

**ИМПУЛЬСНЫЕ  
УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ  
С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ  
ЭНЕРГИИ**

Под редакцией  
кандидата технических наук В. П. Ковалёва

УДК 31.4  
ББК 621.3.038.624  
И54

Авторы: Р. Н. Мунасыпов, к.т.н. В. П. Ковалёв (гл. 1); к.т.н. А. И. Кормилицын, к.т.н. В. Ю. Кононенко, Е. Н. Колосков (гл. 3); Б. Н. Лаврентьев, Р. В. Протас (гл. 5); к.т.н. А. М. Гафаров, к.т.н. В. П. Ковалёв (гл. 7); В. Б. Братчиков (гл. 8); В. Б. Братчиков, А. И. Ведерников, А. А. Зубков (гл. 9); В. Б. Братчиков, А. И. Ведерников (гл. 10); к.т.н. В. П. Ковалёв (гл. 2, 6, 11, 12, введение, заключение)

И54 Импульсные ускорители электронов с индуктивным накопителем энергии / под ред. В. П. Ковалёва – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2012. – 338, [6] с., ил.

ISBN 978-5-902278-50-4

В монографии представлены результаты и опыт работы РФЯЦ – ВНИИТФ по созданию и развитию электрофизических установок (ЭФУ) на базе импульсных электронных ускорителей с индуктивными накопителями энергии, коммутируемыми электрически взрывающимися проводниками (ЭВП) и плазменными размыкателями (ПР). Рассмотрены расчетно-экспериментальная и инженерная методики расчета ускорителей. Подробно описаны конструкции и режимы работы уникальных ЭФУ ИГУР-1, ИГУР-3, ЭМИР-2, коммутируемых ЭВП, и низкоимпедансных установок серии СИГНАЛ и РАПИД с коммутацией МПР, а также импульсно-периодического ускорителя электронов (ИПУЭ).

Приводятся оригинальные конструкции систем формирования импульсов (СФИ), позволяющие получать одиночные и серии импульсов требуемой амплитуды, формы и длительности. Рассмотрены конструкции и характеристики сильноточных обостряющих и коммутирующих разрядников. Изложены методы измерения электрических и радиационных параметров ЭФУ и защиты измерительных каналов от электромагнитных помех (ЭМП). Приведены принципиальные схемы заземления мощных ЭФУ и принципы построения цифрового измерительного комплекса. Оценены перспективы развития данного направления ускорительной техники.

Монография предназначена для широкого круга специалистов, интересующихся мощными ЭФУ и импульсными ускорителями электронов, их применением в различных областях науки и техники.

УДК 31.4  
ББК 621.3.038.624

ISBN 978-5-902278-50-4

© ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ  
им. академ. Е. И. Забабахина», 2012

*Памяти доктора физико-математических наук,  
профессора Ю. А. Зысина  
и доктора физико-математических наук,  
профессора А. В. Лучинского посвящается*



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений.....	9
Введение.....	11
Глава 1. О расчете электрических контуров с индуктивно-емкостным накопителем энергии и прерывателем тока на основе ЭВП.....	17
1.1. Вариатны электротехнических контуров .....	20
1.2. Физико-математическая модель и ее реализация в программе КЭВ.....	27
1.3. Инженерный метод расчета электрических параметров ускорителей с индуктивным накопителем и ЭВП .....	34
Список литературы .....	37
Глава 2. Мощный импульсный ускоритель элетронов ИГУР-1 .....	38
2.1. Схема и принципы работы ускорителя.....	39
2.2. Конструкция ускорителя.....	40
2.3. Генерирование тормозного излучения .....	45
2.4. Формирование и вывод в атмосферу электронного пучка .....	50
Список литературы .....	55
Глава 3. Мощный импульсный ускоритель электронов ИГУР-3 .....	56
3.1. Конструкция ускорителя ИГУР-3 .....	57
3.2. Конструкция основных узлов ускорителя ИГУР-3 .....	61
3.3. Формирование импульсов тока и напряжения в диоде (УТ) ускорителя ИГУР-3 .....	68
3.4. Режимы генерирования импульса тормозного излучения с длительностью $100 \pm 10$ нс с фокусировкой и без фокусировки электронного пучка на аноде .....	76
3.5. Генерирование импульсов тормозного излучения с длительностью $25 \pm 5$ нс .....	83
3.6. Формирование выведенных в атмосферу электронных пучков .....	90
3.6.1. Формирование мощных электронных пучков в УТ ускорителя ИГУР-3 .....	93
3.6.2. Анодный генератор плазмы.....	98
3.7. Режим генерирования мощного импульса тормозного излучения с генераторами плазмы на катоде и аноде диода УТ.....	99
Список литературы .....	106

---

Глава 4. ИГУР-3.5 – импульсный ускоритель электронов для рентгенографии .....	108
4.1. Конструкция ускорителя ИГУР-3.5 .....	108
4.2. Методики измерений при отработке режимов работы ускорителя .....	113
4.3. Режимы эксплуатации и экспериментальные результаты .....	117
Список литературы .....	121
Глава 5. Установки серии ЭМИР – генераторы тормозного и электромагнитного излучений .....	123
5.1. Установка ЭМИР (1978–1987 гг.) .....	124
5.2. Установка ЭМИР-М .....	137
5.3. Установка ЭМИР-2 – генератор электронных пучков, тормозного излучения и электромагнитных полей .....	156
Список литературы .....	170
Глава 6. Способы получения высоковольтных моно- и серий импульсов, их применение в ускорителях с индуктивным накопителем энергии .....	172
6.1. Способ получения серии импульсов при электровзрыве проводника для использования на ускорителях типа ИГУР .....	172
6.2. Генерация высоковольтных импульсов в ускорителях с индуктивным накопителем энергии с помощью каскадного электровзрыва проводников .....	178
6.3. Генерирование двух последовательных импульсов тормозного излучения и импульса сложной формы ускорителем ИГУР-3 в микросекундном и секундном диапазоне времен между ними .....	183
6.4. Сильноточный газовый разрядник на 100 кВ с большим ресурсом работы для коммутации ГИНа и конденсаторных батарей .....	191
6.5. Режим получения импульса тормозного излучения на ускорителе ЭМИР-М при работе с микросекундным плазменным размыкателем (МПР) .....	195
Список литературы .....	198
Глава 7. Сильноточные низкоимпедансные ускорители электронов серии СИГНАЛ и РАПИД-М .....	199
7.1. Ускорители серии СИГНАЛ (СИГНАЛ-20, СИГНАЛ-24, СИГНАЛ) .....	199
7.2. Развитие плазменных размыкателей в РФЯЦ – ВНИИТФ ....	203

---

7.3. Конструкция и требования к основным узлам ускорителя СИГНАЛ.....	210
7.4. Результаты исследований Z-пинчей.....	214
7.5. Результаты экспериментов по генерации лазерного рентгеновского излучения .....	218
7.6. Ускоритель РАПИД-М.....	225
Список литературы .....	248
Глава 8. Импульсно-периодический ускоритель электронов (ИПУЭ).....	251
8.1. Конструкция ускорителя и отдельных его узлов .....	251
Конструкция ускорительной трубки.....	254
8.2. Режимы работы ускорителя ИПУЭ .....	256
Список литературы .....	270
Глава 9. Измерения электрических и радиационных параметров ЭФУ.....	271
9.1. Датчики для измерения напряжения и тока .....	273
9.2. Цифровой регистрирующий комплекс для обеспечения измерений на ЭФУ РФЯЦ – ВНИИТФ.....	287
Список литературы .....	292
Глава 10. Принципы постановки измерений и защиты от помех на мощных электрофизических установках .....	293
10.1. Постановка измерений и снижение ЭМП на ускорителе ИГУР-3 .....	295
10.2. Постановка измерений и методы снижения ЭМП на ускорителе ЭМИР-М.....	304
10.3. Постановка электрических измерений и устранение ЭМП на установке ИПУЭ.....	309
Список литературы .....	316
Глава 11. Нереализованные проекты .....	317
11.1. Первоначальный проект ускорителя ИГУР-3.....	317
11.2. Мощный ускоритель электронов ИГУР-4Р .....	319
11.3. Мощный ускоритель электронов ИГУР-4Г с горизонтальным расположением СФИ.....	321
11.4. Проекты мегаамперных тераваттных ускорителей РАПИД-2, СЖУР-1.....	323
Список литературы .....	331

---

Глава 12. Курьезные случаи, произошедшие на ранних этапах создания ЭФУ .....	333
12.1. Запуск ускорителя ИГУР-1 .....	333
12.2. Как мы измеряли большую дозу тормозного излучения .....	334
12.3. О наводках и молниях .....	334
12.4. О взрывающемся разряднике .....	335
12.5. Как мы спасли Останкинскую башню .....	335
Заключение .....	337

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВПЛ	– вакуумная передающая линия
ВРД	– вакуумный рентгеновский диод
ГИН	– генератор импульсных напряжений
ГПИ	– генератор поджигающих импульсов
ДН	– делитель напряжения
ЕДН	– емкостной делитель напряжения
ЕНЭ	– емкостной накопитель энергии
ИБ	– испытательный бокс
ИВК	– измерительно-вычислительный комплекс
ИЕНЭ	– индуктивно-емкостной накопитель энергии
ИК	– измерительный канал
ИН	– имитатор нагрузки
ИНЭ	– индуктивный накопитель энергии
ИПУЭ	– импульсно-периодический ускоритель электронов
ИС	– измерительная стойка
КЗ	– короткое замыкание
КП	– кабельная пушка
КПД	– коэффициент полезного действия
КСКК	– комплексная система контроля качества
КЭВ	– каскадный электровзрыв
ЛОВ	– лампа обратной волны
ЛРИ	– лазерное рентгеновское излучение
ЛС	– линия связи
МГД-расчет	– магнитогазодинамический расчет
МДК	– металлодиэлектрический катод
МПР	– микросекундный плазменный размыкатель
МПС	– максимальная просвечивающая способность
МРИ	– мягкое рентгеновское излучение
МЦРИ	– Межведомственный центр радиационных испытаний
НИР	– научно-исследовательская работа
НПР	– наносекундный плазменный размыкатель
ОР	– обостряющий разрядник
ПИП	– поверхностный источник плазмы
ПЛ	– передающая линия

---

ПО	– программное обеспечение
ППТ	– полупроводниковый прерыватель тока
ПР	– плазменный размыкатель
ПС	– полеобразующая система
ПТ	– полиэтиленовая труба
ПШ	– плазменный шнур
ПЩ	– переходной щит
ПФЯВ	– поражающие факторы ядерного взрыва
РБЗ	– разрядник блока запуска
РГК	– рентгенографический комплекс
РИ	– рентгеновское излучение
РК	– радиочастотный кабель
РЛ	– рентгеновский лазер
РПД	– род-пинч диод
РС	– радиационная стойкость
РЭА	– радиоэлектронная аппаратура
СЖРИ	– сверх жесткое рентгеновское излучение
СФИ	– система формирования импульса
ТЗУ	– тиристорное зарядное устройство
ТИ	– тормозное излучение
УВП	– узел взрыва проводников
УТ	– ускорительная трубка, нагрузка
ФЛ	– формирующая линия
ФП	– фокусное пятно
ЦЗО	– цифровой запоминающий осциллограф
ЦРК	– цифровой регистрирующий комплекс
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина
ЭВП	– электровзрывающиеся проводники
ЭМИ	– электромагнитное излучение
ЭМП	– электромагнитные помехи
ЭОК	– электронно-оптическая камера
ЭП	– электронный пучок
ЭФУ	– электрофизическая установка
ЯВ	– ядерный взрыв
ЯВП	– явление взрыва проводников

## ВВЕДЕНИЕ

В монографии впервые обобщен опыт и результаты почти 50-летней работы электрофизического отдела экспериментального отделения РФЯЦ – ВНИИТФ по развитию электрофизических установок (ЭФУ) на базе мощных импульсных ускорителей электронов прямого действия с промежуточным индуктивным накопителем энергии, коммутируемых электрически взрывааемыми проводниками (ЭВП) и плазменным размыкателем (ПР). Основная область применения подобных устройств – моделирование гамма-излучения ядерного взрыва.

Разработка моделирующих ускорителей в РФЯЦ – ВНИИТФ (ВНИИП) началась в 60-х годах XX столетия по инициативе начальника физического отделения доктора физико-математических наук Ю. А. Зысина. В качестве мощного генератора высоковольтных импульсов в электронном ускорителе А. В. Лучинским с сотрудниками было предложено использовать индуктивный накопитель, коммутируемый электрически взрывающимися проводниками, с первичным емкостным накопителем энергии ГИН Аркадьева–Маркса. Идея оказалась весьма плодотворной. В рамках ее реализации была создана серия мощных электронных ускорителей для моделирования мгновенного гамма-излучения и термомеханического воздействия СЖРИ ЯВ (ИГУР-1, ЭМИР, ЭМИР-М, ИГУР-3, ЭМИР-2), а также для рентгенографии быстропротекающих процессов (ИГУР-3.5).

В дальнейшем, как самостоятельное направление, получила развитие схема с индуктивно-емкостным накопителем энергии и прерывателем тока на основе микросекундного плазменного размыкателя (МПР). На основе этой схемы были созданы ускорители серий СИГНАЛ и РАПИД, предназначенные для моделирования воздействия МРИ и СЖРИ ЯВ, а также для накачки эксимерных лазеров и генерации лазерного рентгеновского излучения.

Одновременно прорабатывались проекты новых установок: СЖУР-1, ИГУР-4Р, РАПИД-2.

Для создания ускорителей потребовалось провести большой объем исследований по расчету и моделированию мощных размыкателей на основе ЭВП и МПР, коммутации мощных импульсов в газах и трансформаторном масле и созданию на этой основе газовых и масляных разрядников на рабочее напряжение от 100 кВ до 6 МВ и токи до 500 кА. Разработаны конструкции ускорительных трубок с вакуумными и плазменными диодами на рабочие напряжения 0,1...6 МВ и токи 30...500 кА.

Основными преимуществами ускорителей и установок с индуктивно-емкостным накопителем энергии и электровзрывным или плазменным размыкателем являются:

- простота конструкции и относительно малая стоимость;
- получение требуемых спектров тормозного излучения;
- простая регулировка выходных параметров за счет изменения параметров элементов разрядного контура, который представляет собой электрическую схему с сосредоточенными параметрами;
- простота эксплуатации и обслуживания.

Помог «счастливый» случай. В 1965 году на площадке 16 были закрыты работы по созданию мощного протонного ускорителя ПТ-500. Объединение сотрудников отдела А. В. Лучинского (газодинамика) со специалистами по ускорительной технике с использованием существовавшей инфраструктуры и вспомогательных служб позволили уже через полтора года при отсутствии теоретических расчетов создать первый вариант ускорителя ИГУР-1.

Развитие этого направления ускорительной техники в РФЯЦ – ВНИИТФ условно можно разделить на два основных этапа.

Первый этап – 1960–1970 годы – проверка идеи генерации высоковольтного импульса на индуктивном накопителе с ЭВП и ее реализация в ускорителе прямого действия ИГУР-1. Изучение явления взрыва проводников (ЯВП) в области размыкания (паузы тока) и разработка на этой основе расчетно-экспериментальных и инженерных методов расчета ускорителей.

Второй этап – 1970 годы вплоть до 2010 года – создание на этой базе высокоимпедансных ускорителей ИГУР-3 и серии ЭМИР (ЭМИР-М, ЭМИР-2), низкоимпедансных ускорителей серии СИГНАЛ (СИГНАЛ-20, СИГНАЛ-24) и РАПИД-М. Разработки техники и технологии размыкателей на основе ЭВП и МПР, газовых и масляных разрядников и т. п.

В 1989 году было принято решение правительства о создании на базе ускорителей и установок РФЯЦ – ВНИИТФ Межведомственного центра радиационных испытаний (МЦРИ). В рамках его оснащения разработаны проекты установок СЖУР, ИГУР-4Р и др. Однако в связи с распадом СССР центр не был создан.

Монография предназначена для широкого круга специалистов, интересующихся ЭФУ.

В главе 1 рассматривается расчетно-экспериментальная модель разрядных контуров с ЭВП Ю. Н. Бакулина, В. Ф. Куропатенко, А. В. Лучинского и инженерный метод В. П. Ковалёва. Они позволяют производить предварительный расчет разрядных контуров ускорителей и оптимизировать режим максимальной электрической мощности.

Глава 2 посвящена достаточно подробному описанию ускорителя ИГУР-1 – первому высоковольтному ускорителю электронов с индуктивным накопителем энергии и ЭВП, запущенному в 1967 году и модернизированному в 1975 году. Переданный в НИИП (г. Лыткарино) он работал до конца 1980-х годов в режиме облучательной установки.

В главе 3 рассмотрен ускоритель ИГУР-3 – первый во ВНИИТФ ускоритель с масляной изоляцией основных высоковольтных узлов. Приводится конструкция и основные режимы работы установки при генерации импульсов тормозного излучения и выведенных электронных пучков. Широкий диапазон изменения радиационных параметров (мощность экспозиционной дозы ТИ –  $10^8 \dots 10^{13}$  Р/с, длительность импульса ТИ от 20 нс до 2 мкс, получение серий импульсов, двойных импульсов и импульсов «сложной» формы) позволяет использовать ускоритель как для радиационных испытаний, так и для широкого круга физических исследований.

32-летний опыт эксплуатации подтвердил уникальные возможности ускорителя ИГУР-3. Например, быструю перенастройку режима в соответствии с требованиями заказчика или экспериментатора.

В главе 4 рассматривается история создания мощных рентгенографических установок в СССР и, в частности, в РФЯЦ – ВНИИТФ. Приводится описание конструкции и параметры установки ИГУР-3.5, созданной для газодинамических исследований на ближнем полигоне.

Трехлетняя, успешная эксплуатация ускорителя в составе РГК РФЯЦ – ВНИИТФ подтверждает наши выводы о создании на этом принципе более мощной и недорогой рентгенографической установки.

В главе 5 представлены установки серии ЭМИР (ЭМИР, ЭМИР-М, ЭМИР-2).

Установка ЭМИР была создана на базе установки ИГУР-2 с воздушной изоляцией с добавлением полеобразующей системы для генерации электромагнитного импульса.

Установка ЭМИР-М с масляной изоляцией создавалась первоначально как стенд для отработки принципиальных технических решений, закладываемых в проект ускорителя ИГУР-4Р. В дальнейшем она использовалась для исследований и испытаний совместного воздействия тормозного излучения и ЭМИ на материалы и образцы.

После глубокой модернизации установки ЭМИР-М (2007 г.) на ее основе создана установка ЭМИР-2, состоящая из двух автономных модулей, каждый из которых представляет собой ускоритель электронов прямого действия. Установка ЭМИР-2 способна генерировать импульсы ТИ (электронные пучки) либо синхронно (в виде моноимпульса) с двухсторонним облучением испытуемого объекта, либо в виде двух последовательных импульсов с регулируемым временным интервалом, либо в виде импульса

«сложной» формы, содержащего короткую ( $\leq 100$  нс) и длинную ( $\geq 1$  мкс) составляющие.

В работе приводятся конструкции узлов установок (ГИН, УВП, УТ), максимальные электрические, радиационные параметры ускорителей и имитаторов ЭМИ.

В главе 6 рассмотрены схемы и методы, позволяющие вместо затратного строительства новых установок получать на действующих ускорителях ИГУР-3 и ЭМИР серии мощных импульсов тормозного излучения, импульсов сложной формы и т. д. Экспериментально показана возможность увеличения импульса напряжения и мощности на выходе в десятки раз с помощью последовательного включения разрядных контуров с ЭВП при скоростях вклада энергии от 0,76 ГВт/г до 1...2 ГВт/г, соответственно. Описана конструкция сильноточного газового разрядника тригatronного типа с параметрами  $U = 100$  кВ,  $I \leq 380$  кА,  $Q = 7$  Кл. Он используется для коммутации ГИН ускорителя ИГУР-3 и в ускорителях серии СИГНАЛ для коммутации конденсаторной батареи.

В главе 7 рассмотрены конструкции сильноточных низкоимпедансных ускорителей серии СИГНАЛ и РАПИД-М.

На установке СИГНАЛ с помощью взрыва проволок из алюминия или вольфрама диаметром 10...20 мкм получены микропинчи диаметром порядка 200 мкм с энергией МРИ  $\geq 1$  кэВ.

В работе с капиллярным разрядом на установке СИГНАЛ в 2004 году впервые в России получено из алюминиевой плазмы лазерное рентгеновское излучение с длиной волны 46,9 нм, длительностью порядка 1 нс, углом расхождения 2 мрад и энергией  $\sim 1$  мкДж.

В главе приведены результаты исследований и конструкция МПР на токи до 500 кА. На установке СНОП-3 (Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск) МПР был испытан на токи до 1,5 МА. Приведены параметры установки РАПИД-М с МПР, показаны возможности ее использования в проектах мощных моделирующих установок.

Глава 8 содержит описание импульсно-периодического ускорителя электронов (ИПУЭ), разработанного в институте электрофизики УрО РАН и созданного в РФЯЦ – ВНИИТФ на грант МНТЦ, и стенда СВЧ-излучения на его основе.

Установка ИПУЭ содержит высоковольтный генератор с индуктивным накопителем, коммутируемым твердотельным размыкателем (SOS-диод). Он формирует импульсы напряжения амплитудой 600 кВ, частотой до 100 Гц, длительностью импульса 50 нс и током до 2 кА.

При прохождении электронного пучка через лампу обратной волны (ЛОВ) стенда СВЧ-излучения генерируется излучение мощностью 1 ГВт с несущей частотой 10 ГГц.

В главе 9 описаны датчики для измерения импульсных напряжений и токов на ускорителях и стендах, методики измерения радиационных характеристик ЭФУ. Приводится конструкция и состав цифрового измерительного комплекса. Показаны его возможности по измерениям электрических и радиационных параметров установок.

Глава 10 посвящена принципам постановки измерений и защиты от помех на ЭФУ и ускорителях. Рассмотрены методы защиты от электромагнитных помех датчиков, измерительных кабелей и аппаратуры, конструкции измерительных боксов и схем заземления. Приводятся амплитуды и частоты ЭМП на ускорителях ИГУР-3, ЭМИР, ИПУЭ.

Глава 11 содержит сведения о нереализованных проектах установок электрофизического отдела РФЯЦ – ВНИИТФ. Анализируются схемные и конструктивные решения, отвергнутые из-за дефицита планового времени при создании ускорителя ИГУР-3. Приводятся конструкция и параметры мощного ускорителя электронов ИГУР-4Р, спроектированного в 1980-е годы. Рассмотрен концептуальный проект перспективного ускорителя горизонтального типа ИГУР-4Г. В качестве источника мощных импульсов СЖРИ на базе монтируемого тераваттного ускорителя РАПИД-2 предлагается концептуальный проект 10-тераваттного ускорителя СЖУР-1

Глава 12 посвящена курьезным случаям, произошедшим на первых этапах создания ускорителей типа ИГУР.

В заключение необходимо отметить в первую очередь определяющую роль в зарождении и развитии этого направления ускорительной техники доктора физико-математических наук, профессора Юрия Ароновича Зысина и доктора физико-математических наук, профессора Андрея Владимировича Лучинского, памяти которых авторы посвящают эту монографию, а также существенный вклад Владимира Ивановича Мартынова, Владимира Семеновича Диянкова, Ахата Саитовича Ганеева. На первом этапе создания ускорителя ИГУР-1 свой вклад внесли Р. Н. Мангасаров, В. Ю. Юрченко, И. А. Пехтерев, А. Н. Волошин.

Большой вклад в развитие установок и использование их для испытаний на радиационную стойкость, для рентгенографии и в физических исследованиях внесли кандидат технических наук А. И. Кормилицын, Б. Н. Лаврентьев, кандидат технических наук В. П. Ковалёв, В. Б. Братчиков и другие.

В 1984 году В. П. Ковалёву, А. И. Кормилицыну, А. В. Лучинскому, И. А. Пехтереву совместно с сотрудниками НИИЭФА (Санкт-Петербург), Курчатовского института (Москва) и ИСЭ СО РАН СССР (Томск) присуждена Государственная премия СССР «За разработку новых энергетических устройств». А. В. Лучинский к этому времени уже работал в ИСЭ СО РАН.

Из сотрудников конструкторского отдела весомый вклад в практическую реализацию ЭФУ внесли: кандидат технических наук Ф. П. Крупин, Н. А. Киселев, К. Ф. Ячменева, Л. Н. Кононенко, В. В. Перешитов и другие. А также большой коллектив инженеров, лаборантов и мастеров электрофизического отдела и экспериментального цеха отделения экспериментальной физики РФЯЦ – ВНИИТФ.

Авторы признательны руководителю отделения экспериментальной физики РФЯЦ – ВНИИТФ доктору физико-математических наук, профессору А. В. Лукину за постоянное внимание и ценные советы при создании монографии.

В написании книги принимали участие сотрудники экспериментального отделения РФЯЦ – ВНИИТФ.

Авторы выражают особую благодарность Н. Е. Жиравой и Н. Ю. Касьянову за большую работу по техническому редактированию рукописи.

# ГЛАВА 1. О РАСЧЕТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТУРОВ С ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ И ПРЕРЫВАТЕЛЕМ ТОКА НА ОСНОВЕ ЭВП

Проблема расчета электрических параметров импульсных генераторов с индуктивным накопителем и ЭВП (рис. 1.1) возникла во ВНИИТФ в середине 60-х годов XX века сразу же после постановки задачи создания на их основе мощной моделирующей установки. Сложность проблемы состояла в неизученности явления электровзрыва проводников и нелинейности элементов электрической схемы установки (разрядников, вакуумного диода). Первые оценки преимуществ использования разрядного контура с индуктивным накопителем энергии были сделаны Р. А. Мангасаровым.

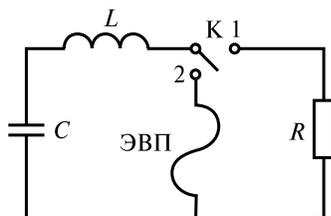
Для сравнения мощности, выделяемой в нагрузке в режимах емкостного и индуктивного накопителя используется упрощенная схема, представленная на рис. 1.1. Вакуумный диод в этой схеме условно представлен в виде постоянного сопротивления  $R$ . При работе в режиме емкостного генератора до момента  $t = 0$  конденсатор  $C$  заряжен до напряжения  $U_0$ , а ключ  $K$  разомкнут. В момент  $t = 0$  ключ переводится в положение 1 и начинается разряд емкости на нагрузку через индуктивность  $L$ . При работе в режиме индуктивного накопителя ключ сначала переводится положение 2. При этом в контуре происходит разряд емкости на индуктивность. Выберем момент  $t = 0$  так, чтобы ток к этому моменту был максимальным,

$$I_0 = \frac{U_0}{\rho}, \left( \rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \right), \quad (1)$$

т. е. когда емкость полностью разряжена и вся энергия накоплена в индуктивности. В этот момент мгновенно и без потерь энергии переведем ключ в положение 1. В индуктивности  $L$  ток при этом остается равным  $I_0$ , в безиндуктивном сопротивлении он меняется скачком от 0 до  $I_0$ , соответственно скачком меняется и напряжение. После этого в контуре  $L, C, R$  протекает ток с выделением джоулевой энергии в нагрузке  $R$ .

Рис. 1.1. Упрощенная схема разрядного контура с индуктивно-емкостным накопителем энергии и ЭВП:

$C$  – емкостной накопитель энергии;  $L$  – накопительная индуктивность; ЭВП – электровзрывающийся проводник;  $K$  – идеальный ключ;  $R$  – сопротивление нагрузки



Решение уравнений для разрядных контуров емкостного и индуктивного накопителей дает следующее отношение максимальных значений мощности, выделяемой в нагрузке:

$$K = \frac{P_{\max}^{(L)}}{P_{\max}^{(C)}} = \frac{1 + \sqrt{1 - (2x)^2}}{4x^2} \cdot \left( \frac{1 + \sqrt{1 - (2x)^2}}{1 - \sqrt{1 - (2x)^2}} \right)^{\frac{1 - \sqrt{1 - (2x)^2}}{\sqrt{1 - (2x)^2}}}, \quad (2)$$

где  $x = \rho/R$ ,  $P_{\max}^{(L)}$ ,  $P_{\max}^{(C)}$  – максимальные мощности в индуктивном и емкостном режимах.

В предельном случае, когда  $R \rightarrow 2\rho$ , т. е.  $x \rightarrow 1/2$ ,  $K \rightarrow 1$ .

При уменьшении  $x$  отношение  $K$  возрастает и, следовательно, все больше преимущество приобретает режим индуктивного накопителя. В случае, когда  $x^2 \ll 1$  отношение мощностей приближается к  $K \sim 1/2x^2$ . Заметим, что мощность излучения рентгеновской трубки  $P_\gamma$  зависит от напряжения  $U$  для  $U > 1$  МВ не как  $\sim U^2/R$ , а по крайней мере, как  $\sim U^3/R$ . При этом отношение

$$k_\gamma = \frac{P_{\gamma, \max}^L}{P_{\gamma, \max}^C} \sim \frac{1}{x^3}, \quad (3)$$

т. е. преимущество индуктивного накопителя выражено еще резче.

Кроме сказанного, существенным соображением в пользу применения промежуточных индуктивных накопителей в импульсных высоковольтных установках является то, что напряжение на нагрузке оказывается в несколько раз выше ударного напряжения начального емкостного генератора. При этом резко снижаются технические трудности, связанные с изоляцией ГИНа и количеством каскадов в схеме Аркадьева–Маркса. Соответственно упрощается конструкция и снижается стоимость установки.

В рассмотренной модели индуктивного накопителя существенную роль играл идеализированный ключ, позволяющий мгновенно и без потерь разомкнуть цепь питания индуктивности и подключения нагрузки. Так как «идеальный» ключ, по-видимому, неосуществим, в дальнейших расчетах его параметры необходимо учитывать.

В монографии [1-1] рассмотрен электрический взрыв проводников и обобщены результаты его использования в электрофизических установках, в частности ИГУР-1, ИГУР-2. Фактически уже в 70-е годы XX века в результате работ по оптимизации контуров с ЭВП с точки зре-

ния получения импульсов высокого напряжения максимальной мощности были определены соотношения, названные «критериями подобия» [1-2].

Критерии подобия позволяют очень просто и достаточно точно подобрать параметры ЭВП (сечение, длина) в зависимости от параметров электротехнического контура (характеристическое сопротивление, запасаемая энергия в первичном емкостном накопителе) для получения максимально возможного напряжения и мощности на индуктивном накопителе энергии в режиме «холостого хода», то есть в контуре без нагрузки, и в случае переключения генерируемого напряжения на оптимальную нагрузку.

Более подробно критерии подобия будут сформулированы далее.

Параллельно, А. В. Лучинским, Ю. Д. Бакулиным и В. Ф. Куропатенко велись работы по созданию программы численного расчета электротехнического контура с ЭВП. Основной проблемой являлось моделирование нелинейного сопротивления ЭВП. В программу, получившую название КЭВ (каскадный электровзрыв) [1-3] был заведен полный магнитогазодинамический (МГД) расчет нагрева, плавления, испарения и разлета вещества ЭВП с заданным уравнением состояния. Сопротивление материала проволочек (меди или алюминия) в зависимости от его состояния определялось по модели проводимости, полученной в результате большого количества расчетов по программе с изменением параметров этой модели с целью согласования результатов расчета с большим массивом экспериментальных данных. В качестве электротехнического контура в программу был заведен простой RLC-контур, коммутируемый ЭВП и обостряющим разрядником (мгновенный переключатель) на индуктивно-резистивную нагрузку. Несколько позже В. Николаев заменил в программе явный метод решения дифференциальных уравнений электротехнического контура неявным. Это позволило применять программу к расчету контуров с сильно отличающимися временными характеристиками двух его ветвей (то есть к «жесткой» системе дифференциальных уравнений контура).

По программе КЭВ в математическом отделении РФЯЦ – ВНИИТФ примерно до середины 1980-х годов было выполнено большое количество расчетов по режимам работы установок ИГУР-1, ИГУР-2, ЭМИР, ИГУР-3.

С 1985 года в отделении экспериментальной физики РФЯЦ – ВНИИТФ проводятся расчеты электротехнических контуров с ЭВП. На основании материалов, изложенных в [1-3] относительно программы КЭВ, была составлена собственная программа расчета на языке FORTRAN. Позднее программа была переведена на язык C++ сначала под операционную систему DOS, затем под Windows.

В настоящее время имеется пакет программ с единым интерфейсом, позволяющим рассчитать один из семи вариантов электротехнических контуров, расчет которых оказывался необходимым в разное время. Современные системы визуального программирования (используется C++ Builder 6) позволяют достаточно просто, в случае необходимости, добавить в пакет программу расчета нового контура с ЭВП.

Результаты расчета представлены как в численном виде, так и в виде графиков напряжений, токов, сопротивления ЭВП и мощности в элементах контура.

### 1.1. Вариатны электротехнических контуров

Имеющийся в настоящее время пакет программ позволяет проводить расчеты следующих вариантов электротехнических контуров с ЭВП.

#### Вариант 1. Базовый контур

Базовый вариант электротехнического контура с ЭВП (рис. 1.1.1) является наиболее простым из рассчитываемых контуров, в котором учитываются только самые основные элементы реального контура.

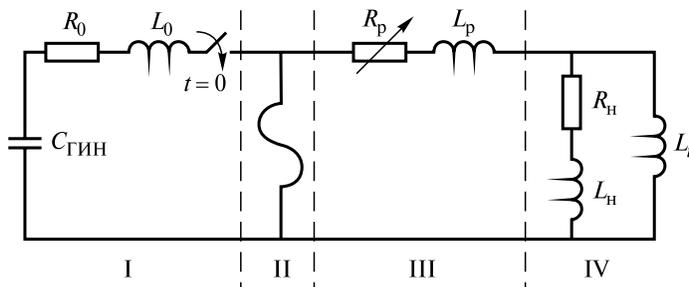


Рис. 1.1.1. Базовый вариант электротехнического контура с ЭВП:

I – генератор импульсных напряжений и накопительная индуктивность; II – ЭВП; III – обостряющий разрядник; IV – нагрузка (УТ) с выравнивающей поле индуктивностью

Работа контура начинается с подключения ЭВП к генератору импульсных напряжений (ГИН) и накопительной индуктивности. Сопротивление обостряющего разрядника при этом принимается достаточно большим ( $>10^5$  Ом), чтобы разрядник и нагрузка не оказывали сколь-нибудь заметного влияния на распределение токов в контуре. При достижении на ЭВП заданного напряжения происходит срабатывание обостряющего разрядника и подключение нагрузки, что в расчете моделируется как экспоненциальный спад сопротивления разрядни-

ка с заданной постоянной времени до заданной величины. Нагрузка, как правило, представляет собой электронную ускорительную трубку (УТ). Индуктивность  $L_t$  введена на тот случай, когда выравнивание электрического поля по длине секционированного вакуумного изолятора УТ осуществляется за счет индуктивности спиральной катушки вокруг изолятора, витки которой соединены с градиентными кольцами изолятора УТ.

### Вариант 2. Учет основных паразитных емкостей

Как видно на рис. 1.1.2, по сравнению с базовым вариантом в расчетный контур введены три основные паразитные емкости:  $C_3$  – емкость узла взрыва проводников на «землю»;  $C_p$  – межэлектродная емкость обостряющего разрядника и  $C_H$  – емкость на «землю» нагрузки (высоковольтного электрода УТ).

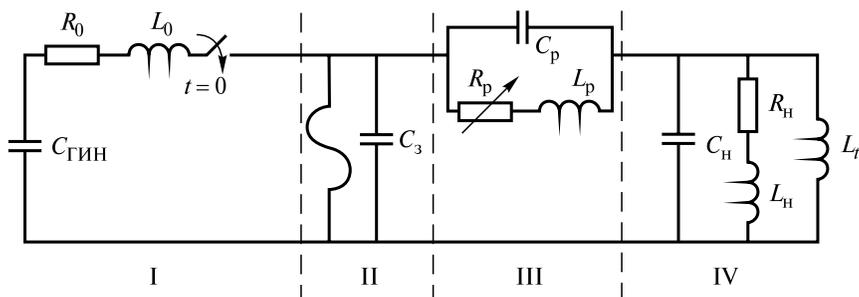


Рис. 1.1.2. Учет основных паразитных емкостей в электротехническом контуре:

I – генератор импульсных напряжений и накопительная индуктивность; II – ЭВП; III – обостряющий разрядник; IV – нагрузка (УТ) с выравнивающей поле индуктивностью

Учет этих паразитных емкостей не оказывает заметного влияния на основные амплитудно-временные характеристики импульсов напряжения и токов по сравнению с базовым вариантом, но приводит к появлению высокочастотных колебаний сравнительно небольшой амплитуды на медленно меняющихся частях импульсов напряжения и токов, а также объясняет появление «предымпулса» напряжения на нагрузке в реальных установках.

### Вариант 3. Модификация нагрузки

В некоторых случаях возникает необходимость значительного уменьшения предымпулса на нагрузке, как, например, при создании ускорителя электронов ИГУР-3.5 (см. гл. 4). Амплитуда предымпулса пропорциональна отношению емкостей  $C_p / (C_p + C_H)$ . Уменьшить ее

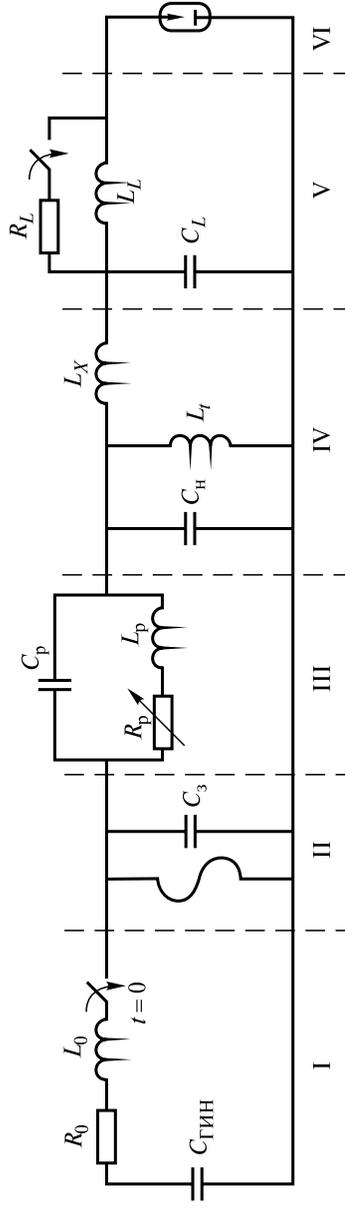


Рис. 1.1.3. Электротехнический контур с подключенной к выходу передающей линией УТ и вакуумным диодом:

I – генератор импульсных напряжений и накопительная индуктивность; II – ЭВП; III – обостряющий разрядник; IV – УТ до передающей линии и выравнивающая поле индуктивности; V – передающая линия с сопротивлением электронному потоку; VI – вакуумный диод

можно, увеличивая емкость нагрузки на «землю», например, за счет подключения к выходу ускорительной трубки коаксиальной вакуумной передающей линии. Вариант электротехнического контура с модифицированной таким образом нагрузкой приведен на рис. 1.1.3.

Коаксиальная вакуумная передающая линия на нем представлена в виде элемента с сосредоточенными параметрами (емкостью и индуктивностью). Сопротивление  $R_L$  учитывает тот факт, что часть тока в линии может протекать параллельно индуктивности высоковольтного электрода линии в виде электронного потока в вакууме. Индуктивность такого электронного потока зависит как от толщины слоя радиального распространения электронов в вакууме, так и от распределения тока в потоке и может меняться как при изменении параметров контура, так и во время конкретного расчета. Оценить ее не представляется возможным, но, очевидно, что она существенно меньше индуктивности высоковольтного электрода линии. В расчете она не учитывается.  $L_X$  является индуктивностью подсоединения коаксиальной вакуумной передающей линии к выходу УТ.

Ускоряющий промежуток в этом варианте может быть представлен по выбору, либо обычным сопротивлением, в котором выполняется закон Ома, либо элементом, в котором напряжение и ток связаны законом Чайльда–Ленгмюра (законом «степени три вторых»), модифицированным с учетом ионной составляющей полного тока, как при соблюдении условия магнитной самоизоляции вакуумной передающей пинии перед промежутком, так и при нарушении этого условия. Такое сложное представление нагрузки в какой-то степени описывает зависимость тока в *god-pinch*-диоде, которым укомплектован ускоритель ИГУР-3.5.

#### **Варианты 4 и 5. Электротехнические контуры с двумя каскадами ЭВП**

На рис. 1.1.4 и 1.1.5 представлены два варианта контуров с двумя каскадами ЭВП. В первом из них (базовый вариант) не учитываются паразитные емкости элементов контура, кроме межэлектродных емкостей межкаскадного и обостряющего разрядников. Во втором из них дополнительно учитываются паразитные емкости узлов взрыва проводников в обоих каскадах на «землю» и емкость на «землю» нагрузки (высоковольтного электрода УТ).

Результаты расчетов импульсов напряжения и тока в нагрузке по этим двум контурам различаются таким же образом, как и результаты расчетов по однокаскадному базовому контуру и соответствующему контуру с учетом основных паразитных емкостей. Кроме того, учет паразитных емкостей в двухкаскадной схеме ЭВП приводит к появлению предимпульса напряжения не только на нагрузке, но и перед вторым

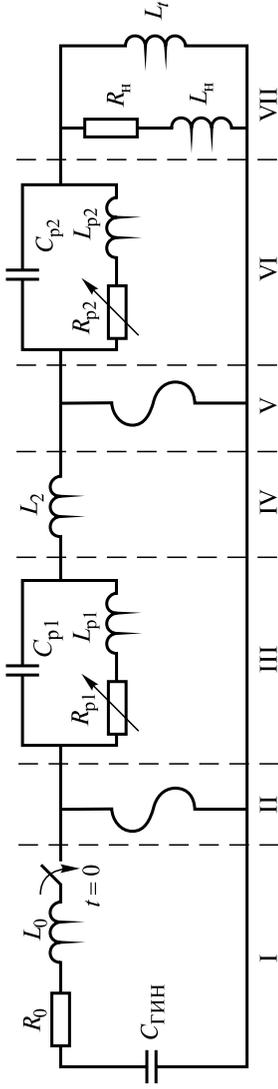


Рис. 1.1.4. Контур с двумя каскадами ЭВП. Базовый вариант:

I – генератор импульсных напряжений и накопительная индуктивность первого каскада; II – ЭВП первого каскада; III – межкаскадный разрядник; IV – индуктивность второго каскада; V – ЭВП второго каскада; VI – обостряющий разрядник; VII – нагрузка и выравнивающая поле индуктивность

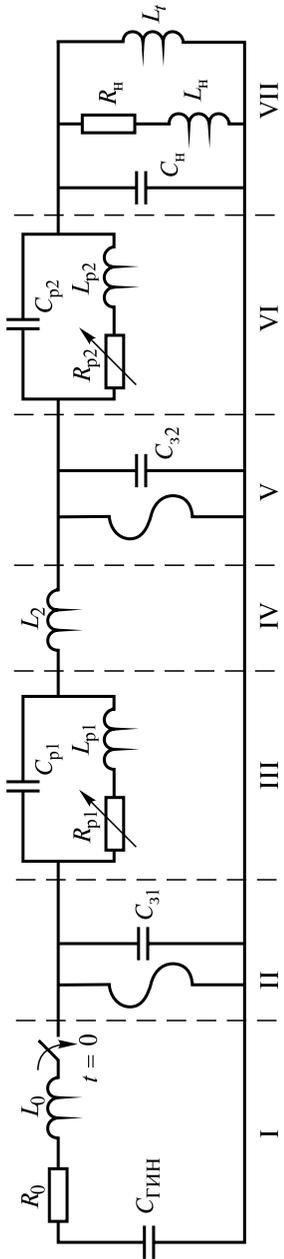


Рис. 1.1.5. Контур с двумя каскадами ЭВП. Учет основных паразитных емкостей:

I – генератор импульсных напряжений и накопительная индуктивность первого каскада; II – ЭВП первого каскада; III – межкаскадный разрядник; IV – индуктивность второго каскада; V – ЭВП второго каскада; VI – обостряющий разрядник; VII – нагрузка и выравнивающая поле индуктивность

каскадом ЭВП. Но этот предымпульс в значительной степени «гасится» накопительной индуктивностью второго каскада и не оказывает заметного влияния на условия взрыва ЭВП второго каскада.

Следующие два контура предназначались для решения частных вопросов при проектировании или составлении обоснованного технического предложения по созданию новых электрофизических установок, но тем не менее они оставлены в пакете программ расчета контуров с ЭВП.

### **Вариант 6. Контур с двумя параллельными ветвями ЭВП и нагрузок**

Необходимость в расчете такого контура возникла при проектировании установки ЭМИР-2, в которой в одном маслозаполненном контейнере размещаются узлы взрыва проволочек и ускорительные трубки двух фактически автономных ускорителей электронов, предназначенных работать с регулируемой временной задержкой друг относительно друга. Существовало опасение, что в результате срабатывания первого из ускорителей наличие емкостных связей между узлами двух ускорителей может привести к тому, что во втором ускорителе, находящемся в «ждушем» режиме, во-первых, существенно изменятся условия взрыва ЭВП, и, во-вторых, напряжение на УТ окажется достаточно высоким либо для ее подключения, либо для начала развития плазменных процессов в ней.

Так как необходимо было рассчитать только напряжение переходных процессов на элементах второго ускорителя при срабатывании первого, то контур второго ускорителя рассчитывается в упрощенном виде: не рассматривается взрыв ЭВП, поэтому ЭВП представлены их эквивалентным сопротивлением и индуктивностью и отсутствует первичный емкостной накопитель энергии, не рассматривается срабатывание обостряющего разрядника, поэтому он представлен только паразитной межэлектродной емкостью.

Из емкостных связей между узлами двух ускорителей в расчете были учтены паразитные емкости между узлами взрыва проволочек ( $C_{33}$ ), между ускорительными трубками ( $C_{нн}$ ) и перекрестные связи между узлом взрыва каждого из ускорителей и нагрузкой другого ( $C_{31н2}$ ).

Результаты расчетов по приведенному на рис. 1.1.6 контуру показали, что можно не опасаться указанных выше возможностей, а последующая эксплуатация смонтированной установки подтвердила это.

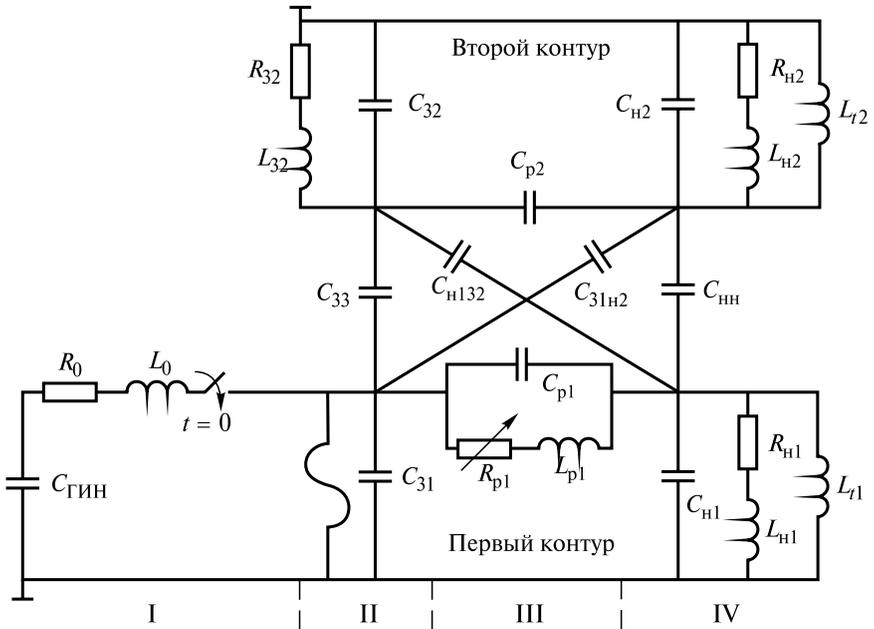


Рис. 1.1.6. Контур с двумя параллельными ветвями ЭВП и нагрузок:

I – генератор импульсных напряжений и накопительная индуктивность; II – ЭВП; III – обостряющие разрядники; IV – нагрузки (УТ) с выравнивающими поле индуктивностями

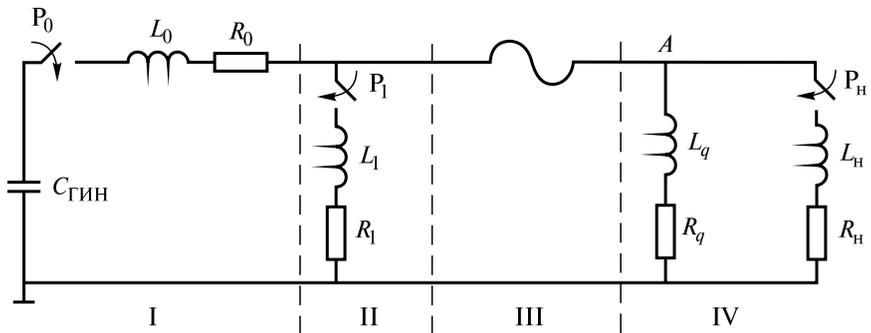


Рис. 1.1.7. Контур с размыкателем

**Вариант 7. Размыкание двух частей контура**

При подготовке технического предложения по созданию установки, имитирующей воздействие тока разряда молнии, в качестве одного из возможных вариантов рассматривался контур, приведенный на рис. 1.1.7. В такой схеме разряд емкостного накопителя энергии через ЭВП заряжает индуктивный накопитель энергии и формирует передний короткий (несколько микросекунд) фронт импульса тока на нагрузке (объекте испытаний). Взрыв ЭВП в максимуме тока отсекает емкостной накопитель энергии от нагрузки, так что остаточная энергия в нем разряжается через шунтирующий разрядник, а задний фронт импульса тока в нагрузке формируется за счет разряда индуктивного накопителя энергии, и постоянная времени этого разряда подбирается такой, чтобы обеспечить полную длительность импульса тока в нагрузке в несколько сотен микросекунд в соответствии с требованиями государственных стандартов.