2,6$ мс и должно быть меньше чем четверть вышеуказанного периода. Триггер DD2 и логические ИЛИ-вентили формируют управляющие сигналы с учетом этой задержки. Рассмотрим работу генератора. При установившемся процессе, в момент, когда ток $i_L = 0$, открывается пара транзисторов T_1-T_3 и через L начинает идти нарастающий ток $i_L \sim e^{-t/\tau}; \tau = L/R$. После снятия управляющего напряжения с этой пары ключей, за счет энергии запасенной в сканирующих катушках, через L проходит ток, уменьшающийся по указанной зависимости, который через защитные пары диодов D1-D3, частично рассеиваясь на активном сопротивлении R , заряжает емкость C_1 . По окончании времени задержки открывается вторая пара транзисторов T_2-T_4 , и при уменьшении i_L до 0 через сканирующие электромагниты начинает течь ток, аналогичный описанному для транзисторов T_1-T_3 , но противоположный ему по знаку. Поскольку длительность управляющих сигналов одинакова, то, на момент закрытия пары T_2-T_4 i_L^{MAX} равно максимальному значению тока для первой пары транзисторов. Далее через пару диодов D2-D4 этот ток спадает до 0, начинает снова работать первая пара T_1-T_3 [28]. Таким образом, при установившемся процессе ток i_L , протекающий через индуктивность можно представить в виде суммы токов:

$$i_L(t) = \frac{U_0}{R} \left(1 - e^{-t/\tau}\right) - i_0 e^{-t/\tau}; \tau = \frac{L}{R} \quad (3.11)$$

Исходя из условия установившегося процесса $i_L(0) = -i_0; i_L(T) = i_0$, получим значение для величины тока в момент переключения питания i_0 :

$$i_0 = \frac{U_0}{R} \cdot \frac{(1 - e^{-T/\tau})}{(1 + e^{-T/\tau})}; i_L(t) = \frac{U_0}{R} \left(1 - \frac{2}{(1 + e^{-T/\tau})} e^{-t/\tau}\right)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{U_0}{L} \cdot \frac{2}{(1 + e^{-T/\tau})} e^{-t/\tau} \quad (3.12)$$

Соотношение $\tau/T = wL/R \gg 1$, поэтому ток сканирующей системы имеет симметричную пилообразную форму (Рис 3.8). При такой форме тока неравномерность дозы облучения составляет ~10-12%. Чтобы увеличить значение дозы на краях выпускного устройства необходимо уменьшить скорость изменения тока при больших углах отклонения. Из (3.12) следует, что изменение производной тока (скорости сканирования) возможно вариацией трех параметров: U_0 , L и постоянной времени $\tau = L/R$. Поскольку параметры катушки магнитов сканирования унифицированы, возможно только добавление балластного последовательного сопротивления R и изменение мощности источника и напряжения питания разверток U_0 , удовлетворяющего условию (10). Для цилиндрического и ленточного типов полюсов это требование может быть переписано как

$$\frac{\cos \varphi_{\max}}{\cos^2 \frac{\varphi_{\max}}{2}} \left(\frac{di_L(T/2)/dt}{di_L(0)/dt} + \frac{di_L(T/2)/dt}{di_L(T)/dt} \right) \geq 1; \varphi_{\max} = 30^\circ$$

$$\cos^2 \varphi_{\max} \left(\frac{di_L(T/2)/dt}{di_L(0)/dt} + \frac{di_L(T/2)/dt}{di_L(T)/dt} \right) \geq 1; \varphi_{\max} = 30^\circ \quad (3.13)$$

Решение этих уравнений при замене $x = e^{T/2\tau}$ приводит к квадратному параметрическому уравнению $x^2 - \xi x + 1 = 0$, ξ - коэффициент, учитывающий геометрию отклоняющих магнитов.

Тип полюсов	ξ	τ (сек)	R(Ом)
цилиндрический	2,155	0.0127	15.68
ленточный	2,67	0.0061	32.76

Расчетные графики приводятся на Рис.3.8. Необходимо заметить две особенности. Первое – это то, что для получения отклонения $\varphi_{\max} = 30^\circ$ амплитуда тока составляет ~5А, и заметная часть энергии, накапливаемой в электромагнитах, рассеивается на этом добавочном сопротивлении, поэтому необходимо выбирать сопротивление достаточно большой мощности.

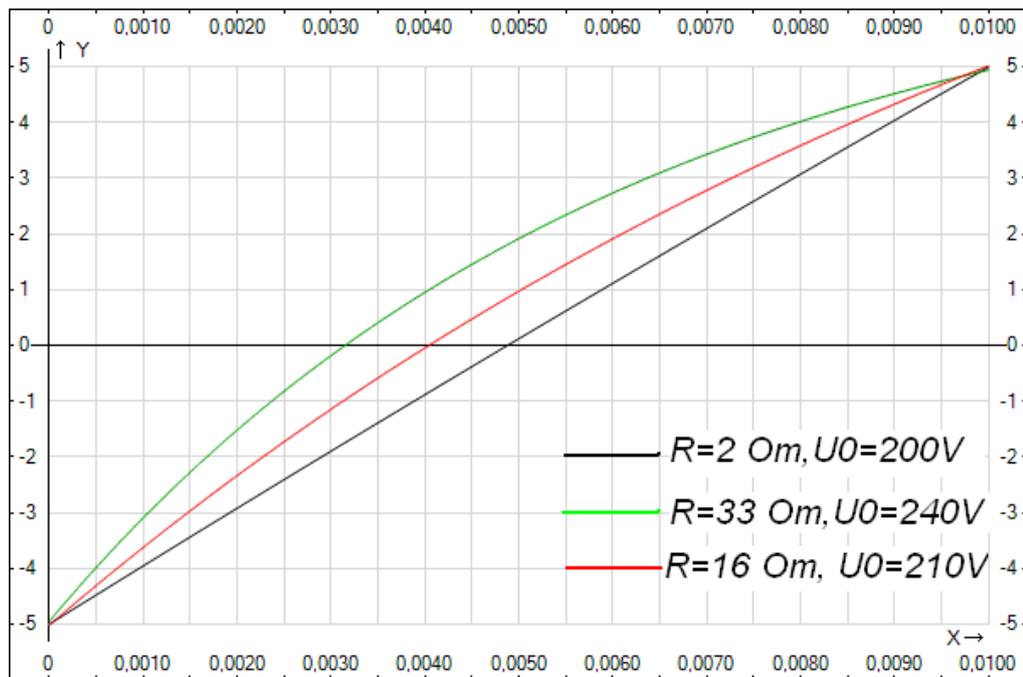


Рис. 3.8. Расчетные кривые для различных вариантов магнитных полюсов в сравнении с традиционной схемой отклонения ($R=2, U_0=200\text{В}$)

Вторая особенность более критична – поскольку используется дополнительное балластное сопротивление, для получения необходимого максимального тока необходимо увеличивать питающее напряжение и мощность источника (приведенные на **Рис. 3.8** графики уже учитывают такое увеличение). Это не позволяет использовать существующие источники питания разверток.

Альтернативным и более изящным решением стало использование дополнительной последовательной емкости C (Рис. 3.9) В этом случае, как показано ниже, мощности типовых блоков питания и генераторов развертки вполне достаточно.

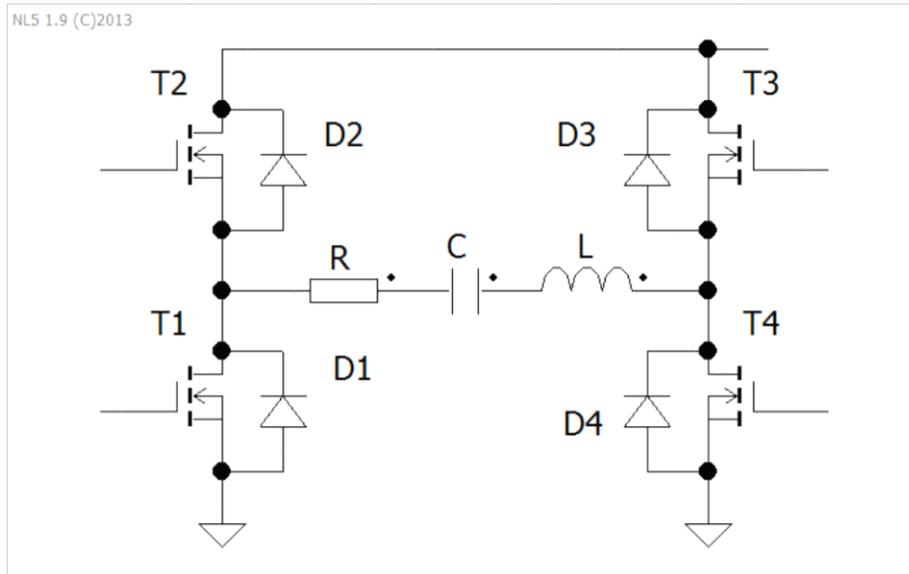


Рис. 3.9. Изменение схемы для расчёта тока отклоняющей системы в случае RLC-цепи.

Действительно, с учетом установившегося процесса, определяемого граничными условиями, уравнение системы будет представлено как

$$\begin{cases} LC \frac{d^2 U_c}{dt^2} + RC \frac{dU_c}{dt} + U_c = U_0 \\ i_L(0) = -i_0, \\ U_c(0) = -U_{co}, \\ i_L(T) = i_0, \\ U_c(T) = U_{co}, \end{cases} \quad (3.14)$$

где R – суммарное последовательное сопротивление катушек и проводов, L – индуктивность катушек сканера, C – дополнительная последовательная емкость, U_{co} и i_0 – значение напряжения на конденсаторе и тока электромагнитов в моменты переключения полярности питания (**0mS** и **10mS**). Точное решение уравнения (14) относительно тока i_L представляется в виде ряда:

$$I(t) = \frac{4U_m}{\pi} \cdot \sum_{k=2n+1} \frac{kwsin(wkt + \varphi_k)}{\sqrt{(kwRC)^2 + \eta^2}}; \varphi_k = -arctg\left(\frac{\eta}{kwRC}\right); \eta = 1 - (kwLC)$$

Для анализа рассмотрим решение этой системы в виде $i_l(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + i_0$, зависящее от вида корней характеристического уравнения к (14), определяемых как

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}, \quad (3.15)$$

При условии аperiodического процесса $\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC} \geq 0 \Rightarrow C \geq \frac{4L}{R^2} = \frac{4 \cdot 0,2}{2^2} = 0,2F$.

Это достаточно большая величина, поэтому решение необходимо искать в области колебательного процесса. В этом случае возникает условие на собственную частоту ω_0 затухающих колебаний $\frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC} \geq T \approx 20mS \Rightarrow C \geq 50\mu F$. Моделирование и поиск решения проводились с помощью программы NL5 (Рис. 3.10), показывающий форму тока сканирующих магнитов в зависимости от величины последовательной емкости и напряжения питания. В этом случае

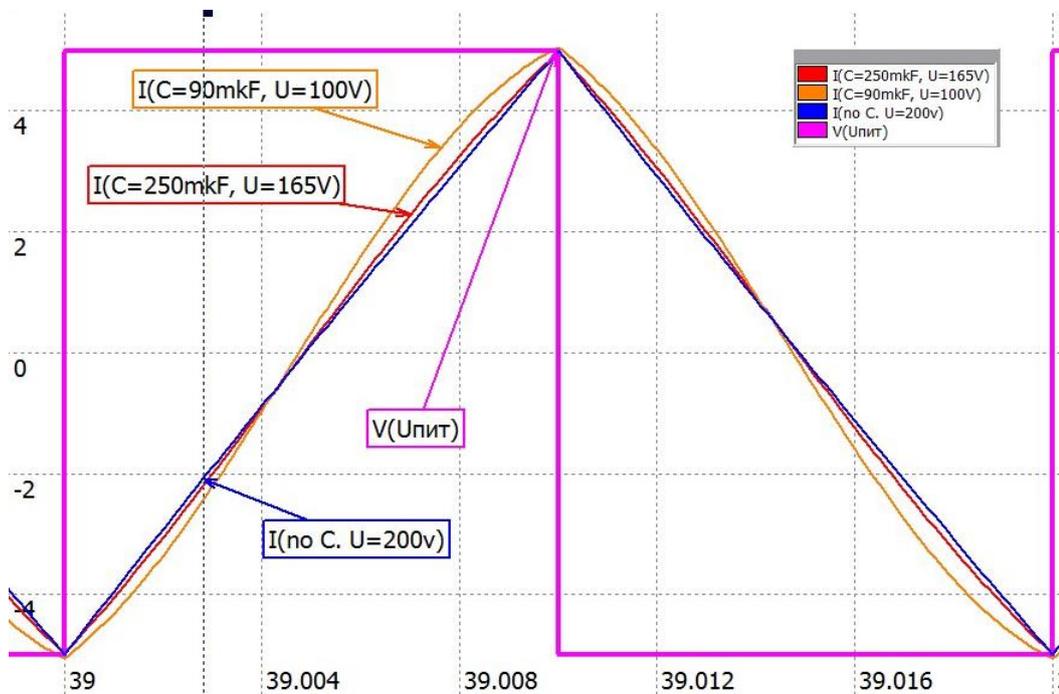


Рис. 3.10. Расчетные графики формы тока для различных значений добавочной емкости (при равных максимальных значениях тока) и форма питающего напряжения

увеличение емкости от **80** до **330 мкФ** напряжение, необходимое для генерации тока с амплитудой $i_L^{MAX} = 5A$, возрастает **100В** до **200В**, которое эквивалентно стандартной **LR**-цепи, при этом форма тока приближается к пилообразной. Такое поведение можно качественно объяснить, используя графики напряжений на обмотке сканирования и добавочном конденсаторе (рисунок 3.11).

В момент переключения ключей в индуктивности низкочастотной развертки в цепи течет ток, противоположный по знаку с направлением тока переключенной цепи, который начинает заряжать добавочную емкость до некоторого отрицательного напряжения. По мере заряда конденсатора энергия, запасенная в магнитном поле, частично накапливается в емкости и примерно к половине времени развертки $T/2 = 5\text{mS}$ становится равной максимальной. В этот момент в контуре течет ток, равный рассмотренному выше случаю LR -цепи, определяемый суммой напряжений на источнике и добавочной емкости $U_L = U_0 + U_c$. Вторую половину периода емкость разряжается, и производная тока $L \frac{dI}{dt} = U_c + K, K = \text{const}$, отвечающая за пилообразное поведение тока, уменьшается. При переключении полярности источника этот процесс повторяется с противоположным знаком. Таким образом, скорость изменения тока определяется величиной вольтдобавки U_c , параметризуемой значением емкости.

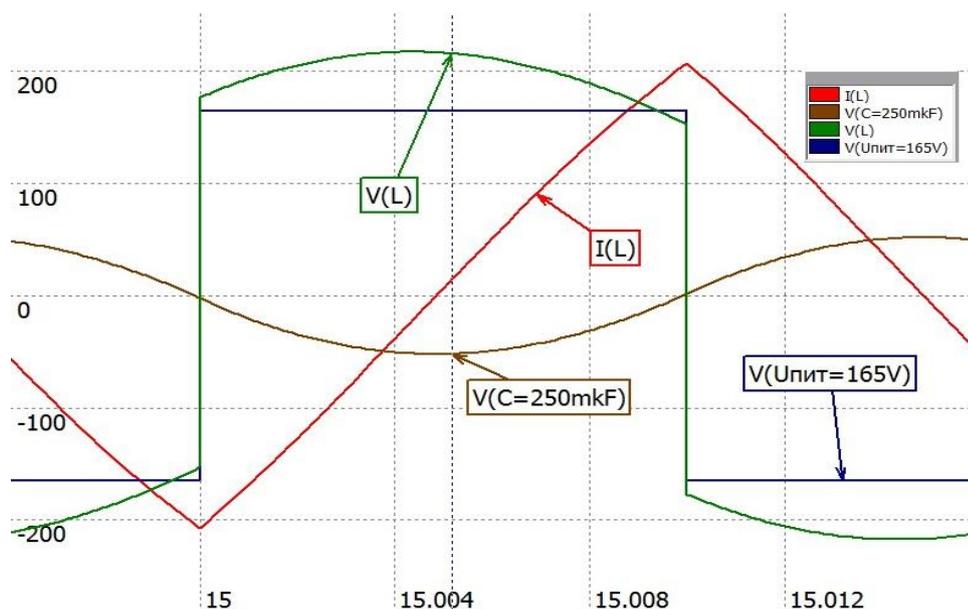


Рис. 3.11. Формы напряжения на катушках электромагнитов, добавочной емкости, напряжение питания разверток и форма сканирующего тока.

Данная простая методика была использована при модернизации ускорителя для облучения широкого полиэтиленового листа в марте 2012 года.

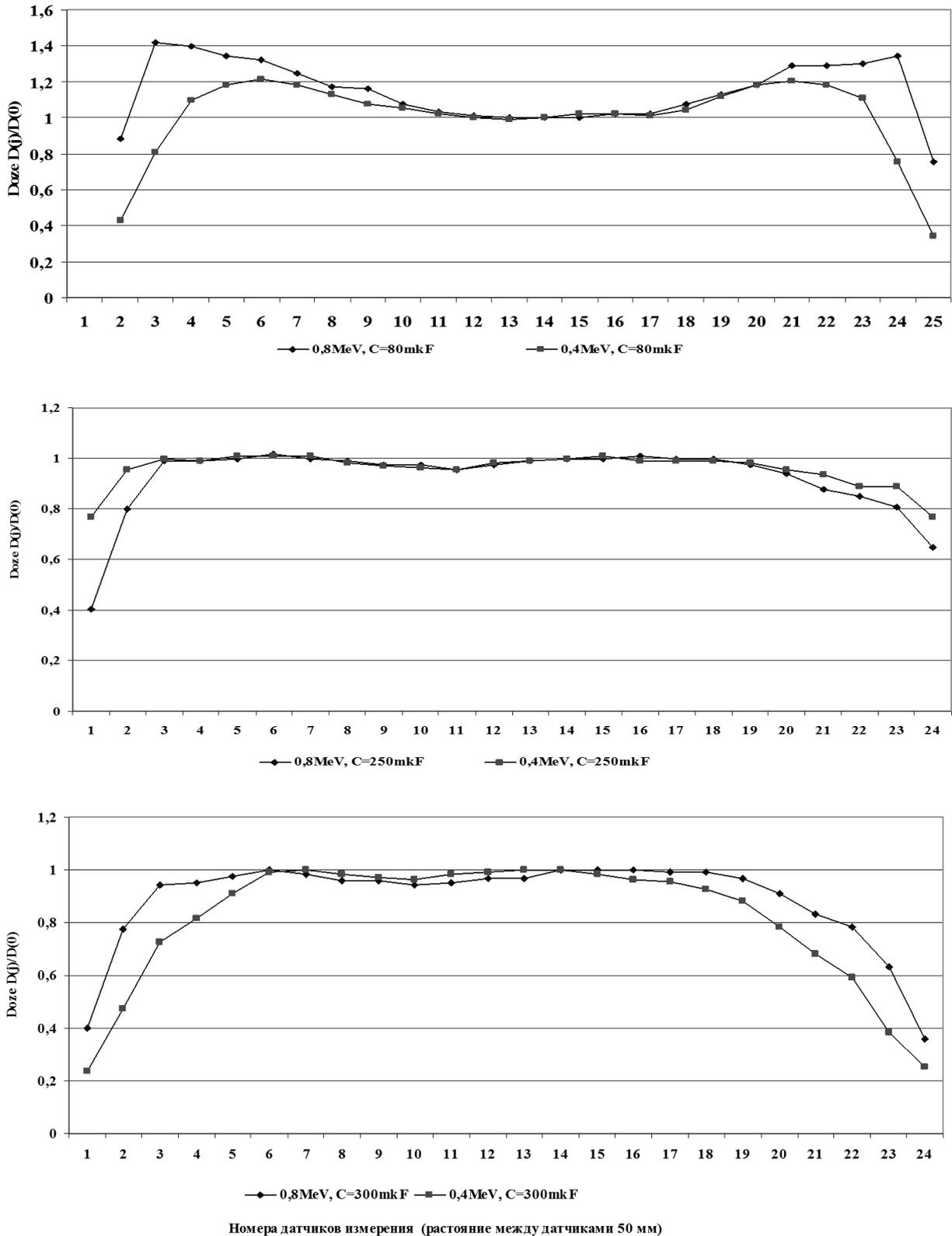


Рис. 3.12. Зависимость приведенной дозы облучения от энергии и емкости по длине выпускного окна.

Расчетная емкость находилась в диапазоне от **240** до **270 мкФ**. Измерения неоднородности дозы проводились в диапазоне энергий от **0,4** до **0,8 Мэв** при токе

пучка *1 МА*. Результаты измерения неоднородности облучения при различных параметрах емкости и энергии показаны на рисунке 3.12.

При настройке в реальных условиях дополнительная емкость составила **250 мкФ**. В результате удалось достичь неравномерности дозы менее **4%**, и удовлетворить требованиям технологического процесса при использовании типового оборудования без изменения системы сканирования пучка, что в условиях мелкосерийного производства (а в настоящее время установлено и работает более 100 ускорителей ЭЛВ[56]) унифицирует и упрощает поддержку оборудования со стороны поставщика.

Глава 4

Использование системы четырехстороннего облучения для оптимизации процесса радиационной обработки кабелей

Оптимизируя способ облучения изделий электронным пучком, можно существенно поднять качество облучения и эффективность использования пучка, снизить стоимость обработки. Упомянутая в Главе I система четырехстороннего облучения позволяет совместить высокое качество облучения с эффективностью использования пучка. Она является оптимальной для обработки кабельных изделий и проводов с наружным диаметром до нескольких десятков миллиметров. Из рассмотренной в Главе I (Рис. 1.7) схемы организации облучения следует, что требуемая глубина проникновения электронов при выполнении условия $D_{in} = D_{out}$ (аналогично оценкам, рассмотренным в Главе 2) может быть $\sqrt{2}$ раза меньше, чем для двухстороннего облучения. Уменьшение глубины проникновения ведёт к уменьшению необходимой энергии в 1.2-1.5 раза, снижая себестоимость обработки.

Известно, что увеличение плотности химической сетки материала изоляции проводов обеспечивает работоспособность этих изделий при повышенной температуре [46]. Подвергая полиэтиленовый материал обработке электронным пучком можно повысить пространственную плотность сетки за счет радиационной сшивки полиэтилена, между которыми существует закономерное соответствие [47]. Степень сшивки полиэтилена, так называемая гель-фракция, определяемая отношением массы сшитой части к общей массе образца, позволяет контролировать качество такой обработки. Обобщая широкий спектр производимой кабельной продукции можно сформулировать следующие общие требования к содержанию гель-фракции при радиационной обработке изоляции кабелей:

– нижняя граница содержания гель-фракции составляет 35-45%. Это тот минимальный уровень сшивки, при котором у полиэтилена появляются необходимые для последующей эксплуатации в сложных условиях повышенных температур и давлений физико-химические свойства;

– верхняя граница содержания гель-фракции – 70-75%, выше которой начинается спекание и деструкция полиэтилена изоляции, и, следовательно, происходит потеря качества производимой продукции.

Таким образом, для получения качественной кабельной продукции необходимо обеспечить формирование плотности гель-фракции в диапазоне 45÷70%. Естественно, что для конкретных материалов эти значения могут варьировать. Очевидно, что необходимая однородность распределения плотности гель-фракции должна быть не хуже 30-45%. Поскольку гель-фракция формируется за счет радиационной обработки полиэтилена изоляции электронным пучком, эти же требования должны быть и к однородности поглощенной дозы как по длине и глубине материала, так и по азимуту изделия.

4.1 оценка азимутальной однородности дозы облучения для систем 2х- и 4х-стороннего облучения кабельной продукции

Сравнительную оценку эффективности двух- и четырехстороннего облучения можно провести, рассматривая суммарное поглощение энергии по глубине в плоскости поперечного сечения изоляции кабеля при облучении широким пучком с двух противоположных точек относительно оси кабеля для двухстороннего, и с четырех точек, сдвинутых под углом 90 градусов относительно оси кабеля для четырехстороннего. Такой расчет распределения поглощенной дозы был проведен в программном пакете MathCAD 15 при следующих условиях и допущениях:

– моделировалось радиационное облучение кабеля марки ВППО-10-271-70к с типовыми параметрами: сечение жилы – 10 мм², внешний диаметр изоляции – 7,2мм, толщина изоляции – 1,55мм, плотность изоляции – 0,855 г/см³. Для удобства

расчёта и наглядности анализа результаты приведены в координатах, выраженных в поверхностной плотности;

– при расчетах использовались формулы для широкого пучка, т.к. в месте облучения кабеля пятно пучка имеет диаметр $5 \div 7$ см, превышающий характерные размеры облучаемых изделий;

– траектории электронов в пучке электронов считались параллельными, в отличие от реального распределения траекторий по углу, приведённого на Рисунке 4.13. Не учитывалось отражение пучка при наклонном падении на поверхность изоляции (Рисунок 4.1), поскольку эффект от такого отражения становится заметным при углах, превышающих 70° , при этом при определении степени однородности дозы из анализа исключались участки с падением пучка под углом более 75° ;



– для моделей двустороннего и четырехстороннего облучения расчеты проводились для четырехкратных облучений материала, при этом считалось, что

кабель разворачивается на 180° , то есть проскальзывания кабеля по азимутальной оси не происходит (эффект «твиста»).

– упомянутое выше отражение излучения от медной жилы [5,21] не учитывалось, поскольку его влияние ограничено зоной контакта жила-изоляция и не влияет на общий параметр неоднородности;

При таких ограничениях произведенные оценки имеют достаточно строгий характер и позволяют количественно сравнить оба метода облучения.

Для расчета использовался алгоритм, предложенный Т. Табата и Р. Ито в [40] и адаптированный для Mathcad А. И. Корчагиным и М. Г. Голковским [41]. Распределение поглощения энергии электронов по глубине проникновения их в полиэтилене при энергии электронов 1, 1,2 и 1,4 МэВ и перпендикулярном падении пучка на поверхность представлено на Рисунке 4.2. Глубина проникновения выражена в единицах массовой толщины $г/см^2$. Удобство этой единицы измерения обусловлено свойствами поглощения электронного пучка в материале, а именно тем, что потери энергии электрона на единицу длины пробега, и вся глубина

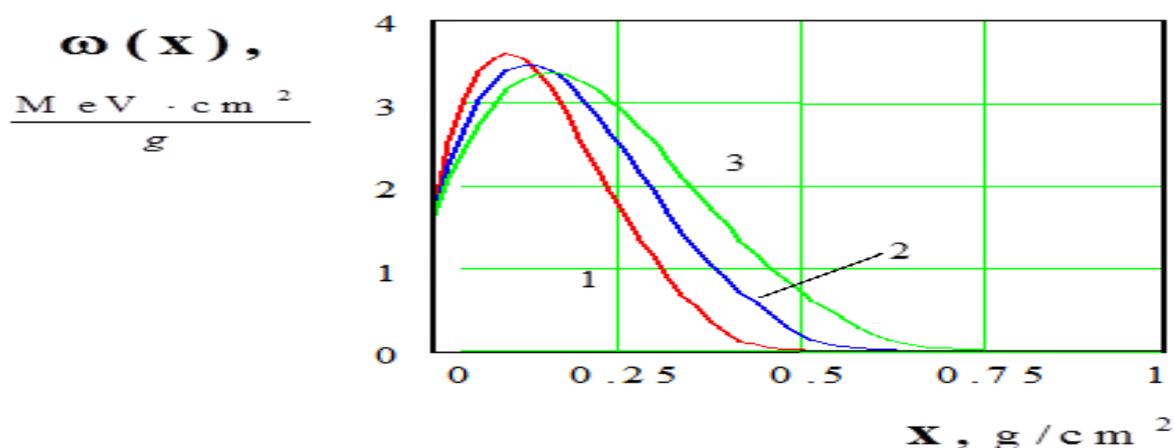


Рисунок 4.2. Распределение удельных потерь энергии электронов $\omega(x)$ в материале при различных начальных энергиях электронов: 1 - 1 МэВ, 2 - 1,2 МэВ, 3 - 1,4 МэВ.

проникновения пучка в материал, в первом приближении, обратно пропорциональна плотности обрабатываемого материала. То есть, для одной и той же исходной энергии электронов в пучке удельные потери энергии, выраженные в

МэВ·см²/г, будут представлены приблизительно одной и той же кривой для различных материалов.

Моделирование проводилось для диапазона энергий 0,5÷2,0 МэВ. Графики, демонстрирующие характер распределения дозы облучения для энергии электронов E=1,3МэВ приведены на Рисунках 4.3. и 4.4.

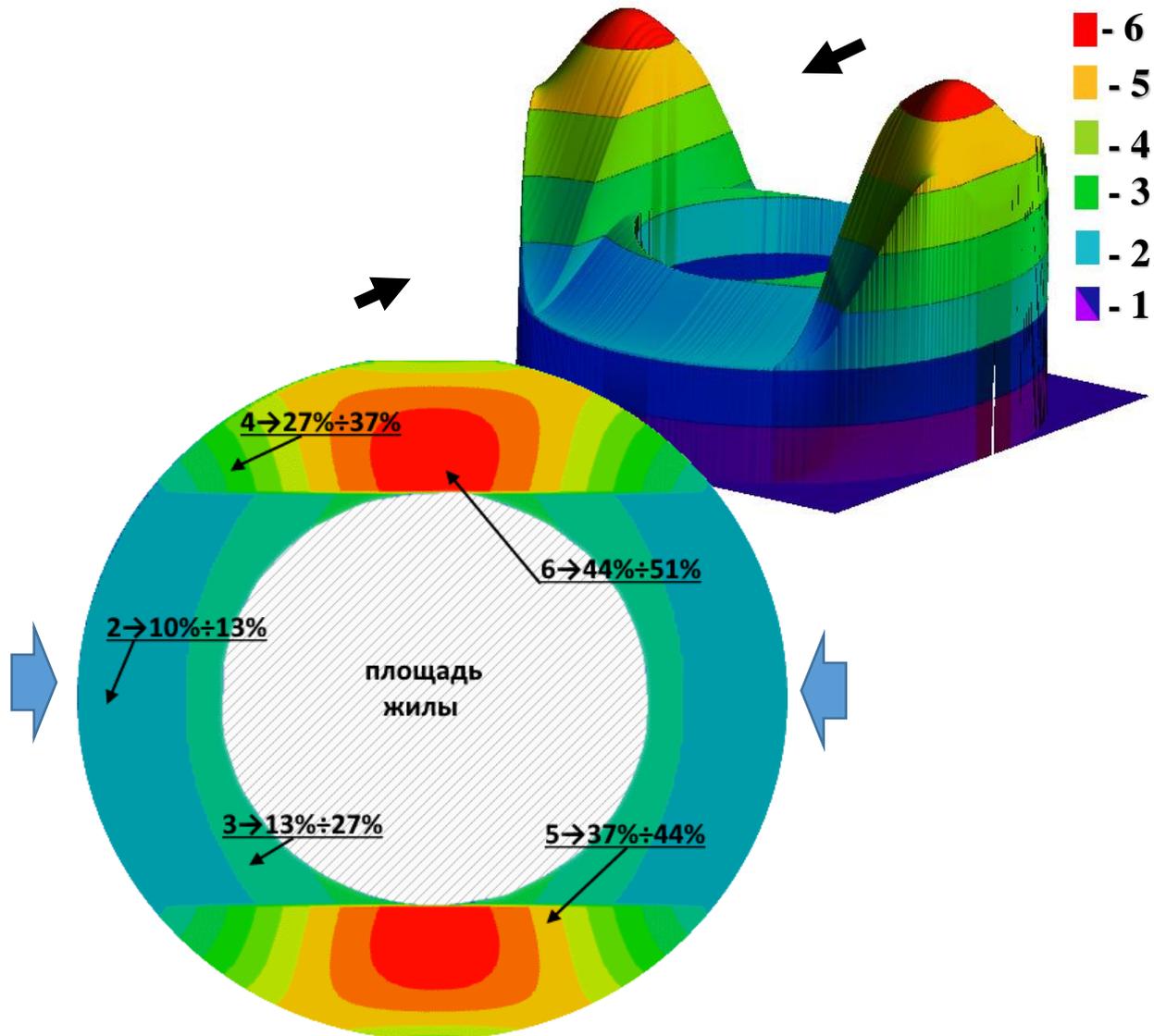


Рисунок 4.3. Расчеты распределения поглощенной дозы при двустороннем облучении на энергии E=1,3МэВ в поперечном сечении кабеля марки ВППО-10-271-70к (стрелками показаны направления движения пучка электронов). Зоны с неравномерностью дозы облучения:

1→<10%; 2→10%÷13%; 3→13%÷27%;
4→27%÷37%; 5→37%÷44%; 6→44%÷51%.

Результаты сравнения неоднородности для обеих систем облучения обобщены на сводном графике (Рисунок 4.5). Из представленных данных можно сделать следующие выводы:

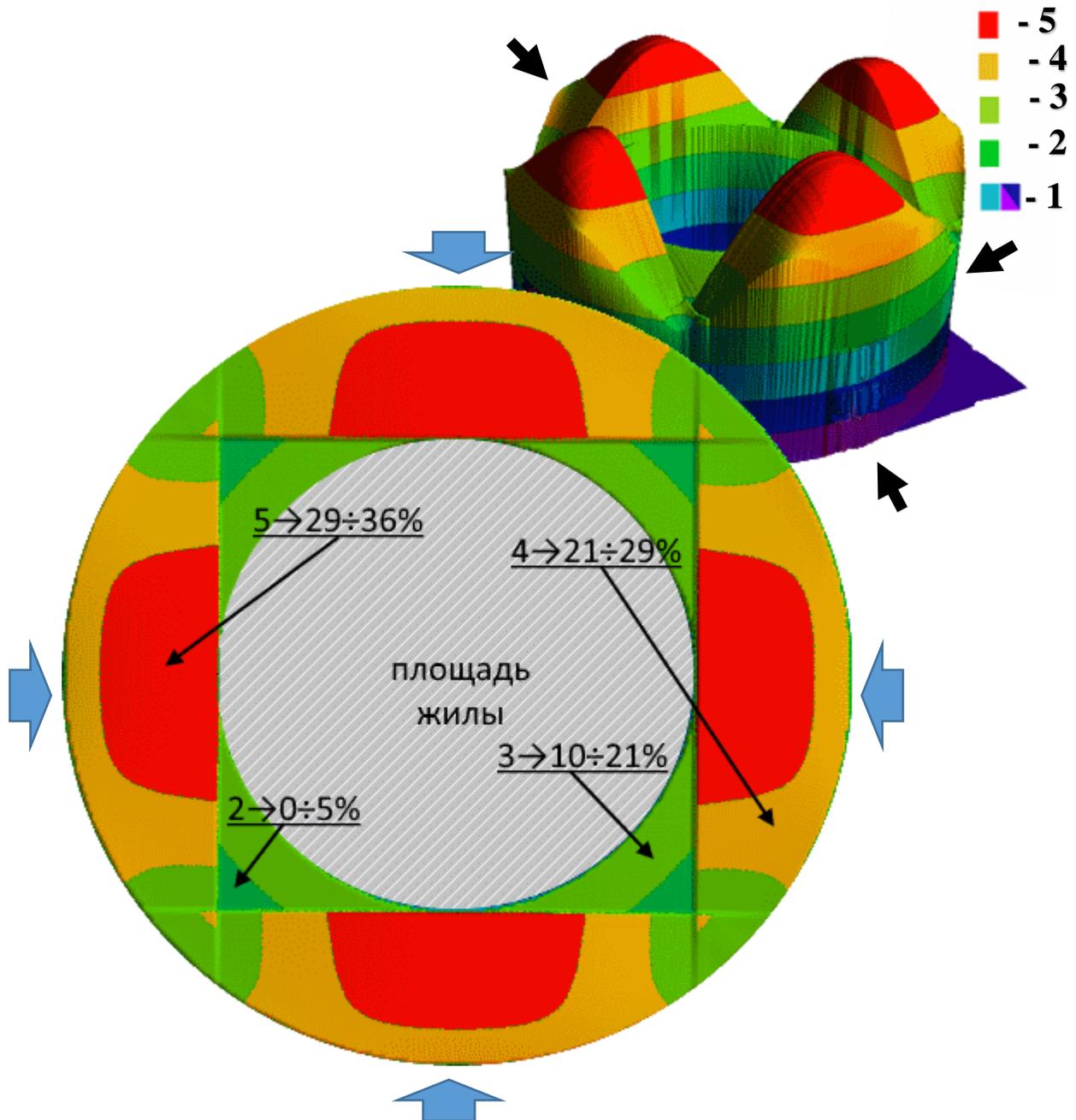


Рис.4.4. Расчеты распределения поглощенной дозы при четырехстороннем облучении на энергии $E=1,3\text{МэВ}$ в поперечном сечении кабеля марки ВППО-10-271-70к (стрелками показаны направления движения пучка электронов). Зоны с неравномерностью дозы облучения:

1 → 0%; 2 → 0 ÷ 5%; 3 → 10 ÷ 21%; 4 → 21 ÷ 29%; 5 → 29 ÷ 36%.

– Использование четырехстороннего облучения повышает в $1,5\div 1,8$ раз однородность дозы облучения по сечению изоляции, соответствуя требованиям по однородности облучения для данного типа кабелей;

– Необходимая минимальная энергия обработки по уровню неравномерности дозы равной 55% (значение, при моделировании достигаемое при 2х-стороннем облучении) при 4х-стороннем облучении на 25% ниже. Такие же оценки были получены для изоляции кабелей из полиэтилена 271- 70к (КПсПпБП(к)-120 и других.

Следует отметить, что необходимая доза облучения определяется не только плотностью и составом используемого материала, но и использованием различных

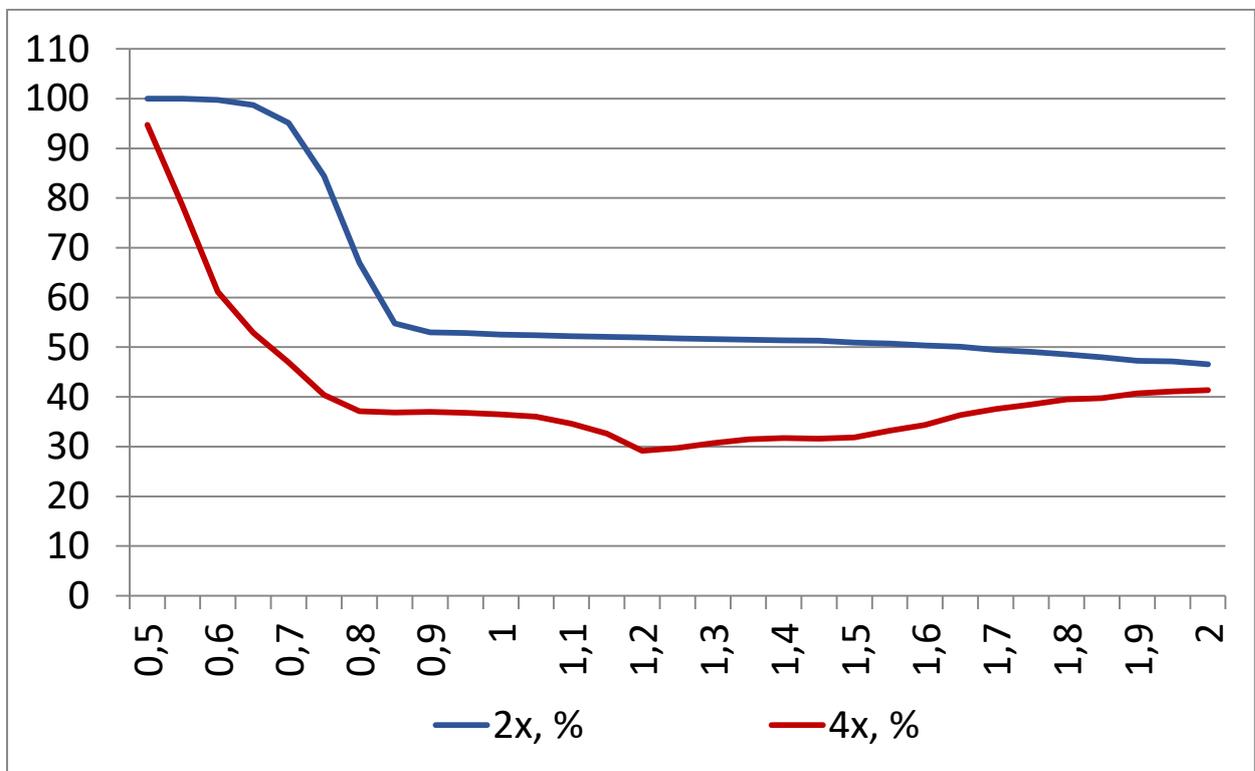


Рисунок 4.5. Зависимость неравномерности поглощенной дозы облучения (в процентах, ось y) от энергии (в МэВ, ось x) для двустороннего (показан синим цветом – 2х) и четырехстороннего облучения (показан красным цветом – 4х).

дополнительных присадок к материалу изоляции (так для кабелей КПсПБП-130 на основе "Borealis" HE3366 доза облучения в 2 раза выше чем у приведенных выше изделий), тем не менее, приведенные расчеты справедливы и для них [16].

4.2 Описание работы системы четырехстороннего облучения

Схема устройства для вывода в атмосферу двух взаимно перпендикулярных скрещенных пучков, показанная на рис. 4.6, широко освещалась на научных конференциях [22,42,48]. Выходящий из ускорителя электронный пучок сканируется в плоскости выпускного окна электромагнитами развертки **1**. Далее он попадает в постоянное поле поворотных электромагнитов **4** и **5**. Это поле изменяет траектории электронов так, что, независимо от угла отклонения в развертке, все электроны, проходящие через левый магнит, имеют угол с вертикальной осью - $45^\circ \pm 5^\circ$, а через правый, соответственно, $45^\circ \pm 5^\circ$. Конфигурация магнитного поля определяется формой полюсов электромагнита. Задача определения формы полюсов для заданных траекторий пучка была решена Бублей А.В. (ИЯФ)

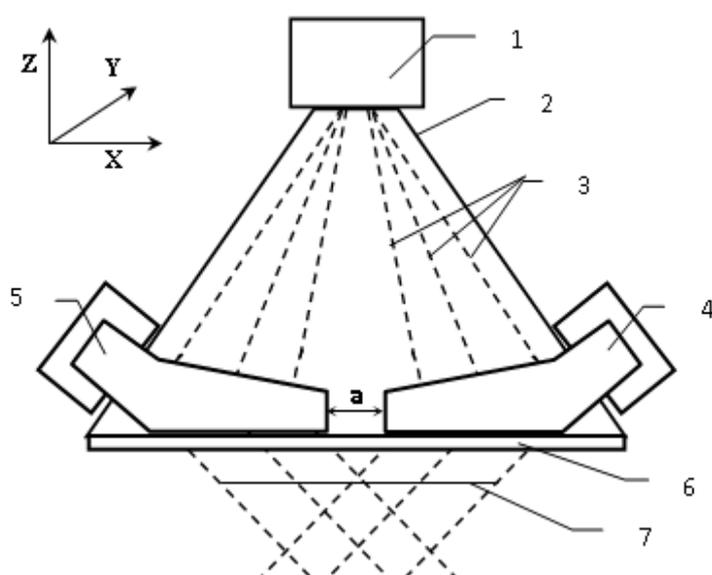


Рисунок. 4.6. Схематический вид устройства четырехстороннего облучения: **1** – магниты сканирования с переключающим магнитом, **2** – выпускное устройство, **3** – траектории электронов, **4** и **5** – правый и левый поворотные магниты, **6** – выпускное окно, **7** – зона облучения, «**а**» – область дефокусирующего магнитного поля.

методами компьютерного моделирования с использованием программы «MERMAID».

Поскольку невозможно сформировать магнитное поле, мгновенно меняющее направление, между поворотными магнитами **4** и **5** существует область, где конфигурация магнитного поля отлична от необходимой. В этой области, обозначенной «**а**», на рис.4.6, угол выхода электронов будет отличаться от 45° . На рис. 4.7 схематически показана

конфигурация поля поворотных магнитов (**В**) в нижней части раструба. Поле поворотных магнитов в этом месте имеет структуру квадруполья и, если поворот

частиц в плоскости высота-длина раструба соответствует фокусировке, то движение в плоскости высота-ширина раструба является дефокусирующим. На пучок электронов действует сила Лоренца, порождаемая тремя компонентами магнитного поля – B_y и B_z разворачивают пучок в плоскостях xz и xy , направляя электроны к центру раструба относительно оси x , B_x создает силу, направляющие пучок на стенки выпускного устройства (см график токооседания на Рисунке 4.7).

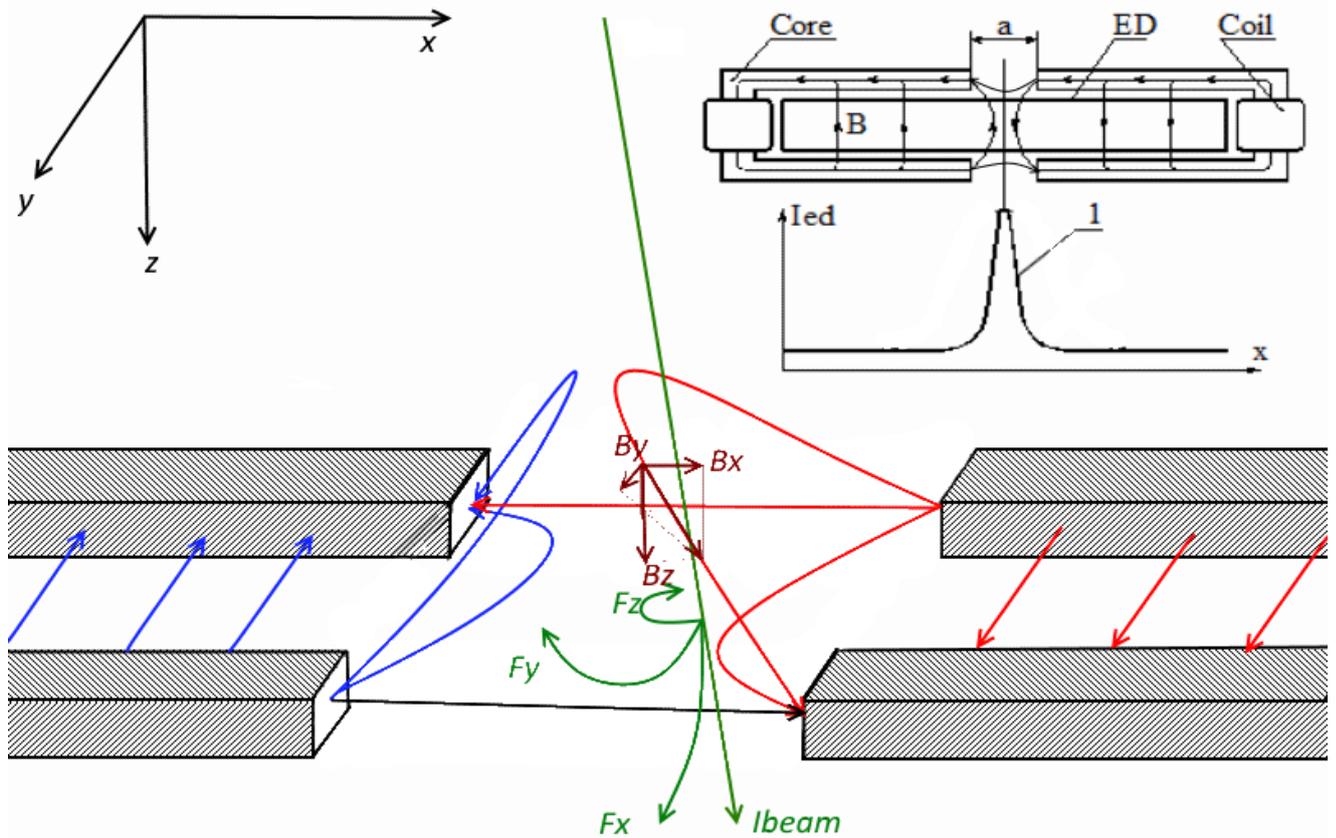


Рисунок 4.7 Магнитные поля (синие и красные силовые линии от разных магнитопроводов) и силы, действующие на пучок электронов в зоне «а» выпускного устройства. Зеленым цветом отмечен проходящий пучок и компоненты силы, воздействующей на него. 1 – график токооседания пучка (I_{ed}) на стенки выпускного устройства, где: *Core* – магнитопроводы поворотных магнитов; а – область дефокусирующего поля; *ED* – стенки выпускного устройства; *Coil* – обмотки поворотных магнитов.

Таким образом, в зоне «*a*» сжатый пучок попадает на стенки раструба [42], что является недопустимым, принимая во внимание чрезмерный нагрев выпускного устройства, ведущий к прожиганию раструба и потере вакуума. Поэтому пучок должен проходить указанную область максимально быстро.

Для этой цели, наряду с поворотными магнитами, устанавливается дополнительный переключающий электромагнит, позволяющий электронному пучку пересекать зону «*a*» с большей скоростью и тем самым значительно уменьшить этот эффект. Ток в обмотке переключающего магнита должен иметь имеет прямоугольную форму, причем момент переключения (изменение полярности тока в обмотке) синхронизован с током сканирования в продольном направлении (НЧ развертка), как показано на Рисунке 4.8. Стандартное значение частоты переключения НЧ составляет 50Гц. График магнитного поля сформированный электромагнитами развертки H_{LF} , показанный красной линией на графике, организует сканирование электронного пучка вдоль длины выпускного окна. При достижении запрещенной зоны «*a*» блок переброса изменяет полярность питания на электромагнитах переброса, в результате чего происходит ступенеобразный изменение поля H_{shift} , за счет которого производится ускоренное прохождение зоны «*a*», после чего сканирование пучком проходит в обычном порядке. При движении пучка электронов в обратном направлении по отношению к раструбу переброс осуществляется аналогичным образом. Электромагниты находятся снаружи горловины раструба, внутри которого расположен ускоренный пучок электронов, поэтому существует задержка импульса Δt магнитного поля при проникновении через металл. Калибровкой времени включения импульса переброса (зеленая линия на Рисунке 4.8 слева) t_d регулируется переключение тока переброса относительно реального раструба.

Оптимизацией формы и размеров полюсов электромагнита, сканирующего в продольном направлении, сведена к минимуму и неравномерность ширины растра вдоль выпускного окна. Поэтому предельная величина выводимого тока осталась такой же, как и в обычном выпускном устройстве и составляет 70–100 мА на метр длины титановой фольги шириной 75 мм и толщиной $\sim 40\div 50$ микрон. Очевидно,

что за счет использования поворотных магнитов длина раstra в выпускном окне уменьшится – при использовании 4х-сторонней системы она составляет $\sim 60\div 65$ см на расстоянии 18-20 см от выпускного окна по оси z (уровень расположения облучаемого кабеля).

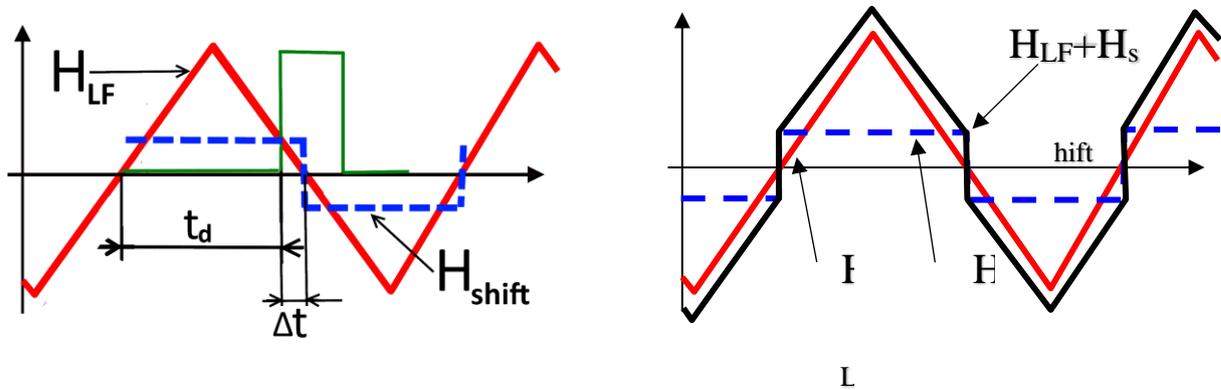


Рисунок 4.8. Формирование магнитного поля, управляющего движением пучка электронов вдоль длины выпускного окна, вызванного суперпозицией полей от сканирующего (H_{LF}) и переключающего (H_{shift}) электромагнитов (слева) и суммарное ($H_{LF} + H_{shift}$) (справа), где Δt – задержка, связанная проникновением поля через стенки растроба, t_d – задаваемое время старта системы переброса относительно НЧ развертки.

4.3 Настройка и установка устройства

Настройка системы четырехстороннего облучения проводится на рабочем ускорителе после проведения всех необходимых калибровок и центрирования пучка по размерам окна выпускного устройства при работе ускорителя без использования системы четырехстороннего облучения. При выполнении этих требований проводится проверка работоспособности компонентов системы, при этом:

- Электромагниты переброса, расположенные на сердечнике высокочастотной развертки, подключаются так, чтобы магнитное поле от катушек было встречным.

– С помощью наладочной программы ETN включаются системы сканирования НЧ развертки и 4х-сторонней системы облучения, и проверяется правильность включения полярности перекидывающих магнитов по осциллограмме тока НЧ развертки (Рисунок 4.9в), которая должна иметь форму, указанную на Рисунок 4.9а. Если ток НЧ развертки имеет вид как показано на Рисунке 4.9б, необходимо поменять полярность перекидывающих магнитов.

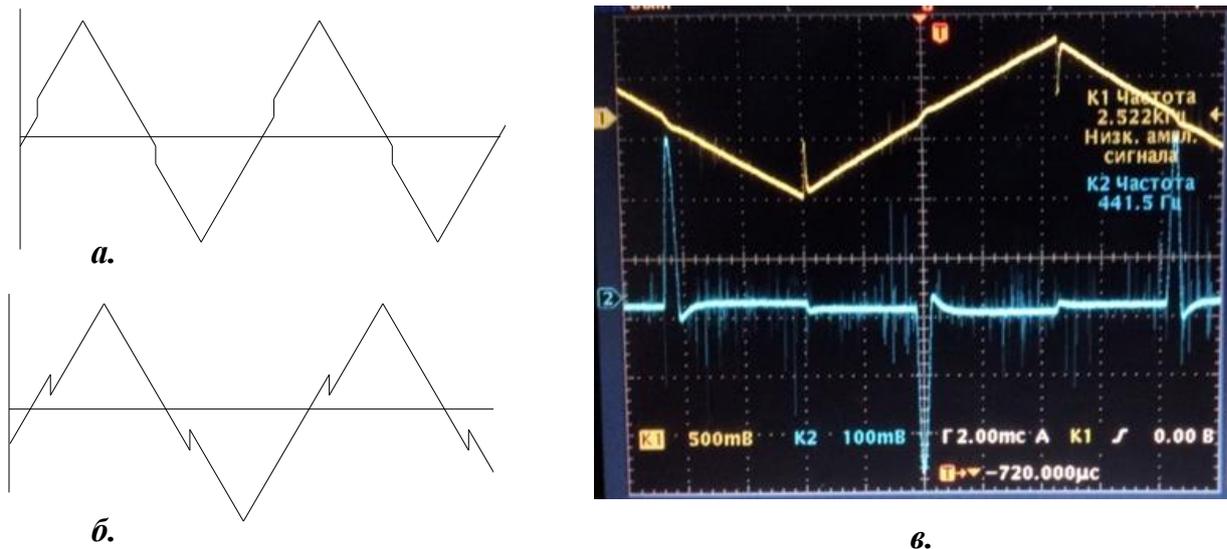


Рисунок 4.9. Форма тока НЧ развертки с перебросом: *а* – правильное подключение катушек переброса, *б* – форма тока НЧ развертка с неправильно подключённой полярностью электромагнитов, *в* – контроль формы тока с помощью осциллографа.

– Поворотные магниты должны быть установлены на фланце выпускного устройства симметрично относительно фланца.

– Проверка правильности подключения поворотных магнитов и оценка работы блока управления перебросом пучка (BSU) проводится на работающем ускорителе с помощью осциллографа. При работе ускорителя на режиме с энергией $E=1-1.8$ МэВ и током пучка $I_{пуч} \leq 1$ мА не должно происходить высыпания пучка на краях по длине раструба, в противном случае следует поменять полярность подключения поворотных магнитов.

– Осциллограммы тока и напряжения переброса снимаемые с соответствующих клемм на лицевой панели должны соответствовать показанным на рис. 4.10. Такая форма сигналов обусловлена режимом работы блока переброса, функциональная схема которого изображена на Рисунке 4.10 (внизу) [63].

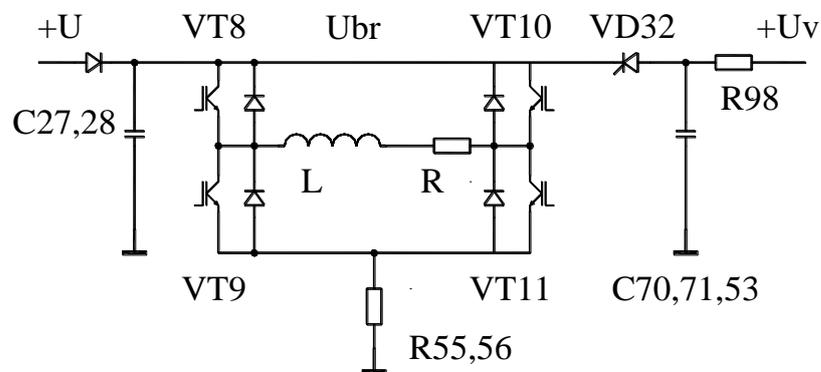
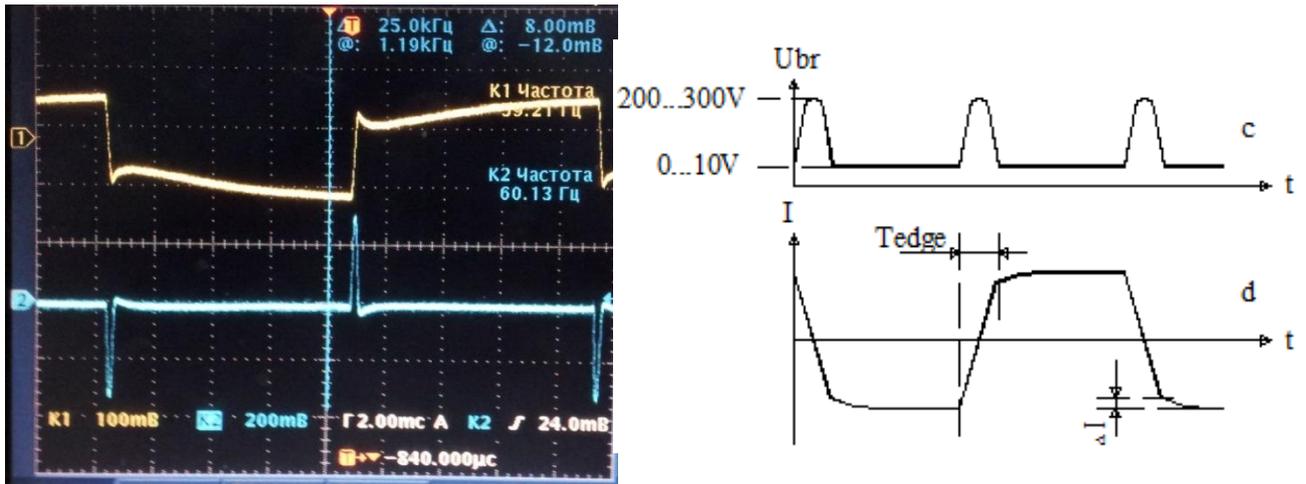


Рисунок 4.10. Слева – осциллограммы тока I (желтый луч) и напряжения U_{br} (голубой луч) при работе блока управления перебросом, справа – эюры, объясняющие работу блока BSU, функциональная схема работы блока.

Обмотка переключающего электромагнита с индуктивностью L и активным сопротивлением R включена в диагональ транзисторного моста $VT8...VT11$, выполненного на IGBT транзисторах с встроенными обратными диодами. Управляющие сигналы синхронизации НЧ для переключения транзисторов моста поступают в блок переброса пучка (BSU) из блока генераторов (GU). К моменту переключения в индуктивности L обмотки магнита переброса установится постоянный ток, определяемый энергией пучка. Непосредственно после переключения ток, накопленный в индуктивности, начинает заряжать конденсаторы $C27, C28$ через обратные диоды. Амплитуда выброса напряжения U_{br} на катушках электромагнитов переброса определяется величиной емкости этих конденсаторов. Чем больше амплитуда этого выброса, тем короче время фронта

T_{edge} переброса пучка. Если бы в цепи электромагнита переброса отсутствовали потери энергии, то после смены полярности тока его абсолютная величина сохранялась бы. Потери энергии приводят к тому, что непосредственно после окончания фронта абсолютная величина тока будет меньше на величину ΔI (эпюры на Рисунке 4.11). Далее ток будет экспоненциально расти до установившегося значения с постоянной времени, определяемой отношением L/R , где L – индуктивность катушек переброса, а R – суммарное сопротивление катушек и подводящих проводов.



Рисунок 4.11. Линейный (а) и угловой(б) датчики. Для углового датчика: 1 – экранирующая пластина, 2 – щель 10 мм, 3 – цилиндрические алюминиевые стержни (1, 2, ... 17).

– Дальнейшая настройка работы системы проводится с помощью линейного и углового датчиков (Рисунок 4.11). Линейный датчик состоит из 30—33 цилиндрических алюминиевых пробников равномерно расположенных на всем протяжении выпускного устройства с шагом 50 мм. Каждый пробник соединен через высокоточное сопротивление номиналом 15 ком с «землей». Аналогично линейному устроен угловой датчик (Рисунок 4.11б), измеряющий угол отклонения пучка поворачивающимися магнитами. Электроны, прошедшие щель 2 в экранирующей заземленной пластине 1, попадают на цилиндрические пробники,

расположенные по окружности через каждые 7.5° . Попадая на цилиндрические пробники 3, также заземленные через резисторы номиналом 15 ком. Напряжение, формирующееся на пробниках, прямо пропорционально току пучка электронов, попавшему на пробник. Таким образом, по измеренному распределению напряжения можно определить линейное (вдоль длины выпускного окна) и угловое распределения тока пучка.

– Для определения зоны переброса и настройки тока и фазы включения перекидывающих магнитов датчик устанавливается на расстояние $H=40-70\text{мм}$ от нижнего края выпускного устройства (рис. 4.12). При таком расположении зона переброса должна составлять 400мм и должна быть расположена симметрично оси раструба ускорителя (на приведенном рисунке – относительно датчика №17). Блок

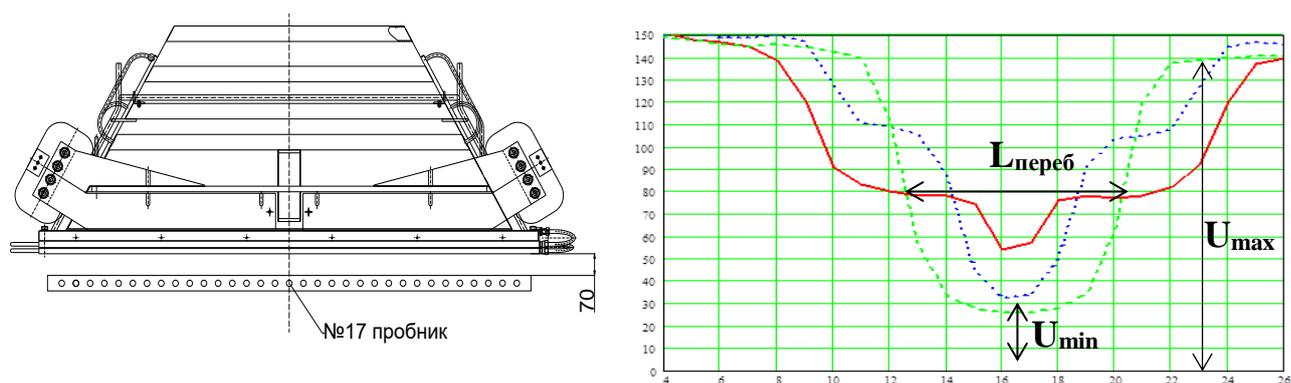


Рисунок 4.12. Расположение линейного датчика для измерения линейного распределения и графики измерения напряжения на пробниках в зависимости от задержки и величины тока (по горизонтальной оси расположены номера пробников, по вертикальной – падение напряжения на пробнике). Правильно настроенные фаза и ток магнитов переброса представлены на зеленом графике.

питания поворотных магнитов убирается из стойки управления и устанавливаются переключки сигналов готовности этого блока. Измерения проводятся при работе ускорителя на энергии $E=1-1.8\text{МэВ}$ и токе пучка $I_n=1\text{мА}$. По результатам измерений строятся графики падения напряжения на пробниках. Изменяя величины фазового сдвига тока перекидывающего магнита относительно тока НЧ развертки с помощью потенциометра «ΔТ» на передней панели блока переброса, и

величину тока перекидывающих магнитов необходимо добиться формы графика, соответствующего зеленому, показанному на Рисунке 4.13 (справа). При этом ширина зоны переброса $L_{\text{переб}}$ должна составлять **400мм** по уровню напряжения равному $(U_{\text{max}}-U_{\text{min}})/2$. Появляющиеся на графике распределения промежуточные горизонтальные участки (красный и синий графики рис. 4.13) показывают несогласованную синхронизацию переброса с НЧ разверткой. Это может быть настроено изменением величины задержки (регулируется в диапазоне **3–10мс**) переключения тока переброса относительно НЧ развертки.

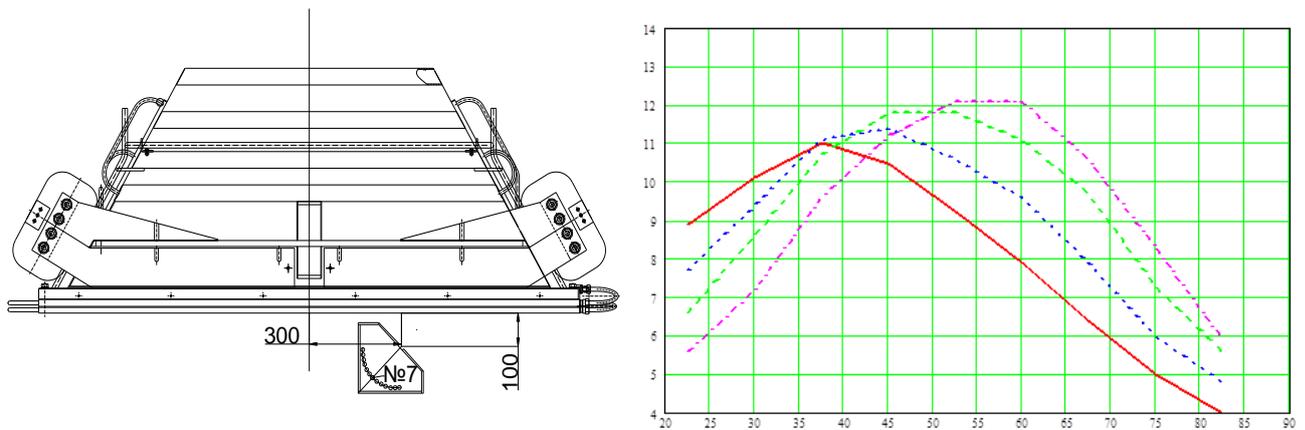


Рисунок 4.13. Расположение углового датчика при определении тока поворотного магнита и графики зависимости угла отклонения пучка от тока в поворотном магните

– Следующим этапом настраивается ток поворачивающих магнитов для установки среднего азимутального угла выхода пучка $\pm 45^\circ$ относительно вертикали. Для этого блок питания магнитов устанавливается в стойку управления, а под выпускным окном ускорителя устанавливается угловой датчик на высоте $H=100-130$ мм от нижнего края выпускного устройства до щели (Рисунок 4.13). Измерение угла осуществляется в четырех точках ± 150 мм, ± 300 мм от оси раструба. В вышеуказанном режиме работы ускорителя измеряется напряжение при помощи вольтметра. Выходной угол соответствует максимуму распределения, определяемому графически по максимальному падению напряжения на пробниках. Изменяя ток поворотных магнитов необходимо добиться максимума падения напряжения при величине угла 45° (при правильном положении датчика этот угол

соответствует пробнику №7). Для контроля правильности работы системы поворотных магнитов эта процедура проводится для остальных указанных положений.

–При работе ускорителей ЭЛВ с помощью осциллографа проводится постоянный мониторинг положения пучка относительно выпускного окна, описанный в [13]. При этом для наглядности процесса токооседания на стенки раструба движение пучка в противоположных направлениях по ширине выпускного окна разведено относительно оси y осцилограммы. В случае

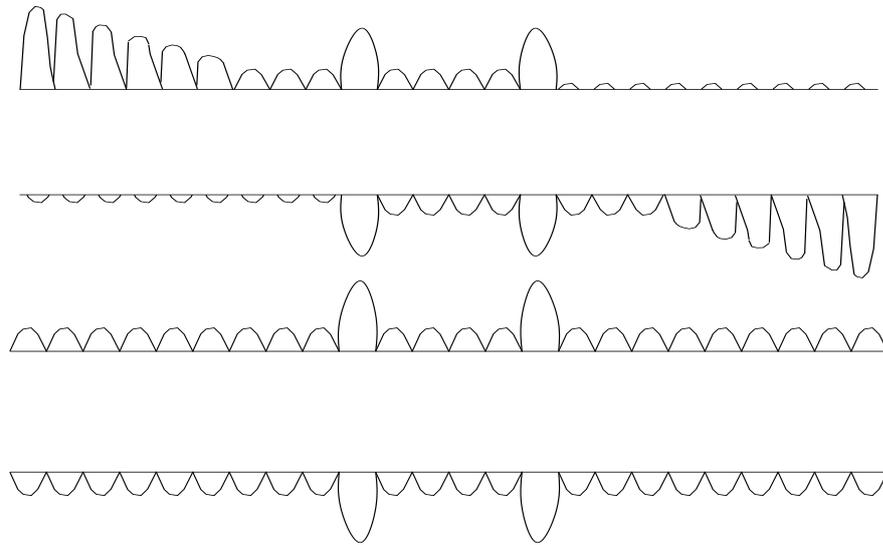


Рисунок 4.14. Осциллограмма тока с раструба при смещенном перекидывающем магните (вверху) и при нормально настроенной системе четырехстороннего облучения.

использования системы четырехстороннего облучения осциллограмма тока раструба должна быть симметрична относительно раструба (иметь вид, схематично показанный на рис. 4.14). Необходимо добиться правильного положения пучка, смещая регулировочными винтами положение перекидывающих магнитов относительно горловины раструба. В конечном итоге добиваются, чтобы оси сканирования совпадали с осями выпускного устройства, а размер растра в пределах рабочей зоны оставался постоянным.

– Зона облучения определяется по методике, описанной для настойки системы переброса пучка с помощью линейного датчика (Рисунки 4.11 и 4.12), но уже при работающей системе поворотных магнитов. Датчик устанавливается на

высоте облучаемого объекта. При анализе измеряемых данных следует обратить внимание, что суммарная плотность тока получается сложением полей облучения электронов с углами $+45$ и -45 градусов. Поэтому форма распределения линейной плотности тока будет зависеть от расстояния до выпускного устройства, в зависимости от того, насколько перекрываются правое и левое поля облучения (Рисунок 4.15). Изменением тока сканирующих вдоль раструба магнитов устанавливается требуемый размер зоны облучения. Из практического опыта при правильно настроенной низкочастотной развертке в режиме двухстороннего облучения, в режиме четырехстороннего эта зона составляет $600\div 650$ мм и такой длины хватает для обработки типовой номенклатуры кабельных изделий.

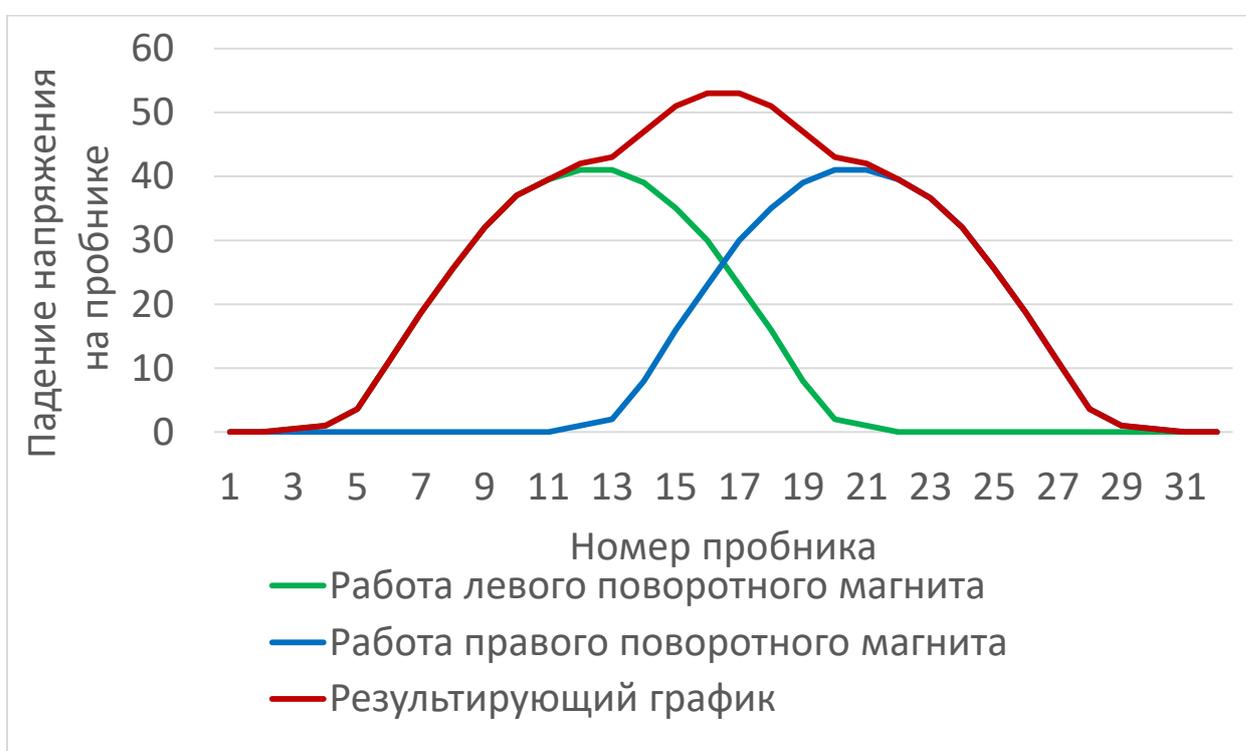


Рисунок 4.15. График зависимости падения напряжения на пробнике от номера пробника, при определении зоны облучения.

– После описанной настройки 4х-сторонней системы на ускорителе, необходимо убедиться в том, что при увеличении тока пучка до максимальных значений температура стенок выпускного устройства (раструба) не превышает $40\div 50^{\circ}\text{C}$. Для этого плавно увеличивают ток пучка, следя за высыпанием пучка на

стенки раструба, контролируемым по форме осциллограммы, описанной выше, и периодически проверяя нагрев стенок раструба.

Указанные настройки достаточно проделать на одной энергии электронов в рабочем диапазоне энергий ускорителя. Управляющая программа автоматически (без участия оператора) будет устанавливать требуемые значения токов в обмотках при изменении режима работы ускорителя. Она же в процессе работы следит, чтобы эти параметры находились в допустимых пределах.

Описанные процедуры являются достаточно простыми и позволяют легко контролировать правильность настройки устройства в процессе эксплуатации.

4.4 Практика применения, результаты использования, опыт эксплуатации

Эффективность применения системы четырехстороннего облучения проверялась в условиях реального производства ОАО «НП «Подольсккабель» на ускорителях ЭЛВ-4 с максимальной энергией 1,5МэВ и ЭЛВ-8 с максимальной энергией 2,0МэВ. Содержание гель-фракции, определялось в соответствии с ГОСТ 25018-81 "Кабели, провода и шнуры. Методы определения механических показателей изоляции и оболочки". Были проведены специальные тесты для измерения азимутальной неоднородности поглощенной дозы при четырехстороннем облучении в сравнении с двухсторонним [42].

Для этого исследуемые образцы изоляции разрезались поперечно сечению провода на четыре образца (сектора), и для каждого сектора измерялось содержание гель-фракции (Таблица 4.1). Из приведенных данных видно, что азимутальная неоднородность при четырехстороннем облучении заметно ниже, чем при двухстороннем, т.е. поглощенная доза распределяется равномернее, и азимутальная неоднородность не превышает $\pm 5\%$.

Отмечено также увеличение производительности обработки. В зависимости от типа облучаемых изделий эта величина варьируется в пределах от 20% до 2 раз, то есть при фиксированном токе пучка может быть увеличена скорость обработки,

либо уменьшен ток пучка (мощность ускорителя), если скорость обработки достигла максимального значения, но даже при малых диаметрах оно дает выигрыш в производительности.

Таблица 4.1. Сравнительные данные по содержанию гель-фракции в изоляции кабельных изделий после двухстороннего и четырехстороннего облучения						
Материал изоляции / Сечение токопроводящей жилы кабельного изделия, мм ²	Содержание гель-фракции по секторам, %					Среднее значение содержания гель- фракции, %
	Норма и допуск	1-й сектор	2-й сектор	3-й сектор	4-й сектор	
двухстороннее облучение						
Полиэтилен ПЭ 271-70К / 16	30–70	54,8	7,1	56,6	75,0	48,3
То же		55,5	22,4	59,1	68,6	51,4
То же		66,5	73,3	57,5	54,0	62,8
То же		49,9	70,6	69,8	54,3	61,1
четырёхстороннее облучение						
Полиэтилен ПЭ 271-70К / 16	30–70	70,0	68,2	73,1	73,4	71,1
То же		73,4	65,9	68,4	73,1	70,2
То же		67,1	70,2	67,6	67,3	68,0
То же		71,7	70,5	76,2	76,4	73,7

Необходимо отметить, что основные преимущества четырехстороннего облучения особенно наглядно проявляются при облучении изделий большого диаметра, например, заготовки нефтепогружного кабеля, оболочек кабеля для атомных станций, но даже при малых диаметрах оно дает выигрыш в производительности.

Для уменьшения влияния эффекта твиста на однородность облучения, желательно, чтобы изделие обрабатывалось с двух взаимно-перпендикулярных

сторон за один проход зоны облучения. При высоких скоростях протяжки кабельных изделий (200-400 м/мин) это условие накладывает определенные требования на частоту сканирования пучка вдоль фольги выпускного окна. Эффективный размер зоны облучения в направлении движения при ширине окна 7см вследствие рассеяния пучка на фольге в диапазоне энергий 1-2.5 МэВ составляет 10-15см. Тогда при скорости движения кабеля 200 м/мин минимальная частота сканирования составит 33 Гц. В используемой системе развертки частота сканирования вдоль фольги выпускного окна может быть выбрана в пределах 50-90 Гц, что позволяет удовлетворить поставленному выше требованию при самых высоких скоростях движения облучаемых изделий.

В течение эксплуатации выяснилось, что использование четырехсторонней системы облучения предъявляет повышенные требования к качеству изготовления магнитопроводов для катушек системы переброста. Наличие зазоров размером 0,5–1 мм в местах стыковки магнитопроводов (Рисунок 4.17слева) приводит к значительному (более 30°) азимутальному смещению направления перебрасывающего поля относительно осей магнитопровода и усложняет настройку системы. Применение комплектов, перекрывающих зазоры (Рисунок

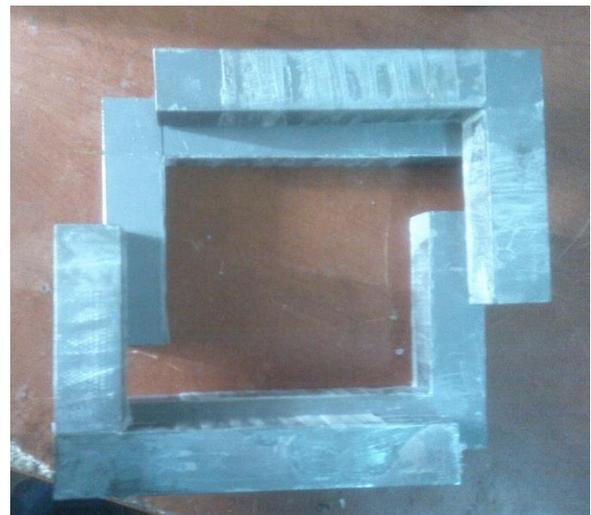
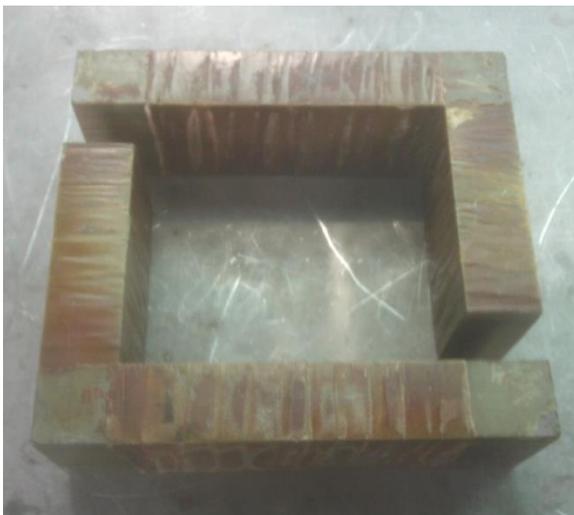


Рисунок 4.16. Магнитопроводы для магнитов переброста

4.16 справа) позволило значительно упростить и ускорить настройку и калибровку системы.

Поворотные магниты расположены в непосредственной близости от зоны облучения, где генерируется большое количество озона, тормозного излучения и появляются рассеянные или отраженные электроны. После опытной эксплуатации в конструкции поворотных магнитов были предусмотрены меры, уменьшающие воздействие указанных агрессивных факторов, как-то: замоноличенные обмотки, использование элементов из нержавеющей стали, покраска полюсов, выполненных из магнитомягкого материала, экранирование всего устройства от отраженных и рассеянных электронов. Дополнительно в клеммные коробки, коробку со сканирующими электромагнитами, кабельные подводы подается свежий воздух.

По сравнению с радиационно-технологическими установками, использующими другие способы многостороннего облучения, например, выполненная на основе двух ускорителей, расположенных под углом в 90° и описанная в [22], разработанные системы четырёхстороннего облучения обладают следующими преимуществами:

- По габаритным размерам устройство для четырёхстороннего облучения незначительно отличается от стандартного выпускного устройства с линейной развёрткой и может легко устанавливаться вместо него. При выключении поворотных и переключающего магнитов система начинает работать в режиме обычной линейной развертки. Этим обеспечивается универсальность устройства, а конкретно – возможность обработки более широкого ассортимента изделий. Как пример, можно привести использование сменных наборов подпучкового оборудования, позволяющих на одной облучательной установке производить радиационную обработку кабельной продукции, полиэтиленовых лент. Кроме того, возможен режим компенсации выходных углов электронного пучка.
- Эффективный размер зоны облучения в направлении движения при ширине окна 7см вследствие рассеяния пучка на фольге в диапазоне энергий 1-2.5 МэВ составляет 10-15см. Тогда при скорости движения кабеля 200 м/мин минимальная частота сканирования составит 33 Гц. В используемой

системе развертки частота сканирования вдоль фольги выпускного окна выбрана в пределах 50(100) Гц, что позволяет удовлетворить поставленному выше требованию при самых высоких скоростях движения облучаемых изделий.

- Количество выделяемого озона, образующегося при взаимодействии электронного пучка с воздухом, пропорционально длине пробега электронов в воздухе. Благодаря простоте конструкции раскладка кабельного изделия может быть помещена очень близко к выпускной фольге, что уменьшает длину пробега электронов в воздухе и тем самым минимизирует количество выделившегося озона.

Глава 5

Информационное измерительное сопровождение ускорителей электронов ELV и сопутствующего технологического оборудования

В ряде случаев, применяемые промышленностью приемо-подающие машины не обладают подобной универсальностью. Это ограничение приводит к необходимости перенастраивать оборудование при смене марки кабеля, или использовать несколько комплексов, предварительно настроенных на работу с различными типами облучаемых материалов. Примером последнего подхода может служить использование ОАО «НП Подольсккабель» 6-ти приемо-подающих комплексов производства ВНИИКПМАШ, которые дают возможность для облучения различных типов кабелей от 1 до 42 мм диаметром на любом из двух используемых на предприятии ускорителей ЭЛВ.

Хронометраж рабочего дня операторского персонала с фиксацией длительности типовых рабочих операций, показал, что эффективность использования имеющегося оборудования, а, следовательно, и производительность труда обусловлены рациональным использованием времени, затрачиваемого на обслуживание технологических линий.

Кроме того, для выявления возможного брака во время радиационной обработки, контроля над операцией облучения и фиксации случаев остановки ускорителя, а также, косвенно, за деятельностью персонала, необходимо регистрирование указанного процесса.

В соответствии с этими требованиями была разработана для использования совместно с вышеназванным транспортным оборудованием и внедрена информационная система по визуализации текущих параметров ускорителя и технологического процесса облучения на одном из пионеров электронно-лучевой обработки кабельной продукции в России ОАО «Подольсккабель» для решения следующих задач:

- автоматизация рабочего места и организация эффективного использования времени, затрачиваемого на обслуживание технологических линий (приемно-подающих устройств);

- визуализации процесса облучения на отдельных мониторах, отображающих тип используемого ускорителя, задействованное приемно-подающее устройство, энергию пучка электронов, величину тока пучка скорость подающей линии, а также оставшееся до конца обработки время и количество необработанного материала;

- технологический контроль производимой продукции, с фиксацией основных параметров обработки в течение всего процесса облучения партии материала с выводом на печатающее устройство либо в файл данных.

Это позволило организовать непрерывную согласованную работу шести комплектов приемно-подающих устройств и двух ускорителей ЭЛВ с привлечением всего двух операторов.

5.1 Реализация информационной системы

Конструктивно данная система представляет собой модуль сбора информации, разработанный в Лаборатории 6 ИЯФ и организованный на контроллере Silicon Laboratories C8051F350, и программу для обработки и отображения получаемой информации на мониторе и ввода данных об облучаемой партии материала.

Микроконтроллер оснащен 8-ми канальным АЦП, из которых два используются для измерения основных параметров работы ускорителя энергии и тока пучка, один – для измерения реальной скорости облучаемой продукции. Остальные каналы фиксируют состояние готовности и номер выбранных комплексов.

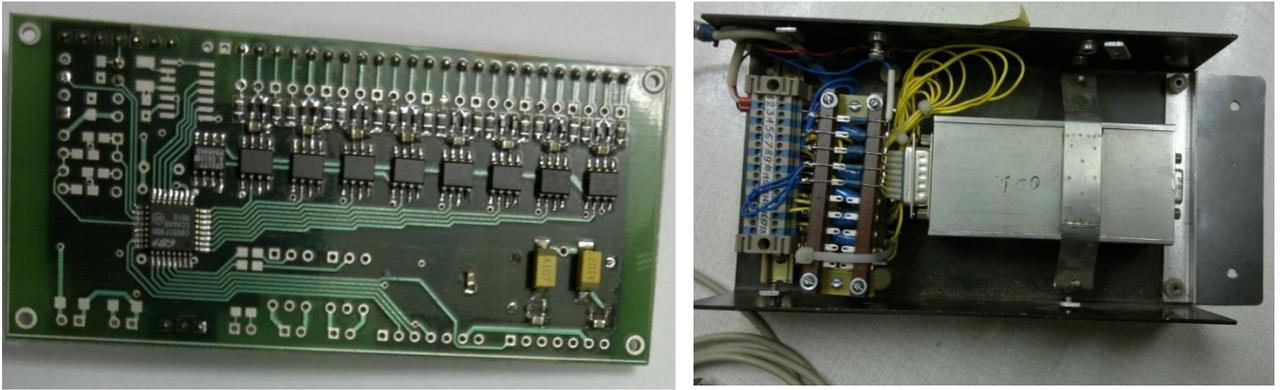


Рисунок 5.1. Плата контролера(слева) и модуль сбора информации(справа).

Микроконтроллер оснащен 8-ми канальным АЦП, из которых два используются для измерения основных параметров работы ускорителя энергии и тока пучка, один – для измерения реальной скорости облучаемой продукции. Остальные каналы фиксируют состояние готовности и номер выбранных комплексов.

Выход контроллера согласован с последовательным портом компьютера с помощью специализированной микросхемы MAX232.

Значение энергии в ускорителях ЭЛВ измеряется с помощью резистивного делителя, как показано на Рисунок 5.2 (или роторного вольтметра – для ускорителей с энергией более 2,0МэВ). Сигнал с этих цепей через масштабирующий усилитель поступает на соответствующий вход восьмиканального взвешивающего АЦП контроллера. Помимо индикации поднятие энергии до рабочего уровня служит для подачи разрешающего сигнала на пермоточное оборудование и перевод информационной системы в режим отображения технологических данных. Значение тока пучка снимается непосредственно с соответствующих измерительных цепей ускорителя, аналоговый сигнал скорости пермоточной линии, поступающий с драйверов подпучковой транспортной системы, масштабируется в стойке управления ускорителем и поступает на вход модуля сбора.

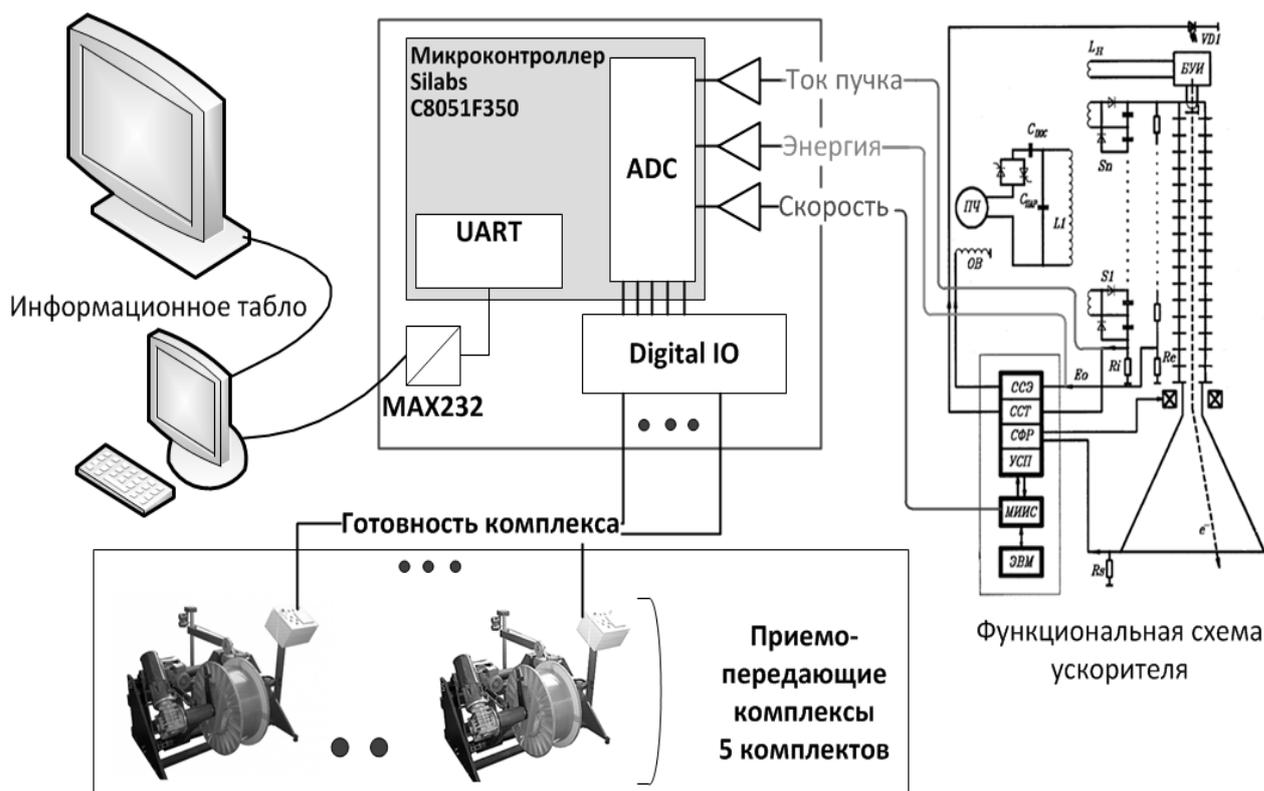


Рис. 5.2. Функциональная схема модуля.

Контроллер запрограммирован на работу в режиме «Request-Response». При получении запроса по последовательному порту модуль пересылает последние сохраненные в памяти значения измеренного напряжения по каналам.

Пересылаемые между компьютером и модулем сбора информации данные закодированы по протоколу Аскольда Волкова, разработанному и широко применяемому в нашем институте. В соответствии с этим протоколом ответ модуля может содержать переменное количество байт. Чтобы избежать нерациональной траты ресурсов компьютера и процессорного времени на реализацию ожидания и получения данных в порт компьютерная программа осуществляет асинхронные операции записи и чтения в отдельном потоке, согласно модели, приведенной на Рисунке 5.4.

Программа разработана для использования с операционными системами Windows 2000 и выше и оптимизирована для работы с многоядерными процессорными системами. После запуска у контроллера непрерывно запрашивается состояние ускорителя и технологического оборудования. В режиме

проверки готовности оператором вводятся данные на облучаемую продукцию (тип кабеля, длина, удельная скорость облучения и т.д.) и производится выбор технологических комплексов. По получению готовности от выбранного приемно-подающего комплекса и запуску ускорителя, программа переходит в режим отображения о ходе технологического процесса на печатающее устройство и большой монитор, использующийся в качестве информационного табло. Печать (и/или запись в файл) осуществляется через указанные пользователем в настройках интервалы времени. Калибровки каналов АЦП осуществляются отдельным консольным приложением, но как показала практика трех летнего использования, достаточно откалибровать точность измерения при первом включении системы.

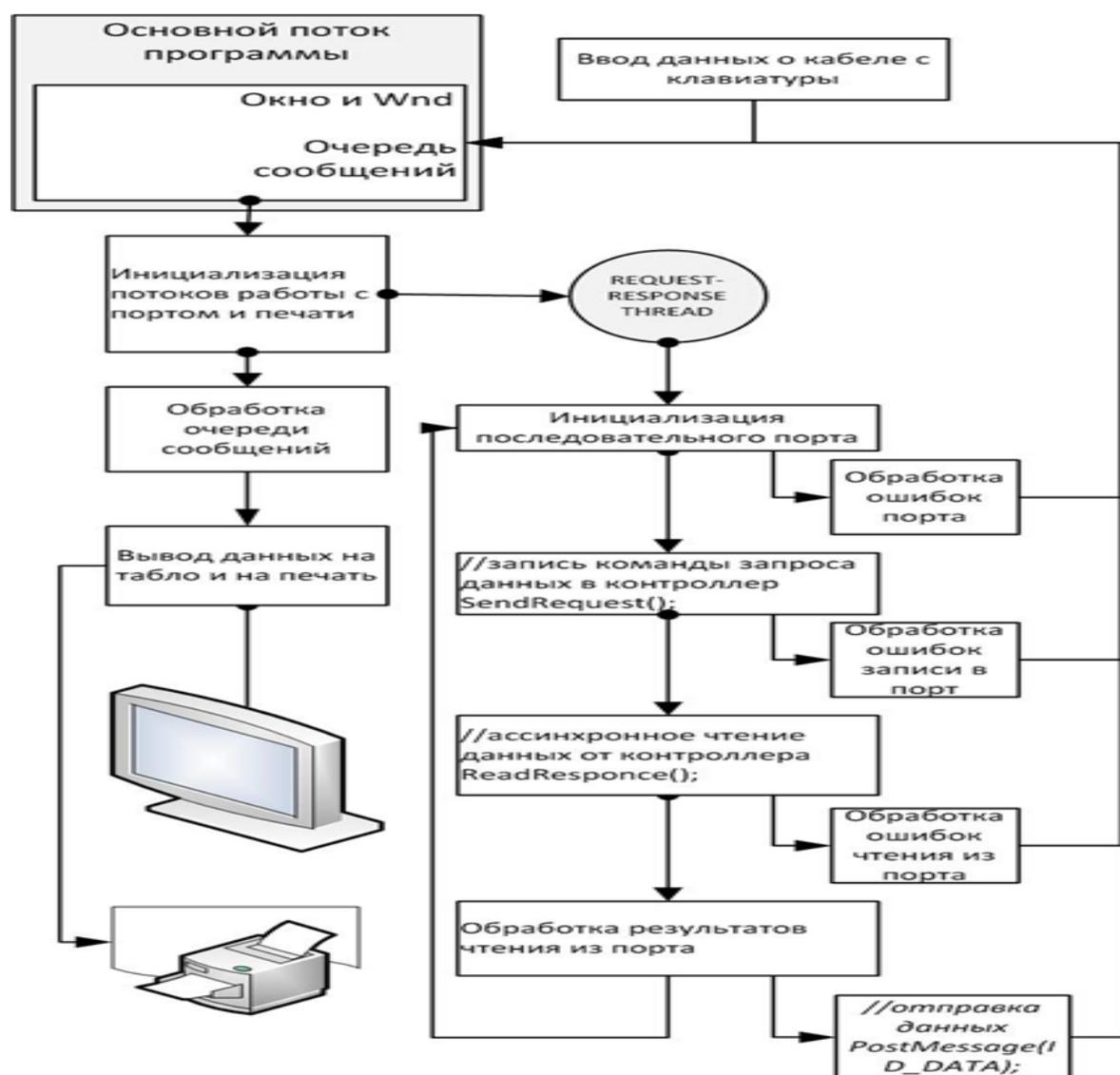


Рисунок 5.3. Функциональная структура программы

5.2 Инсталляция на ОАО «Подольсккабель»: результаты и опыт использования

Два комплекта (на каждый работающий ускоритель) информационных систем были внедрены в эксплуатацию более восьми лет назад (**Рисунок 5.5**), и успешно эксплуатируются по настоящее время, что позволило организовать более жесткий технологический контроль, т.к. производственный процесс фиксируется в течение всего времени облучения, остановки и изменения параметров протоколируется печатающим устройством (при необходимости запоминаются в файле журнала), а также рационально использовать имеющиеся людские ресурсы.



Рисунок 5.4. Информационное табло во время работы ускорителя

При работе совместно с подпучковой транспортной системой, разработанным в нашей лаборатории, точность отображаемых данных соответствует всем требованиям заказчика и составляет менее 1%.

Помимо использования вышеуказанного модуля сбора информации на контроллере C8051F350, был также разработан вариант системы с использованием блока сбора информации N6005 производства National Instruments, обладающий более широкими возможностями по управлению оборудованием, и может быть использован для более глубокой интеграции технологического оборудования и системы управления ускорителем.

Заключение

В настоящее время архитектура ускорителей ЭЛВ полностью сформирована. Тем не менее, она является достаточно гибкой для изменения при решении новых задач, как в промышленных, так и научно-исследовательских целях, поэтому работы по совершенствованию ускорителя и его систем управления и питания продолжаются непрерывно. Целью данных работ являются повышение эксплуатационных параметров ускорителя, его надежности, времени безаварийной работы, возможности внедрения в новые технологические процессы. Подтверждением этого факта служат основные результаты данной работы:

– Произведена оценка влияния уровня пульсаций энергии на радиационную модификацию типовых материалов. Промоделированы и проверены на экспериментах схемы высоковольтной колонны каскадного генератора, учитывающие особенности применяемых конденсаторов и диодов. Созданы математические модели каскадных генераторов, учитывающие влияние конструктивных емкостей высоковольтной колонны, которые позволяют с приемлемой точностью рассчитывать параметры работы создаваемых моделей ускорителей ЭЛВ – пульсации энергии, режимы работы высоковольтных компонентов и т.п.

– Показано, что переход на новые высоковольтные конденсаторы не влияет на качество радиационной обработки материалов, проведено тестирование новой компонентной базы высоковольтной колонны. Предложена методика замены конденсаторов на старых моделях ускорителей без снижения надежности работы.

– Обосновано применение последовательно-параллельной схемы для создания ускорителей с током пучка до 100мА, что позволило упростить структуру высоковольтной колонны и снизило затраты на обслуживание оборудования без снижения основных параметров работы. Использование на крайних секциях схемы выпрямления на основе диодного моста позволило повысить надежность работы ускорителя. В настоящее время такая модификация ускорителя ЭЛВ-4 широко

востребована в промышленности и составляет до 50% объема всех выпускаемых ускорителей данного типа.

– Проведен расчет пульсаций энергии с учетом конструктивных емкостей высоковольтной колонны и фидера для проекта БНЗТ.

– Предложена простая методика повышения однородности дозы облучения широкой полиэтиленовой ленты для выпускного окна увеличенной длины.

– Обосновано использование четырёхсторонней системы облучения и показаны её преимущества за счет более эффективного использования тока пучка, меньшей необходимой энергии облучения и снижения азимутальной неоднородности дозы облучения.

– Дополнительная интеграция ускорительного и технологического оборудования в виде системы визуализации и контроля позволило увеличить производство продукции, оптимизировало работу операторского персонала, и помогло наладить дополнительный технологический контроль качества выпускаемых изделий. Сопровождение и сервисное обслуживание позволило выработать подходы для дальнейшей интеграции и автоматизации работы с ускорителями.

Автор должен отметить, что данная работа была бы невозможна без постоянной поддержки Куксанова Н. К., без консультаций и конструктивной критики со стороны Немытова П.И. и помощи Голковского М. Г., а также всех сотрудников лаборатории 12, принимавших участие в разработке, создании и запуске новых моделей ЭЛВ.

В процессе создания системы управления ускорителем автор использовал опыт и идеи, накопленные в радиотехнических лабораториях Института, и искренне благодарен сотрудникам этих лабораторий за поддержку и помощь в работе.

Список литературы:

1. «Industrial Electron Beam Processing» //Международное агентство по атомной энергетическое агентство, [DRAFT 11а, 23 июня 2009](#)
2. Chmielewski A. G., Berejka A. J., «Radiation sterilization centres world-wide. Trends in radiation sterilization of health care products»//International Atomic Energy Agency, Vienna (2008) 49-62.
3. MEISSNER, J., et al. X-ray treatment at 5 MeV and above. Radiation Physics and Chemistry, 57, nos. 3-6 (2000) 647-651.
4. JONGEN, Y., et al. Advances in Sterilization with X-rays, Using a Very High Power Rhodotron and a Very Low DUR Pallet Irradiator. IAEA-TECDOC-1386, Emerging applications of radiation processing (January 2004) 44-54.
5. CLELAND, M. R. High Power Electron Accelerators for Industrial Radiation Processing. Radiation Processing of Polymers, Hanser Publishers, Munich, and Oxford University Press, New York (1992) 23-49.
6. Салимов Р.А. «Мощные ускорители электронов для промышленного применения». Успехи физических наук, том 170, №2, февраль 2000г.
7. N.K. Kuksanov, S.N. Fadeev, Y.I. Golubenko, D.A. Kogut, A.I. Korchagin, A.V. Lavrukhin, P.I.Nemytov, R.A Salimov (BINP SB RAS, Novosibirsk) «High Power ELV Accelerators for Industries Application» // Proceeding of RuPAC-2010, Protvino, Russia,2010
8. Б.И. Альбертинский, М.П. Свиньин «Каскадные генераторы», «Атомиздат», Москва, 1980.
9. Китаев Г.И. «Сравнение схем каскадных генераторов», Атомная энергия, т.14, вып.2, 1963.
10. Cleland M.R., Morgganstern K.H. “Dinamitron – a high power electron accelerator”, Nucleonics, v.18, n.8, 1960
11. М.П. Свиньин «Расчет и проектирование ускорителей электронов для радиационной технологии», М., «Энергоатомиздат», 1989

12. Н.К. Куксанов, С.Н. Фадеев и другие «Развитие модельного ряда и повышение эксплуатационных характеристик ускорителей ЭЛВ», VANT, 2011
13. П. И. НЕМЫТОВ «Стабилизация и контроль основных параметров мощного электронного пучка промышленных ускорителей прямого действия» Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Новосибирск, 1997
14. Куксанов Н.К.; Салимов Р.А.; Фадеев С.Н. и другие «Источники электронного пучка для радиационных технологий» "Актуальные проблемы химии высоких энергий" (Сборник докладов IV Российской конференции) 2015, Москва, из-во "Граница"
15. BLY J. H., Electron Beam Processing. International Information Associates, Yardley, Pennsylvania (1988) 32-53.
16. BRADLEY R., Radiation Technology Handbook. Marcel Dekker, Inc., New York (1984) 23.
17. SAMPAM. H., O`RELA P. R., DUARTE C. L., «Industrial Wastewater Treatment in Brazil Using an Electron-Beam Accelerator» Environmental Applications of Ionizing Radiation, John Wiley & Sons, Inc., New York (1998) 521-530.
18. Куксанов Н.К., Фадеев С.Н., Салимов Р.А. и другие. «Технические средства улучшения качества облучения материалов ускорителями ЭЛВ», "Физика элементарных частиц и атомного ядра". - 2014. - Т. 11, № 5 (189). - С. 950-957
19. Голубенко Ю.И., Вейс М.Э., Кузнецов С.А., Куксанов Н.К., Корабельников Б.М., Малинин А.Б., Немытов П.И., Прудников В.В., Салимов Р. А., Черепков В.Г., Фадеев С.Н. «Ускорители электронов серии ЭЛВ: состояние, применение, развитие.» Тезисы докладов 8-го совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Санкт-Петербург, 1995, М., ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1995.
20. Ауслендер В.Л., Нехаев В.Е. «Промышленная радиационная обработка кабелей и проводов», Препринт ИЯФ, Новосибирск 1992

21. Bauerlein R., Bickel H.D., "Irradiation Methods and Dose Uniformity in Radiation Cross-Linking of Cabl FND Wire Insulation", Radiation Physical Chemistry, Vol.18
22. Аксамирский П.В, Куксанов Н.К., Малинин А.Б., Немытов П.И., Салимов Р.А. и другие, «Система четырехстороннего облучения электронами кабельных и трубчатых изделий», Электротехника, 1997. №7. с. 46-51.
23. Kuksanov N.K., Golubenko Y.I., Nemytov P.I., Salimov R.A. and other "The high voltage cascade generators of ELV accelerator" // Proceeding of RuPAC-2016, St. Petersburg, Russia,2016
24. Баранов В.Ф., «Дозиметрия электронного излучения», М., Атомиздат, 1974.
25. Tasuo Tabata, Rinsuke Ito, An Algorithm for the Energy Deposition by Fast Electron, Nuclear science and Engineering стр. 226-239,№53, 1974
26. NL5: <http://nl5.sidelinesoft.com/index.php?lang=ru>
27. Куксанов Н.К. «Электронные ускорители непрерывного действия мощностью сотни киловатт» Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Новосибирск, 1993.
28. НЕМЫТОВ П.И. «Системы питания и управления серии высоковольтных промышленных ускорителей электронов с мощностью выведенного пучка сотни киловатт» Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Новосибирск, 2010
29. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Энергоатомиздат, Ленинград, 1986
30. Брызгин К.А. Квалификационная работа на соискание степени магистра «Ускоритель электронов ЭЛВ-4 для скоростной рентген-томографии», Кафедра Физики Ускорителей НГУ, Новосибирск, 2014.
31. Брызгин К.А., Домаров Е.В., Корчагин А.И., Куксанов Н.К., Немытов П.И., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., «Пульсации энергии в ускорителе ЭЛВ-4 для скоростной рентгентомографии».
32. Куксанов Н.К., Салимов Р.А. и другие «Применение серийного ускорителя ЭЛВ для томографических исследований» По материалам РУПАК, 2014

33. Иоссель Ю.Я. и другие «Расчет электрической емкости», ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, Ленинград, 1981
34. Брызгин К.А., Домаров Е.В., Корчагин А.И., Куксанов Н.К., Немытов П.И., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., «Пульсации энергии в ускорителе электронов ЭЛВ-4 для скоростной рентген-томографии» // ISSN 1818-7994. Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Том 8, выпуск 3.
35. Ауслендер В.Л., Нехаев В.Е., Салимов Р.А., Финкель Э.Э. «Развитие электронно-лучевой технологии в электроизоляционной и кабельной технике», «Электротехника», 1996. №11. с. 26-30.
36. Куксанов Н.К., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., Немытов П.И., Когут Д.А., Корчагин А.И., Лаврухин А.В., Семенов А.В., Черепков В.Г., Домаров Е.В., Воробьев Д.С., Голковский М.Г., Голубенко Ю.И. «Источники электронного пучка для радиационных технологий» //Материал конференции
37. Kuksanov N.K., Fadeev S.N., Salimov R.A., Golubenko Y. I., Kogut D.A., Korchagin A.I., Lavrukhin A.V., Nemytov P.I., Domarov E.V., Semenov A.V. «Technical Facilities for Improving the Quality of Irradiation of Materials by ELV Accelerators», ISSN 1547_4771, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2014, Vol. 11, No. 5, pp. 610–614. © Pleiades Publishing, Ltd., 2014.
38. Veis M.E., Kuksanov N.K., Nemytov P.I. e. a. «The system to extract the linear, ring and concentrated electron beam into atmosphere» Indo - USSR seminar on industrial application of electron accelerators. Preprint of lectures. Bombay, BARC, 1988, volume 1. (см. также European particle accelerator conference, EPAC, ROME, 1988. Singapore e. a. world sci., 1989, vol. 2)
39. Ito R., Andreo P., T. Tabata. Reflection of Electrons and Photons from Solids Bombarded by 0.1- to 100-MeV Electrons // Radiation Physics and Chemistry, 42, n. 4-6, pp. 761-764, 1993.
40. Tabata T., Ito R. An Algorithm for the Energy Deposition by Fast Electrons // Nuclear Science and Engineering: 53, 226-239 (1974).
41. Голковский М.Г. Расчёт температурных полей и формирование структуры и свойств поверхностных слоёв металлов и сплавов при облучении пучком

- релятивистских электронов. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, г. Томск, 2007 г.
42. Бублей А.В., Вейс М.Э., Куксанов Н.К., Долгополов В.Е., Лаврухин А.В., Немытов П.И., Салимов Р.А., Громов Н.И., Ванькин В.Г., Ройх А.И., Степанов М.Н. «Запуск системы четырехстороннего облучения электронами кабельных и трубчатых изделий на ЗАОр НП «Подольсккабель»», Электротехника. – 2004. – № 3. – С. 24–29..
 43. Куксанов Н.К., Салимов Р.А., Черепков В.Г. «Выпуск в атмосферу развернутого электронного пучка с током до 100 мА.», Приборы и техника эксперимента, N4, 1988 г., Москва
 44. Salimov R.A., Korabelnikov V.M., Kosilov M.R., Prudnikov V.V. «Development of the next generation of powerfull electron accelerators». Final research coordination meeting RADIATION PROCESSING OF FLUE GASES (part1) IAEA, Poland, Zakopane, 1993
 45. Бублей А.В., Вейс М.Э., Куксанов Н.К. и др., «Усовершенствованный промышленный ускоритель электронов для облучения кабельной изоляции», журнал "Кабели и Провода", №4 (287), стр. 16-19, 2004.
 46. Иванов В.С. Радиационная химия полимеров. Л.: Химия, 1988, 320 с.
 47. Боев М.А., Лямкин Д.И., Мисюк К.Г., Скакун Е.В. Термомеханический метод оценки параметров сетки сшитых полимеров. Кабельная техника. 1996. № 10 (248), с.8-14.
 48. Куксанов Н.К., Фадеев С.Н., Когут Д.А., «Повышение однородности электронно-лучевой обработки материалов ускорителями ЭЛВ», №1(20), стр. 94 – 99, 2013.
 49. Абрамян Е.А., Гапонов В.А. Сильноточный ускоритель электронов на основе трансформатора. «Атомная энергия». 1966.т.20
 50. Куксанов Н.К. Разработка мощных ускорителей непрерывного действия для применения в радиационной технике. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск. 1976.

51. Крайнов. Г.С. Ускоритель электронов для прикладных целей (конструкция и расчет). Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск. 1975.
52. Kuksanov N.K., Salimov R.A. (BINP SB RAS, Novosibirsk), Han B.S., Kang W.G., Kim S.M. (EB TECH Co. Ltd., Daejeon, Republic of Korea) «High Voltage ELV Accelerators for Industrial Application (Family of Accelerators and Tendency of Development)» // Proceeding of RuPAC-2012, Peterhof, Russia, 2012.
53. К.Штеффен «Оптика пучков высокой энергии», Москва «Мир», 1969
54. http://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_length
55. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. М. Наука, 1980.
56. N. Kuksanov, S. Fadeev, et al, BINP SB RAS, Novosibirsk, "The development of the model range and the improvement of the performance accelerators", VANT №3 March 2012, p. 15 (1996); <http://vant.kipt.kharkov.ua>
57. Б.З. Персов «Расчет и проектирование экспериментальных установок», Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2006
58. С.Н. Фадеев, Салимов Р.А., Немытов П.И. и др. «Подпучковое оборудование для расширения технологических возможностей ускорителей ЭЛВ», //Сборник докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1-4 октября, 2001. С. 68. См. также Вестник "Радтех - Евразия", Новосибирск, 2002. С. 8-13.
59. N. Kuksanov, P. Nemytov, Y. Golubenko, D. Kogut, I. Chakin, «Information Measuring Support Electron Accelerators Of Elv And Related Technology Equipment», //Problems of Atomic Science and Technology, 2012, № 3, стр. 211-214
60. В.Н.Зайцев, С.А.Кузнецов, Н.К.Куксанов, Р.А.Салимов, С.Н.Фадеев, В.Г.Черепков «Высоковольтный источник питания мощного электронного ускорителя», Препринт ИЯФ 90-50, Новосибирск, 1990.

61. Шкундин Л.Р., Финкель Э.Э., Миронов Е.И., Вдовин Авторское свидетельство SU 1381608 A1 «Способ перемотки гибких протяженных изделий в процессе облучения», Заявка ФРГ 3141532 от 28.5.1981.
62. Отчет об опытно-технологической работе «Разработка и внедрение технологического процесса с использованием направленных потоков электронов, обеспечивающего повышение качества, производительности и расширения номенклатуры облучаемых кабельных изделий на ускорителях электронов.» (Под рук-м Э.Э.Финкеля), К7116022803371(1), ВНИИКП, Москва, 1986.
63. Техническое описание системы управления ускорителей ЭЛВ. Блок переброса пучка BSU, 2AE 170 00 00, 2AE 170 00 01
64. Свиныин М.П. «Высоковольтные ускорители электронов для прикладных целей, разрабатываемые в НИИЭФА», НИИЭФА, Ленинград, 1978г.
65. Брызгин К.А., Домаров Е.В., Корчагин А.И., Куксанов Н.К., Немытов П.И., Салимов Р.А., Фадеев С.Н. «Пульсации энергии в ускорителе электронов элв-4 для скоростной рентген-томографии» 15.05.2013
66. Ауслендер В.Л., Нехаев В.Е. «Промышленная радиационная обработка кабелей и проводов», препринт ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1992