

6
A-60

С.В.М.

Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры
им. Д.В.Ефремова

4

На правах рукописи

П.В.Еукаев

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ
СИСТЕМ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

05.280 - электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации
на соискание ученой
степени кандидата
технических наук

Л

Ленинград
1971

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте
электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова

Научный руководитель - доктор физико-матема-
тических наук САРАНЦЕВ В. П.

Официальные оппоненты - доктор технических
наук, профессор ШАЛЬНОВ А. В.

кандидат технических
наук ГУСЕВ С. А.

Ведущее научно-исследовательское учреждение - Лаборатория
нейтронной физики Объединенного института ядерных иссле-
дований.

Автореферат разослан 20 апреля 1971 г.

Защита диссертации состоится 26 мая 1971 г.
на заседании совета Научно-исследовательского института
электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова (актовый
зал Ленинградского политехнического института им. М. И. Ка-
линина, Политехническая ул., 29).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной
библиотеке Ленинградского политехнического института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА В. В. Широков (ШИРОГОВСКИЙ В. В.)

I
Для проведения экспериментов по изучению способа подо-
грева и удержания горячей плазмы и исследований коллектив-
ного метода ускорения, предложенных соответственно
Н. К. Кристофилосом и В. И. Векслером, требуются высокоинтен-
сивные электронные релятивистские пучки с малым энергетиче-
ским разбросом и однородной плотностью на значительной
длине.

Перед НИИЭФА им. Д. В. Ефремова в 1960 г. была поставлена
задача разработать линейный индукционный ускоритель элек-
тронов с током пучка в импульсе 150-200 А и энергией
3 Мэв - ЛИУ 3/200, предназначенный для создания кольцеоб-
разного электронного сгустка, используемого в коллектив-
ном методе ускорения.

К началу разработки этого ускорителя не было публикаций
по теории, схемам и конструкциям узлов ускорителей такого
типа.

За истекшие 10 лет появился ряд работ, посвященных во-
просам теоретического и экспериментального исследования
отдельных узлов и систем ЛИУ. Однако вопросы теоретическо-
го исследования основных систем ускорителя - индукционной
и импульсной - в опубликованных работах освещены недоста-
точно.

Целью данной работы является теоретическое исследова-
ние и разработка методики расчета индукционной и импульс-
ной систем ЛИУ, обеспечивающих равномерность передачи энер-
гии от накопителя к пучку в течение импульса, а следова-
тельно, и моноэнергетичность ускоренных частиц; эксперимен-
тальная проверка разработанной методики на узлах действующей

Центральная научная библиотека

шего и макетах проектируемого ускорителей; разработка рекомендаций по выбору оптимальных параметров и конструктивных схем узлов рассматриваемых систем. Работа состоит из введения и трех глав.

Во введении изложены основные требования, предъявляемые к ЛИУ, как инжекторам физических установок — термоядерной "Астрон", адгезатора коллективного ускорителя и МБР-2.

Первая глава посвящена определению места ЛИУ среди известных ускорителей — прямого действия (УПД) и радиочастотных (РЧУ), — рассмотрению его структурной схемы и характерных особенностей.

В § I гл. I на основании рассмотрения принципа действия и конструктивных схем ускорительных участков этих ускорителей и ЛИУ делается вывод о том, что ЛИУ относится к классу радиочастотных ускорителей. Основной ускоряющий элемент ЛИУ — индуктор подобен широкополосному резонатору РЧУ, спектры импульсов действующих ЛИУ состоят из высоких частот радиочастотного диапазона, поэтому для расчета и исследований систем ЛИУ следует использовать радиотехнические методы.

По аналогии с выражениями для осевой H_z и радиальной H_r составляющих напряженности магнитного поля кругового витка с током I получены выражения для составляющих напряженности электрического поля вблизи оси, возбуждаемого изменяющимся в сечении кольцеобразного витка магнитным потоком Φ . Собранные из таких кольцеобразных индукторов секция представляет собой ускорительную секцию ЛИУ, во внутренней полости которой существует осевая составляющая вихревого электрического поля E_z , ускоряющая частицы.

В § 2 гл. I рассмотрена структурная схема ЛИУ, включающая основные устройства и системы, определены их назначение и взаимодействие и сформулированы главные требования к ним.

ЛИУ состоит из следующих основных систем и узлов.

1. Форинжектор, включающий в себя электронную пушку, элементы ее питания и управления. Основные требования к форинжектору сводятся к следующим: крутой фронт и повышенная стабильность плоской части импульса напряжения в пространстве взаимодействия внутри индукторов, равенство длительностей импульса форинжектора и основного ускорительного тракта.

2. Индукционная система, состоящая из ряда ускорительных секций, каждая из которых содержит несколько специальных широкополосных резонаторов — индукторов. Система предназначена для создания ускоряющего электрического поля в пространстве взаимодействия.

3. Импульсная система, включающая в себя цепи высоко-точных импульсных контуров, зарядные и размагничивающие устройства. Она предназначена для поддержания постоянного напряжения на электродах ускорительной трубки в течение импульса или, иными словами, для обеспечения равномерного в течение импульса пополнения энергии в зазоре между электродами трубки.

4. Устройство синхронизации, состоящее из синхронизатора, промежуточных усилителей и передающих кабелей. Оно служит для обеспечения запуска коммутаторов форинжектора и импульсной системы, а также элементов приемника по

заданной временной программе, т.е. с учетом времени пролета частиц и задержки импульсов в цепях и схемах.

5. Фокусирующая система.

В § 3 рассматриваются особенности систем и сравниваются характеристики действующих ускорителей — инжектора "Астрона" и ЛИУ 3/200. Качественно рассмотрены процессы в форинжекторной части ускорителя.

На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана принципиальная и конструктивная схема более простого (по сравнению с инжектором "Астрона") индукционного импульсного ускорителя прямого действия на ток в импульсе до десятка килоампер при энергии частиц 1 Мэв и более, который удовлетворяет требованиям, предъявляемым к форинжекторам для ЛИУ. Ускоритель состоит из проводящей полой колонны, служащей опорой кольцеобразных индукторов, питание к которым подводится по кабелям, расположенным во внутренней полости колонны. В верхней части колонны располагаются электронная пушка с органами управления и высоковольтный когекс ускорительной трубки с фокусирующим устройством. Второй конец трубки заземлен. Такая схема ускорителя обеспечивает ряд достоинств, в частности, возможность повышения градиента напряжения в трубке, простоту подачи регулируемой мощности к катодному узлу, произвольность угла наклона трубки к вертикали.

Во второй главе исследуется индукционная система.

В § 1 получены выражения для напряженности электрического поля E в зависимости от напряжения возбуждения, а также от изменяющейся по радиусу скорости приращения индукции $B(r)$. Аналогичное выражение получено

для расчета напряженности магнитного поля на оси одной или ряда катушек с прямоугольной формой сечения.

В качестве примера расчета приведены картины электрических полей на оси индукторов и секций для двух вариантов индуктора с различной геометрией сердечников (отношение сторон сечения 0,2 и 1,0). Эти картины иллюстрируют возможность появления пространственных гармоник электрического поля, которые при определенных условиях могут воздействовать на пучок, приводя к ухудшению фокусировки. Рассмотрена принципиально-конструктивная схема действующего ускорителя с учетом некоторых поправок, внесенных при наладке, уменьшающих индуктивность рассеяния индуктора. Рассмотрено несколько возможных вариантов включения сердечника и для каждого варианта оценено влияние способа включения на динамическую емкость индуктора. Для лучшего варианта определена зависимость разности потенциалов от радиуса, что позволяет выбирать оптимальный вариант изоляции индуктора. На основании полученных выражений приведены эпюры напряженностей электрических и магнитных полей внутри ускорительной секции, состоящей из ряда индукторов. В результате теоретического исследования и экспериментальной проверки предложен вариант включения сердечника индуктора, в котором может быть устранена изоляция на внутренней образующей сердечника, что существенно упрощает технологию изготовления изоляции и самого индуктора и улучшает его электромагнитные характеристики.

На основании полученных выражений для напряженностей E и H полей в § 2,3 разработана методика расчета парамет-

ров эквивалентной схемы замещения индуктора в зависимости от его геометрии, необходимая для определения входного сопротивления как функции времени (или частоты) в таком виде, как это требуется для расчета неоднородной формирующей линии. Для одной из эквивалентных схем замещения входное сопротивление в функции времени имеет вид

$$Z_{вх}(t) = \frac{1}{C_1} \left\{ A \cdot e^{-a_1 t} \frac{\sin b_1 t}{b_1} + \frac{B}{a_1^2 + b_1^2} \left[1 - e^{-a_1 t} \left(\frac{a_1}{b_1} \cdot \sin b_1 t + \cos b_1 t \right) \right] + D e^{-a_2 t} \frac{\operatorname{sh} b_2 t}{b_2} + F \cdot \frac{1}{a_2^2 - b_2^2} \left[1 - e^{-a_2 t} \left(\frac{a_2}{b_2} \operatorname{sh} b_2 t + \operatorname{ch} b_2 t \right) \right] \right\}, \quad (I)$$

где $a_{1,2}$, $b_{1,2}$ - действительные и мнимые части корней полиномов в операторном выражении для входного сопротивления;

A, B, D, F - коэффициенты разложения.

Для получения прямоугольного импульса напряжения на индукторе входное сопротивление формирующей линии в зависимости от времени должно быть равно входному сопротивлению индуктора, определяемому этим выражением.

Для иллюстрации метода приводятся расчетные и экспериментальные графики зависимостей входного сопротивления от времени и частоты ($\operatorname{mod} z$). Хорошее совпадение кривых

свидетельствует о правильности методики расчета и ее пригодности для определения амплитудно-частотных характеристик индукторов, которые могут быть в ряде случаев испытаны по входному сопротивлению и коэффициенту передачи без создания ускорителя.

На основании полученных выражений рассчитаны и приведены зависимости параметров эквивалентной схемы замещения индуктора от осевого размера его сердечника a_z . Из графиков следует, что уменьшение волнового сопротивления индуктора достигается уменьшением a_z , однако при этом снижается к.п.д. индукционной системы.

Рассмотрение процессов в сердечнике при импульсном перемагничивании приводится в § 4. Здесь же приводятся результаты экспериментальных исследований характеристик магнитных материалов. Эти исследования при проектировании ускорителя позволили изготовить индукторы, удовлетворяющие требованиям импульсной системы, и получить хорошей формы импульс на индукторах действующего ускорителя.

В § 5 приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований и определены основные требования к индукционной системе с точки зрения ее работы в качестве нагрузки импульсной системы ЛИУ и обеспечения требуемых характеристик ускорителя в целом. Рассмотрены две основные тенденции в проектировании линейных индукционных ускорителей - получение максимальной величины ускоряющего поля E_z , с одной стороны, и максимального к.п.д. ускорителя, с другой. Эти требования противоречат одно другому, и поэтому при проектировании следует выбирать то или иное направле-

ние в зависимости от назначения ускорителя. В качестве основных параметров ускорителя приняты напряженность ускоряющего поля, к.п.д. ускорителя, длительность и частота посылок импульсов, напряжение возбуждения индуктора и ток пучка. Сформулированы принципы обоснования и выбора этих параметров, и приводится ряд выражений и графиков, связывающих их с осевым и радиальным размерами сердечника, что позволяет проектировщикам наглядно анализировать связь основных параметров с геометрией и выбирать их оптимальные варианты. Показано, что в ЛИУ 3/200 коэффициент использования магнитного материала близок к 0,25, что свидетельствует о наличии резерва повышения напряженности ускоряющего поля.

Третья глава посвящена исследованию импульсной системы. В § I гл. III получены выражения для токов и напряжений в индукторе для различных значений параметров эквивалентной схемы замещения, определенных ранее. Рассчитанные величины и формы напряжений и токов совпадают до конца плоской части импульса с экспериментальными. Получены выражения для коэффициента передачи индуктора, определяемого как отношение его вторичного напряжения к первичному, в которых влияние неоднородностей в цепи источник энергии — пучок (индуктивность тиратрона, петля на входе индуктора и др.) учитывается введением паразитной индуктивности L_p . Рассчитанные для ЛИУ кривые коэффициента передачи иллюстрируют возможность затягивания фронта либо появления во вторичном напряжении колебаний. Полученные выражения и иллюстрирующие их кривые могут представлять интерес для проектирования импульсных и индукционных систем ЛИУ, а также им-

пульсных модуляторов с комплексными нагрузками.

В § 2 сформулированы требования к накопительному устройству, заключающиеся в обеспечении электрической прочности, малого волнового сопротивления, высокой надежности и возможности регулирования в процессе наладки временной зависимости входного сопротивления. В качестве накопителя можно использовать либо радиочастотные кабели ("Астрон"), либо конденсаторы (ЛИУ 3/200). Разработаны накопители с отечественными конденсаторами типа ПКГИ и "Сиконд". Показано, что при длительности рабочего импульса 0,3–0,5 мксек целесообразно использование накопителя с сосредоточенными параметрами и последовательной коррекцией формы импульса, использованной в ЛИУ 3/200, импульсная система которого защищена авторским свидетельством. Для более коротких импульсов, по-видимому, следует отдать предпочтение кабелям с параллельной коррекцией, использованной в импульсной системе инжектора "Астрона", либо специально разработанному накопителю.

Приведены результаты сравнительных исследований отечественных конденсаторов, которые по их рабочим напряжениям можно использовать в импульсных системах ЛИУ. Показано, что бумагопленочные конденсаторы имеют резервы снижения паразитной индуктивности, в результате чего нижняя граница длительности импульса, при которой они могут использоваться в линиях, может быть снижена.

В § 3 сформулированы основные требования к коммутирующему устройству, обоснован выбор водородных тиратронов, удовлетворяющих требованиям импульсных линейных модулято-

ров ЛИУ. Особенности разработанной импульсной системы ЛИУ 3/200 – заземление катода тиратрона и нагрузка одного модулятора тремя индукторами, параллельно работающими по входу (от модулятора) и последовательно по выходу (к пучку), – позволили существенно удешевить ее и в то же время удовлетворить требованиям индукционной системы.

При изготовлении индукторов была разработана методика испытаний, в которой большое внимание уделялось их подбору по вольт-амперным характеристикам, что позволило поднять приращение энергии в секции.

В § 4 рассмотрены прочие устройства импульсной системы ЛИУ 3/200 – зарядное и синхронизации. Сформулированы основные требования к ним, описаны их структурные и принципиальные схемы. Проведен качественный анализ наиболее важных особенностей зарядного устройства.

Некоторые теоретические и экспериментальные результаты рассмотрены в приложениях 5–7 (в 4-х первых – таблицы).

В приложении 5 приводится методика расчета напряженности магнитного поля в ускорительных секциях ЛИУ-3/200. Хорошее совпадение результатов измерения напряженности магнитного поля с расчетными позволяет сделать заключение о правильности разработанной методики.

В приложении 6 приведен вывод выражения для минимального волнового сопротивления индуктора, определяющего оптимальный ток нагрузки.

В приложении 7 рассматриваются погрешности разработанной методики расчета и тем самым определяется область ее применения. Показано, что для цепи передачи энергии к пучку область применения ограничена снизу десятком, а для цепи намагничивания – сотней наносекунд. Последняя граница увеличена из-за отсутствия методики расчета характеристик магнитных материалов при соответствующих частотах.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. На основании сравнения ускоряющих систем радиочастотных ускорителей и ускорителей прямого действия и анализа процессов в них сделан вывод о том, что ЛИУ относится к радиочастотным ускорителям, а основной ускоряющий элемент его – индуктор является низкодобротным резонатором.

2. Исследован теоретически и в основных положениях проверен экспериментально вопрос о конфигурации электрических и магнитных полей в индукторах и секциях ускорителя. Получены аналитические выражения, приведены эпюры полей, позволяющие проектировать индукторы с заданными электромагнитными характеристиками. Определены пути улучшения конструктивной схемы индуктора с улучшенными электромагнитными характеристиками.

3. Разработана конструктивная схема индукционного импульсного ускорителя прямого действия, который может быть использован в качестве форинжектора для ЛИУ. Ускоритель прост по устройству и обладает рядом других достоинств.

4. Разработана методика расчета ускоряющего электрического поля на оси ускорительной секции в беструбочном

варианте ускорителя. Проведенный для двух вариантов геометрии индукторов расчет поля показал возможность существования пространственных колебаний напряженности ускоряющего поля.

5. Получены аналитические выражения, связывающие основные электромагнитные характеристики — входное и волновое сопротивление, коэффициент передачи, — с геометрией и конструктивной схемой индуктора.

6. В качестве примера применения разработанной методики расчетов приведены графики зависимостей параметров эквивалентной схемы замещения индуктора (волнового сопротивления, емкостей и индуктивностей) от геометрии сердечника. Рассчитаны графики амплитудно-частотных характеристик и коэффициента передачи для различных значений параметров эквивалентных схем. Экспериментальные амплитудно-частотные и временные зависимости входного сопротивления хорошо согласуются с расчетными. Это позволяет сделать заключение о возможности проверки таким методом правильности выбора конструктивной схемы и технологии изготовления индукционной системы на макетах и тем самым предотвращать возможность неравномерной передачи энергии от накопителя к пучку в течение импульса при ускорении.

7. Получены выражения для токов и напряжений в цепи сильнооточного импульсного контура, формы которых в характерных точках цепи хорошо совпадают с экспериментальными осциллограммами.

8. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по выбору основных

параметров и конструктивной схемы индукционной и импульсной систем для выполнения одного из двух возможных основных требования — повышения к.п.д., или повышения ускоряющего градиента.

9. Рассмотрена структурная схема ускорителя, сформулированы назначение и требования к его основным системам и устройствам. Приведены основные характеристики разработанных ускорителей, определены их отличительные и сходные признаки.

10. Показано, что для импульсов в 0,3–0,5 мкс целесообразно использование в импульсной системе накопителя с сосредоточенными элементами и последовательной коррекцией. При укорочении длительности импульса менее 0,3 мкс предпочтение следует отдавать накопителям с распределенными постоянными.

Сформулированы основные требования к накопителю, и показано, что для накопителей с сосредоточенными постоянными вредной является собственная индуктивность звена, затягивающая фронт и вызывающая колебания на плоской части импульса напряжения.

II. Разработана импульсная система ЛИУ, которая использована в действующем ускорителе и принята за основу в проектирующемся ускорителе. Схемное решение имеет ряд преимуществ перед схемой импульсной системы инжектора "Астрона", заключающиеся, в частности, в заземлении катода тиратрона, использовании последовательной коррекции и параллельном питании трех (в проектирующемся ускорителе около десятка) индукторов.

12. Рассмотрены основные из смежных устройств импульсной системы — зарядное и синхронизации. Сформулированы требования к этим системам. Рассмотрены схемы зарядных устройств и возможные варианты их исполнения в ЛИУ. Показано, что наиболее гибким с точки зрения использования его в ЛИУ является устройство резонансной зарядки с запуском парами импульсов.

13. Рассмотрен вариант исполнения устройства синхронизации, принятый в действующем ускорителе ЛИУ 3/200 и взятый за основу для проектируемого ЛИУ 30/250.

14. Приводятся расчетные формулы и графики, а также экспериментальные результаты измерения напряженности магнитного поля в ускорительной секции ЛИУ-3/200. Магнитное поле в ускорительной трубке не имеет неоднородностей вплоть до радиуса 32 мм, на котором "провалы" поля составляют доли процента.

В настоящее время линейный индукционный ускоритель ЛИУ 3/200 успешно эксплуатируется в ОНМУ ОИЯИ, являясь инжектором коллективного ускорителя. Другой отечественный ускоритель находится в стадии проектирования.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований и расчетов опубликованы в следующих работах:

1. Анацкий А.И., Букаев П.В. и др. "Атомная энергия", т. XXIV, вып. 6, стр. 439-445 (1966).
2. Анацкий А.И., Букаев П.В., Хальчицкий Е.П. Расчет и исследование характеристик сердечников и индукторов ЛИУ. В сб. "Электрофизическая аппаратура", вып. 8. М., Атомиздат, 1969.
3. Букаев П.В., Саранцев В.П. К вопросу о расчете полей, входного сопротивления, токов и напряжений в индукторах линейного индукционного ускорителя. Сообщения ОИЯИ № Р9-5129, 1970
4. Анацкий А.И., Букаев П.В., Хальчицкий Е.П. Импульсная система ЛИУ. Авторское свидетельство № 270134. "Бюллетень открытий и изобретений", № 16, 1970.
5. Букаев П.В., Грызлов А.И. Импульсный трансформатор. Авторское свидетельство № 233035. "Бюллетень открытий и изобретений", № 2, 1969.
6. Букаев П.В., Грызлов А.И. Индукционный импульсный ускоритель прямого действия. Авторское свидетельство № 237290. "Бюллетень открытий и изобретений" № 8, 1969.
Результаты проектных и исследовательских работ обсуждались на следующих совещаниях и конференциях:
7. Ананьев В.Д., Глохинцев Д.И., Букаев П.В. и др. Импульсный реактор с инжектором ИБР-2. Доклад на У конференции по физике и технике исследовательских реакторов, Варшава, декабрь, 1968 г. Сообщение ОИЯИ № 13-4392, 1969.

8. Анацкий А.И., Букаев П.В., Хальчицкий Е.П. Импульсная система линейного индукционного ускорителя электронов. Сборник трудов Всесоюзного совещания по ускорителям в Москве 9-16 октября 1968 г. М., ВИНТИ, 1970, стр.231-236.

9. Анацкий А.И., Алексеев Р.А., Ананьев В.Д., Андупов П.С., Белов В.П., Букаев П.В. и др. "Проект сильноточного линейного индукционного ускорителя электронов на энергию 30 Мэв - инжектора импульсного реактора ИБР-2", IV национальная конференция США по ускорителям заряженных частиц - инженерные проблемы и технология, Чикаго, 1971.