ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Е.Г. Крастелев, А.П. Лотоцкий, С.П. Масленников, Э.Я. Школьников

МОЩНЫЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫЕ СИСТЕМЫ

Часть II. Формирование и передача импульсной электромагнитной энергии экстремально высокой мощности

Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии» в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений

Москва 2008

УДК 621.374(075) ББК 32.847а7 М 87

Крастелев Е.Г., Лотоцкий А.П., Масленников С.П., Школьников Э.Я. Мощные электроимпульсные системы. Часть II. Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008. 144 с.

Пособие посвящено мощным электроимпульсным системам, их принципу действия, анализу их работы и особенностям их конструкции. Изложены принципы построения, анализ физических процессов и особенности конструкции генераторов импульсных напряжений (ГИН) на основе емкостных накопителей энергии. Рассмотрены генераторы мощных высоковольтных импульсов на основе индуктивных накопителей энергии: схемы построения генераторов, их конструкций, а также различные типы выключателей мощных импульсных токов.

Пособие предназначено для студентов, изучающих курс "Высоковольтная сильноточная импульсная техника", "Физика сильноточных пучков", "Электроимпульсные технологии", "Проблемы коммутации в мощной импульсной электрофизике". Оно также может быть полезно аспирантам и специалистам, работающим в области создания мощных электроимпульсных систем.

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы МИФИ.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Собенин Н.П.

ISBN 978-5-7262-1090-2

© Московский инженерно-физический институт (государственный университет), 2008

Редактор *Н.В. Шумакова* Оригинал-макет изготовлен *С.В. Тялиной*

Подписано в печать 21.11.2008. Формат 60×84 1/16. Уч.-изд. л. 9,0. Печ. л. 9,0. Тираж 150 экз. Изд. № 4/110. Заказ №

Московский инженерно-физический институт (государственный университет). 115409, Москва, Каширское ш., 31

Типография издательства «Тровант», г. Троицк Московской области

Оглавление

| Вв | еден | ие | | 5 | | |
|----|--|---|--|----|--|--|
| 1. | Генераторы мощных высоковольтных импульсов | | | | | |
| | на основе емкостных накопителей энергии | | | | | |
| | 1.1. | Прин | цип построения генераторов мощных | | | |
| | | высон | овольтных импульсов | 8 | | |
| | 1.2. | Осно | вные характеристики емкостного накопителя | 10 | | |
| | 1.3. | Генер | аторы импульсных напряжений | 12 | | |
| | | 1.3.1. | Принципиальная схема ГИН | 13 | | |
| | | 1.3.2. | Основные параметры ГИН | 14 | | |
| | | 1.3.3. | Анализ переходных процессов в ГИН | 17 | | |
| | | 1.3.4. | ГИН с черезкаскадной зарядкой | 23 | | |
| | | 1.3.5. | Усовершенствование ГИН путем изменения | | | |
| | | | топологии размещения элементов | 25 | | |
| | | 1.3.6. | ГИН с биполярной зарядкой | 27 | | |
| | | 1.3.7. | Генераторы с трехэлектродными разярядниками | 30 | | |
| | | 1.3.8. | Особенности ГИН многомодульных установок | 33 | | |
| | 1.4. | Генер | аторы импульсного напряжения – | | | |
| | | форм | ирователи мощных высоковольтных импульсов | | | |
| | | микро | осекундной длительности | 39 | | |
| | | 1.4.1. | Простейший вариант на базе ГИН | 40 | | |
| | | 1.4.2 | ГИН с корректирующими LC-цепями | 41 | | |
| | | 1.4.3. | ГИН – формирователи импульсов | 44 | | |
| | 1.5. | Промежуточные емкостные накопители энергии. | | | | |
| | | Формирующие линии | | | | |
| | | 1.5.1. | Основные характеристики и свойства | | | |
| | | | диэлектриков, используемых в промежуточных | | | |
| | | | накопителях энергии | 50 | | |
| | | 1.5.2. | Электрическая прочность жидких диэлектриков. | | | |
| | | | Формулы Мартина | 51 | | |
| | | 1.5.3. | Некоторые свойства газообразных и твердых | | | |
| | | | диэлектриков | 54 | | |
| | | 1.5.4. | Промежуточные емкостные накопители | 55 | | |
| | | 1.5.5. | Промежуточные емкостные накопители – | | | |
| | | | формирователи импульсов на основе отрезков | | | |
| | | 4 5 0 | линий передачи | 57 | | |
| | | 1.5.6. | Основные типы линии с распределенными | | | |
| | | | параметрами, используемые для формирования | • | | |
| | | 4 | и передачи импульсов высокой мощности | 61 | | |
| | | 1.5.7. | предельные возможности линии | 65 | | |
| | | 1.5.8. | Оптимизация передающих линий | 66 | | |

| | 1.6. Трансформирующие и передающие линии | 81 |
|----|--|-----|
| | 1.6.1. Трансформатор наносекундных импульсов | |
| | на неоднородной линии | 82 |
| | 1.6.2. Передающие линии | 87 |
| | 1.6.3. Резонансная зарядка формирующей линии | 87 |
| | 1.6.4. Предымпульсы | 90 |
| | 1.6.5. Примеры систем формирования импульсов | |
| | некоторых крупных установок | 94 |
| 2. | Генераторы мощных высоковольтных импульсов | |
| | на основе индуктивных накомителей энергии | 99 |
| | 2.1. Общие характеристики индуктивного | |
| | накопителя энергии | 102 |
| | 2.2. Схемы генераторов на основе индуктивных | |
| | накопителей и коммутаторы тока | 107 |
| | 2.3. Выключатели токов индуктивных накопителей | 111 |
| | 2.3.1. Электрический взрыв проводников | |
| | при коммутации импульсных токов | 111 |
| | 2.3.2. Выключатели тока с взрывным приводом | 116 |
| | 2.4. Импульсный вывод магнитной энергии | |
| | из индуктивных накопителей | 140 |
| Сг | писок литературы | 143 |
| | | |

Введение

Предлагаемое читателям данное учебное пособие является второй частью из серии книг, посвященных проблемам мощной импульсной электрофизики и мощной импульсной электроники. В нём даётся описание принципов построения, анализа физических процессов и особенностей конструкции генераторов импульсных напряжений (ГИН) на основе емкостных накопителей энергии: схемы построения генераторов, их конструкций, а также различные типы выключателей мощных импульсных токов.

Из-за сравнительно большого объёма данного пособия в него не были включены такие планируемые разделы, как генераторы импульсных токов на основе емкостных накопителей энергии, вакуумные линии с магнитной изоляцией, генераторы на основе импульсных высоковольтных трансформаторов, коммутаторы в мощной импульсной электрофизике, электромагнитные и электротермические ускорители макротел. Эти и другие вопросы будут изложены в следующих частях учебного пособия "Мощные электроимпульсные системы", которые планируется к изданию в 2009– 2010 гг.

Представленное ниже учебное пособие содержит две главы.

В первой главе пособия изложены основные принципы построения генераторов мощных высоковольтных импульсов, приводятся основные характеристики емкостных накопителей энергии, описываются принципиальные схемы генераторов импульсных напряжений (ГИН) и формулируются основные параметры ГИН. Приводится анализ нестационарных процессов в ГИН и рассматриваются ГИН с четырёхкаскадной и биполярной зарядкой, даётся описание особенностей ГИН многомодульных установок, таких например, как "Ангара-5". Рассматриваются генераторы импульсного напряжения - формирователи мощных высоковольтных импульсов микросекундной длительности: ГИН с корректирующими LC-цепями, ГИН – формирователи импульсов. Даётся описание генераторов на основе промежуточных емкостных накопителей энергии (формирующие линии), приводятся основные характеристики и свойства диэлектриков, используемых в промежуточных накопителях энергии. Рассматриваются одинарные и двойные формирующие линии, а также основные типы линий для формирования и передачи мощных импульсов: коаксиальные, полосковые радиальные, их предельные возможности оптимизация по волновому сопротивлению, напряжению и передаваемой мощности. Излагаются вопросы трансформирующих и передающих линий: трансформатор наносекундных импульсов на неоднородной линии и на отрезках линий. Рассматривается резонансная зарядка линий и анализируется проблема предимпульса. В заключение главы приводятся примеры систем формирования импульсов некоторых крупных установок.

Во второй главе учебного пособия даётся информация об общих характеристиках индуктивных накопителей энергии и приводятся схемы генераторов на основе индуктивных накопителей. Большое внимание уделено проблеме выключателей токов в цепях с индуктивными накопителями, в частности, приводятся характеристики электрического взрыва проводников и разработанных на этом эффекте выключателей тока с взрывным приводом. Приводится подробная информация о сравнительно новом типе размыкателя – плазменном прерывателе тока. В заключение главы анализируются вопросы импульсного вывода магнитной энергии из индуктивных накопителей.

Как и в случае первой части пособия, заметная часть используемых в данном пособии результатов получена авторами при решении ими различных научно-исследовательских задач в области мощных электроимпульсных систем.

1. ГЕНЕРАТОРЫ МОЩНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Емкостные накопители энергии широко используются в качестве импульсных источников высокой мощности в различных электрофизических установках. Они обладают малым внутренним сопротивлением ~10–3 Ом, позволяют получать большие импульсные токи (более 107 А) и высокие импульсные напряжения (более 107 В), отличаются относительной простотой, надежностью, удобством обслуживания. Уступая другим типам накопителей по удельной энергоемкости, они имеют неоспоримое преимущество в тех случаях, когда необходимо обеспечить быстрый вывод энергии в нагрузку. Они являются единственным типом из всех импульсных источников энергии, обеспечивающим в настоящее время получение в малоиндуктивной нагрузке мощности до 1014 Вт и скорости нарастания тока до 1014 А/с.

Традиционно в течение многих лет емкостные накопители используются с целью получения больших импульсных токов и сильных магнитных полей для физических исследований; магнитно-импульсной обработки металлов; ускорения и метания твердых тел; возбуждения ударных волн в конденсированных средах; генерации интенсивных вспышек светового излучения при разрядах в газах. В шестидесятые годы прошлого столетия к ним добавились такие направления, как генерация и ускорение импульсных электронных и ионных пучков высокой мощности (до 1013 Вт); генерация мощного электромагнитного излучения СВЧ и рентгеновского диапазонов, создание импульсных газовых лазеров.

В последние десятилетия интенсивное развитие получила техника генерации импульсов предельно высокой мощности для проведения исследований в области управляемого термоядерного синтеза с инерциальным удержанием. За рубежом и в нашей стране были построены такие крупные многомодульные установки, как «PBFA-2», (после первой модификации «PBFA-Z», а по завершению проводимых в настоящее время работ – установка «ZR»), «Ангара-5», «Стенд-300», «ГИТ-16» и другие. Масштабы и параметры их не могут не впечатлять – наиболее крупная установка «ZR» должна обеспечить получение импульсов с мощностью свыше 1014 Вт и длительностью около 100 нс.

Надо отметить, что все эти установки построены на базе емкостных накопителей энергии, которые используются во всех звеньях компрессии импульсов от первичного накопления энергии до формирования выходных наносекундных импульсов (за исключением выходного каскада установки «ГИТ-16»).

На рис. 1 представлена наиболее крупная отечественная установка «Ангара-5», на которой с середины 80-х годов успешно ведутся исследования по физике горячей плазмы и УТС. Установка состоит из восьми модулей и обеспечивает получение на общей нагрузке импульсов с амплитудой напряжения 2 МВ и амплитудой тока короткого замыкания ≈ 7 МА при длительности импульсов ≈ 100 нс.



Рис. 1. Установка «Ангара-5»

1.1. Принцип построения генераторов мощных высоковольтных импульсов

В основе построения всех генераторов мощных высоковольтных импульсов лежит общий принцип относительно медленного накопления энергии (в той или иной форме) в первичном накопителе и быстрой ее передачи в нагрузку. Такая временная трансформация потока энергии, или иными словами, усиление мощности с преобразованием спектра электромагнитного сигнала в область более высоких частот, принципиально невозможна без нелинейных элементов. Роль таких элементов в мощных импульсных генераторах выполняют коммутаторы – искровые разрядники, полупроводниковые ключи, насыщающиеся индуктивности и др., сопротивление (проводимость) которых скачкообразно изменяется от состояния «выключено» до состояния «включено» под действием тех или иных факторов. С помощью коммутаторов запасенная в накопителе энергия направляется в нагрузку или, при необходимости дальнейшего усиления, в следующий, промежуточный накопитель энергии или накопитель – формирователь импульсов с заданными параметрами. С учетом сказанного обобщенную блок-схему генератора можно представить в виде, показанном на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема генератора высоковольтных импульсов высокой мощности

На схеме приведены временные параметры, соответствующие типичным значениям для генераторов наносекундных импульсов мегавольтного диапазона напряжений сильноточных ускорителей и установок для термоядерных исследований. Число промежуточных звеньев компрессии может быть бо́льшим, чем показано на блок-схеме рис.2, в частности, при необходимости сжатия импульсов до субнаносекундных длительностей. В установках меньшей мощности или ориентированных на получение импульсов миллисекундной или микросекундной длительности промежуточные накопители и связанные с ними коммутаторы могут отсутствовать. Однако хотя бы одно звено из показанной на рис. 2 последовательности каскадов усиления мощности будет присутствовать в любом генераторе электромагнитных импульсов.

1.2. Основные характеристики емкостного накопителя

Энергия в емкостном накопителе запасается в электрическом поле. Плотность запасаемой энергии определяется допустимым (рабочим) значением напряженности электрического поля E_p и диэлектрической проницаемостью изоляции между электродами накопителя:

$$w_E = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E_p^2}{2},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции, ε_0 – диэлектрическая постоянная.

В емкостных накопителях применяются различные диэлектрики: твердые, жидкие, комбинированные. Среди твердых диэлектриков существуют материалы с весьма высокой диэлектрической проницаемостью є. Так, например, у сегнетоэлектриков $\varepsilon = (5 - 10) \cdot 103$. Однако, как правило, рабочая напряженность электрического поля в таких диэлектриках невелика. Для сегнетоэлектриков $E_n \approx 5$ кВ/см, и поэтому плотность энергии в них невысока по сравнению с другими материалами. Наиболее широкое применение в накопителях с характерным временем разряда 10-6-10–3с находят: конденсаторная бумага ($\varepsilon = 2, 2-3, 0$), синтетические полярные ($\varepsilon = 2.5 \div 3.2$) и неполярные ($\varepsilon \approx 2.0 \div 2.2$) пленки. Для улучшения электрических характеристик, а именно, электрической прочности, срока службы, угла диэлектрических потерь, бумажная или пленочная изоляция пропитывается жидкими диэлектриками. Наибольшее применение находят нефтяное конденсаторное, касторовое и синтетические масла. Основная масса выпускаемых промышленностью импульсных и силовых конденсаторов имеет бумажно-масляную, пленочно-масляную ИЛИ комбинированную (пленочно-бумажную с масляной пропиткой) изоляцию.

Некоторые электрические характеристики материалов и максимальные плотности энергии в накопителях в рабочих режимах приведены в табл. 1. Меньшие численные значения относятся к колебательному режиму разряда, большие – к апериодическому. В реальном накопителе (конденсаторе) средняя плотность энергии оказывается несколько ниже, чем в диэлектрике из-за наличия в объеме конденсатора дополнительной изоляции от корпуса, краев пакетов, секций, выводов и т.д.

| 7 | аблииа | 1 |
|---|--------|---|
| _ | | _ |

| Изоляция | 3 | <i>Е</i> _{<i>p</i>} , МВ/м | <i>w_E</i> , МДж/м ³ | Примечание |
|---|-------|-------------------------------------|--|---|
| Бумага, пропи- танная касторо- вым маслом | 5,5 | 70–100 | 0,12–0,25 | Конденсаторы первичных накопи- телей энергии |
| Лавсан с касторо- вым маслом | 3,5 | 100–150 | 0,16–0,34 | То же |
| Керамика (тита- нат бария) | 3000 | 2,5 | 0,08 | Конденсаторы с на- носекундными вре- менами разряда |
| Оксидная алюми- ниевая пленка | 10–25 | 100 | 0,60 | Электролитические конденсаторы, разряд апериодический |
| Трансформатор- ное масло | 2,2 | 30 | 0,01 | Время зарядки ~10 ⁻⁶ с |
| Вода деионизо- ванная | 80 | 25 | 0,20 | Время зарядки ~10 ⁻⁶ с |

Наряду с характеристиками изоляции конденсаторов в табл. 1 приведены сведения по жидким диэлектрикам, которые используются в импульсных (промежуточных) емкостных накопителях энергии, в частности, в формирующих линиях. В таких устройствах изоляция подвергается кратковременному воздействию электрического поля. Характерные времена зарядки формирующих линий составляют доли – единицы микросекунд, времена разряда – ≤ 100 нс. В накопителях наносекундного диапазона, в которых в качестве диэлектрика используется вода (деионизованная и обезгаженная), плотности запасаемой энергии приближаются к 1 МДж/м³.

Весьма важной характеристикой накопителя является отношение максимального времени заряда накопителя к времени, за которое он может быть разряжен, т.е. времени передачи запасенной энергии в нагрузку. Это отношение характеризует максимально возможное усиление мощности или, иными словами, определяет степень компрессии энергии во времени. Время заряда емкостного накопителя ограничивается его саморазрядом за счёт токов утечки, величина которых определяется проводимостью (удельным сопротивлением) изоляции. Очевидно, что для эффективной работы накопителя время заряда должно быть, по крайней мере, в несколько раз меньше времени саморазряда. Сравнительный анализ характеристик различных накопителей энергии показывает, что именно емкостные накопители обеспечивают наибольшую степень компрессии энергии, которая достигает восьми порядков.

В последующих разделах данного учебного пособия будут рассмотрены основные характеристики, схемотехника и конструктивные особенности первичных и промежуточных накопителей энергии генераторов импульсов максимально высокой мощности, в том числе, многомодульных генераторов сильноточных ускорителей и установок для исследований по физике горячей плазмы. Как правило, в качестве первичных накопителей энергии в них используются емкостные накопители по схеме генератора Аркадьева– Маркса, а в качестве промежуточных – накопители на отрезках длинных линий, которые объединяют в себе функции накопителей энергии и формирователей квазипрямоугольных импульсов наносекундной длительности. Анализу именно этих устройств и будет посвящен материал последующих разделов пособия.

1.3. Генераторы импульсных напряжений

Генераторы импульсного напряжения (ГИН) или генераторы по схеме Аркадьева–Маркса представляют собой емкостные накопители энергии, состоящие из набора конденсаторов, которые при зарядке включены параллельно, а при разряде с помощью коммутирующих элементов переключаются в цепь последовательно соединенных. При этом напряжение на выходе генератора оказывается равным сумме зарядных напряжений конденсаторов. Иными словами, с помощью такой схемы осуществляется трансформация напряжения от зарядного U_0 до NU_0 , где N – число последовательно соединенных конденсаторов. Генераторы импульсного напряжения по схеме Аркадьева– Маркса находят широкое применение в различных устройствах для получения импульсов высокого напряжения от нескольких десятков киловольт до десяти и более мегавольт при уровнях запасенной энергии от единиц джоулей до десятков мегаджоулей. В частности, в конструкциях сильноточных ускорителей они используются в качестве первичных накопителей энергии для быстрой импульсной зарядки промежуточных емкостных или индуктивных накопителей, а также непосредственно в качестве источников ускоряющего напряжения.

В соответствие с принятой классификацией емкостных накопителей по уровню зарядного напряжения ГИН относятся к накопителям среднего и высокого напряжения – типичные уровни зарядных напряжений лежат в диапазоне от нескольких десятков до сотни киловольт.

1.3.1. Принципиальная схема ГИН

Варианты схемы простейшего ГИН, поясняющей его принцип действия, показаны на рис. 3.



Рис. 3. Варианты схемы простейшего ГИН: *а* – с изменением полярности выходного напряжения относительно зарядного, *б* – без изменения

Как видно из этих схем, несколько (N) конденсаторов подсоединены к общему источнику постоянного зарядного напряжения U_0 через токоограничивающий резистор $R_{\text{зар}}$ и межкаскадные зарядные резисторы R.

Здесь и в дальнейшем будем считать, что ток зарядки конденсаторов задается сопротивлением токоограничивающего резистора, т.е. $R_{\text{зар}} >> R$, так что напряжение на всех конденсаторах во время зарядки изменяется по одному закону и одинаково в любой момент времени. Отметим, что в реальных конструкциях зарядных устройств ГИН вместо зарядного резистора $R_{\text{зар}}$ часто используются реактивные элементы или электронные схемы ограничения тока с целью повышения КПД цепи заряда. Параметры этих элементов также обеспечивают выполнение условия одинаковости напряжения на всех конденсаторах ГИН во время зарядки.

В исходном состоянии (в конце зарядки) все конденсаторы заряжены до напряжения U_0 , а напряжение на выходе ГИН отсутствует (равно нулю). При одновременном включении всех коммутаторов ГИН конденсаторы оказываются соединенными последовательно и напряжение на выходе ГИН скачком возрастает до NU_0 , и, если постоянная времени цепи нагрузки $R_{\rm H}C/N \ll CR$, разряд конденсаторов ГИН будет происходить в основном через нагрузку и в ней выделится практически вся энергия ГИН.

В ряде случаев для уменьшения потерь энергии при зарядке ГИН вместо зарядных резисторов R используются зарядные индуктивности L, в частности в установках, работающих в импульснопериодическом режиме. Величина зарядных индуктивностей выбирается из условия $R_{\rm H}C/N \ll (LC)^{1/2}$, при выполнении которого разряд конденсаторов также происходит в основном через нагрузку, а не через зарядные индуктивности.

1.3.2. Основные параметры ГИН

К основным параметрам ГИН относятся следующие:

- запасаемая в исходном состоянии энергия $W = N \frac{CU_0^2}{2};$

– выходное напряжение в начальные моменты после включения коммутаторов, называемое «напряжением ГИН в ударе» или просто ударным напряжением, $U_{y_{\pi}} = NU_0$;

– эквивалентная емкость последовательно соединенных конденсаторов ГИН (емкость ГИН при разряде), называемая «емкостью ГИН в ударе», $C_{va} = C/N$;

- величина (диапазон) рабочего зарядного напряжения;

– индуктивность ГИН при разряде на нагрузку, *L*_{ГИН}.

Основные условия работоспособности ГИН

Для обеспечения работоспособности ГИН его коммутирующие элементы должны отвечать следующим требованиям: они не должны включаться самопроизвольно в исходном (заряженном) состоянии ГИН, а при управляемом включении – срабатывать синхронно с малой временной задержкой и малым разбросом времени включения.

В исходном состоянии коммутаторы ГИН находятся под полным зарядным напряжением, а после срабатывания через них протекает полный разрядный ток. Высокий уровень зарядного напряжения (≤ 100 кВ) и большие разрядные токи, которые могут достигать нескольких сотен килоампер, практически предопределяют выбор типа коммутаторов, в качестве которых почти повсеместно используются искровые газовые разрядники.

Простейший тип разрядника – двухэлектродный. Пробой такого разрядника происходит, если напряжение на нем превышает напряжение самопробоя U_{cn} . Очевидно, что для выполнения сформулированного выше условия работоспособности ГИН напряжение на разряднике в исходном состоянии $U_0 < U_{cn}$. Поскольку пробой носит вероятностный характер, то и U_{cn} является случайной величиной, характеризуемой математическим ожиданием и среднеквадратичным разбросом. При этом вероятность пробоя разрядника тем меньше, чем меньше U_0 по сравнению с U_{cn} . В установках, которые содержат десятки и сотни разрядников, вероятность самопроизвольного срабатывания одного из них при заданном зарядном напряжении U_0 растет с числом разрядников N как

 $P = 1 - (1 - P_1)^N$, где P_1 – вероятность самопробоя одного разрядника при заданном зарядном напряжении U_0 .

Это соотношение получается из следующих соображений: величина $(1 - P_1)$ – это вероятность того, что одиночный разрядник не пробьется при заданном напряжении, а $(1 - P_1)^N$ – вероятность того, что не пробьется ни один из N одинаковых разрядников при том же напряжении. Отсюда вероятность самопроизвольного пробоя одного из N одинаковых разрядников, находящихся в одинаковых условиях, $P = 1 - (1 - P_1)^N$.

В зависимости от соотношения зарядного напряжения U_0 и напряжения U_{cn} , а также схемных особенностей ГИН пробой одного разрядника может приводить к самопроизвольному срабатыванию всего ГИН и выделению запасенной в нем энергии в нагрузке. В противном случае несрабатывания остальных разрядников произойдет относительно медленный разряд конденсаторов через зарядные резисторы, в которых и выделится основная энергия. И один, и другой варианты развития событий являются крайне нежелательными и могут приводить к повреждению элементов установки. Поэтому при большом числе разрядников N вероятность самопроизвольного срабатывания отдельного разрядника P_1 должна быть малой. А это означает, что рабочее (зарядное) напряжение многокаскадных ГИН с большим числом разрядников U_0 должно быть существенно меньше U_{cn} .

С другой стороны, чтобы произошел пробой разрядников, т.е. произошло управляемое включение ГИН, необходимо, чтобы напряжение на них скачком возросло до значения, превышающего U_{cn} . Поскольку практически невозможно обеспечить управление всеми разрядниками извне из-за высокого напряжения, появляющегося при срабатывании ГИН, то необходимое для включения разрядников перенапряжение (превышение над пробивным напряжением) должно обеспечиваться автоматически схемными и техническими решениями ГИН.

Таким образом, для обеспечения работоспособности ГИН необходимы схемотехнические решения, обеспечивающие выполнение рассмотренных выше условий, которые могут быть сформулированы как требования максимальной устойчивости ГИН в исходном состоянии и максимальной неустойчивости при управляемом включении первого и нескольких первых внешне управляемых разрядников.

Другое важное условие практической реализации схемы ГИН – это обеспечение электрической изоляции на полное напряжение, получаемое на выходе ГИН.

Электрическая прочность воздуха (~ 30 кВ/см) невелика, и поэтому так называемые открытые ГИН с воздушной изоляцией используются в конструкциях генераторов высокой мощности сравнительно редко. Они имеют большие габариты, и, как следствие, большую индуктивность разрядного контура. Напряжение в ударе для открытых конструкций ГИН обычно не превышает 1–2 МВ. Серьезным их недостатком является высокий уровень излучаемых электромагнитных помех.

Мощные ГИН на высокие напряжения имеют, как правило, закрытые конструкции, они помещаются в металлический корпус (бак), заполненный электрически прочной средой. В качестве изолирующей среды чаще всего используется трансформаторное масло, в небольших установках применяется газ под давлением (азот, N_2 , элегаз, SF₆ или их смесь). Закрытые ГИН имеют меньшие габариты и меньшую индуктивность за счет уменьшения размера петли, образованной прямым и обратным токопроводами (в качестве обратного токопровода используется корпус ГИН). Это позволяет получить меньшую суммарную индуктивность разрядного контура ГИН, и тем самым увеличить скорость нарастания тока в нагрузке и, соответственно, мощность ГИН. Металлический заземленный бак ГИН служит надежным экраном, препятствующим появлению электромагнитных полей в окружающем пространстве.

1.3.3. Анализ переходных процессов в ГИН

В любом ГИН по крайней мере один из разрядников является управляемым, т.е. срабатывает при подаче на него запускающего импульса. Обычно это первый, либо несколько разрядников низковольтных каскадов ГИН. Разрядники же последующих каскадов ГИН должны включаться в результате возникающих на них перенапряжений (зависимое включение). Рассмотрим более подробно одну из схем простейшего ГИН, показанную на рис. 3,*a*, для понимания механизма зависимого включения разрядников и срабатывания генератора.

Из приведенной на рис. 3,*a* схемы видно, что при пробое первого разрядника P_1 потенциал точки «а» $\varphi_a = 0$, а потенциал точки «*a*'» оказывается равным $\varphi_{a'} = -U_0$, поскольку напряжение на конденсаторе *C* не изменяется. Для такой схемы ГИН в первый момент времени после включения первого (управляемого внешним сигналом) разрядника потенциалы приобретают следующие значения:

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = ... = 0,$$

 $\varphi_{a'} = \varphi_{b'} = \varphi_{c'} = ... = -U_{0,2}$

и напряжение на всех разрядниках остается неизменным и равным U_0 (как и было до включения). По мере разряда конденсаторов через зарядные резисторы R, напряжение на разрядниках будет уменьшаться.

Таким образом, анализ изображенной на рис. 3,*а* схемы ГИН показывает, что такой генератор не должен работать. Совершенно аналогичная картина будет наблюдаться и для схемы ГИН, показанной на рис. 3,*б*. Однако даже такие простейшие ГИН оказываются работоспособными. Чтобы понять, почему это происходит, дополним схему элементами, которые неизбежно присутствуют в любой реальной конструкции ГИН.

Прежде всего, это конструктивные распределенные (часто называемые «паразитными») емкости как между элементами ГИН, так и между ними и заземленным корпусом или общей нулевой шиной и окружающими заземленными частями установки для открытых конструкций ГИН. Естественно, что величины этих распределенных емкостей, которые в закрытых конструкциях ГИН составляют десятки и сотни pF, много меньше емкости накопительных конденсаторов, тем не менее они играют важную роль и должны быть учтены. Кроме того, сами разрядники до того, как они пробились, образуют емкость C_p .

Для наиболее простой покаскадной (конденсатор за конденсатором) компоновки ГИН, схематично изображенной на рис. 4, учтем следующие емкости:

– емкости между конденсаторами (а также ошиновкой и другими элементами) соседних каскадов, *C*_c, которые назовем емкостями связи;

-емкости на корпус (на «землю»), C_3 ;

– емкости между электродами разрядников, *C*_p.

Емкости C_c и C_3 – распределенные емкости. Для построения схемы замещения ГИН и анализа ее функционирования представим их в виде сосредоточенных емкостей, подключенных к выводам накопительных конденсаторов. Учитывая, что C_c , $C_3 \ll C$, и то, что напряжение на накопительных конденсаторах во время переходных процессов не меняется, эквивалентные сосре-



Рис. 4. Схематическое изображение покаскадной компоновки конденсаторов ГИН

доточенные емкости C_c и C_3 на схеме замещения могут быть подключены к одному из выводов накопительных конденсаторов. С учетом выше сказанного эквивалентная схема ГИН приобретает вид, показанный на рис. 5.

В исходном состоянии, т.е. до коммутации, все емкости C_c разряжены, все накопительные конденсаторы C заряжены до напряжения U_0 , половина емкостей $C_3/2$ (правая по схеме рис.5) не заряжена, а вторая половина заряжена до напряжения U_0 . Разрядники представлены емкостями C_p , которые заряжены до напряжения U_0 .

Нас интересует, каким образом будет изменяться напряжение на емкостях C_p после включения ключа «К» (т.е. после срабатывания первого разрядника). Для простоты будем считать, что все емкости связи C_c , емкости на «землю» C_3 , и емкости разрядников C_p одина-ковы между собой, причем $C >> C_c$, C_3 , C_p .



Рис. 5. Эквивалентная схема ГИН с учетом конструктивных емкостей

Анализ переходных пронессов в такой эквивалентной схеме может быть выполнен различными методами. В данном случае воспользуемся методом эквивалентного источника, хорошо известного из курса электротехники. Суть метода состоит в следующем: напряжения и токи в цепи после коммутации ΜΟΓΥΤ быть найдены как сумма двух составляющих. Одна из них - это токи или напряжения, которые будут в цепи при разомкнутом ключе, условно продолженные на время после коммутации. Вторая – равна токам или напряжениям, которые по-

лучаются в цепи при воздействии на нее источника ЭДС, включенного вместо коммутатора, и ЭДС которого равна напряжению на разомкнутом коммутаторе, при этом начальные условия на всех реактивных элементах равны нулю, и все источники в цепи отсутствуют.

Нас интересуют напряжения на емкостях C_p , т.е. напряжения на разрядниках. Первая составляющая этого напряжения равна U_0 и для t > 0 остается постоянной. Чтобы найти вторую составляющую, необходимо принять, что все емкости разряжены и $E_3 = 0$, а вместо ключа «К» включен источник ЭДС с $E = U_0\eta(t)$, где $\eta(t)$ — единичная функция. Полярность источника Е такая же, как и полярность напряжения на разомкнутом ключе «К» при t > 0.

Поскольку $C >> C_c$, C_3 , C_p , то для нахождения второй составляющей напряжения на C_p с учетом сказанного получим следующую эквивалентную схему (рис. 6).



напряжения на емкости Ср

Если считать, что источник e(t) идеальный, т.е. обладает бесконечной мощностью, и в момент времени t = 0 все емкости мгновенно заряжаются, то для начального момента времени после коммутации (t = 0) схему можно представить в виде, показанном на рис. 7.



Рис. 7. Упрощенная схема замещения для начальных моментов времени

Для нахождения напряжения на разряднике второго каскада цепочку емкостей последующих каскадов (на рис. 7 справа от первого звена) можно заменить одной эквивалентной емкостью C'_3 , и тогда схема приобретает вид, показанный на рис. 8.

В приближении длинной цепочки емкостей, соответствующей многокаскадному ГИН,

$$C'_{3} = \frac{1}{2}C_{3}\left(1 + \sqrt{1 + 4\frac{C_{p} + C_{c}}{C_{3}}}\right) \approx (1 \div 2)C_{3}$$



Рис. 8. Упрощенная схема замещения после приведения цепочки емкостей к одной эквивалентной емкости C'_3

Примем для упрощения, что приведенная емкость $C'_{3} \approx C_{3}$. Тогда искомая вторая составляющая напряжения на втором разряднике будет изменяться по следующему закону: $U_{22}(t) \approx$

$$\approx U_0 \frac{C_3}{C_c + C_p + C_3} e^{-\frac{t}{\tau}}$$
, где постоянная времени $\tau = (C_c + C_p + C_3)R/2$.

С учетом первой составляющей суммарное напряжение на разряднике будет равно

$$U_{0} + U_{0} \frac{C_{3}}{C_{c} + C_{p} + C_{3}} e^{-\frac{t}{\tau}} = U_{0} \left(1 + \frac{C_{3}}{C_{c} + C_{p} + C_{3}} e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

График, изображённый на рис. 9, качественно иллюстрирует характер изменения напряжения на разряднике.

Рис. 9. Характер изменения напряжения на втором разряднике при включении первого разрядника ГИН. График соответствует соотношению емкостей $C_3/(C_3 + C_c + C_p) = 0,5$, при этом амплитуда напряжения на разряднике достигает 1,5 U_0 , зарядное напряжение $U_0 = 0,8 U_{cn}$



Проведенный анализ, хотя и является приближенным, позволяет тем не менее сделать ряд важных выводов:

• наличие распределенных конструктивных емкостей приводит к тому, что напряжение на втором разряднике не остается постоянным при пробое первого разрядника и скачком возрастает

до напряжения, равного $U_0 \left(1 + \frac{C_3}{C_c + C_p + C_3} \right);$

• скачок напряжения зависит только от отношения распределенной емкости каскада на «землю» к сумме конструктивных емкостей связи, разрядника и емкости на «землю». Чем больше емкость C_3 по сравнению с ($C_c + C_p$), тем больше этот скачок напряжения;

• увеличение емкости между каскадами, *C*_c, приводит к уменьшению этого скачка;

• с течением времени напряжение на разряднике уменьшается с постоянной времени $\tau = (C_3 + C_p + C_c) R/2.$

Максимальное напряжение на втором разряднике может достигать $2U_0$ при выполнении условия $C_3 = C_p + C_c$. При одновременном пробое двух первых разрядников напряжение на третьем разряднике в начальный момент времени t = 0 окажется равным

$$U_0 + 2U_0 \frac{C_3}{C_c + C_p + C_3}$$
,

а его максимально возможное значение при $C_3 \gg C_p + C_c$ будет равно $3U_0$.

Однако в реальных конструкциях ГИН обеспечить выполнение условия $C_3 = C_p + C_c$ практически невозможно, по крайней мере, в высоковольтных каскадах. Кроме того, зарядка паразитных емкостей ГИН происходит не скачком, а с некой постоянной времени, определяемой индуктивностью цепей их зарядки во время переходного процесса. Поэтому при такой простейшей покаскадной компоновке, как показывает анализ соответствующей ей схемы замещения ГИН, реальные перенапряжения на разрядниках оказываются небольшими. ГИН такого типа работают неустойчиво, имеют малый диапазон зарядного напряжения U_0 , при котором возможно управляемое включение, что приводит к малой надежности ГИН (т.е. большой вероятности самопроизвольного срабатывания).

1.3.4. ГИН с черезкаскадной зарядкой

Простым и достаточно эффективным путем повышения перенапряжения на разрядниках без существенных изменений схемы ГИН является использование так называемой черезкаскадной зарядки конденсаторов ГИН. Суть ее, как можно видеть из схемы, приведенной на рис. 10, состоит в замене двух цепочек (колонн) зарядных резисторов R двумя парами колонн, причем одна пара из них обеспечивает зарядку конденсаторов нечетных каскадов, а другая – четных каскадов.



Рис. 10. Схема ГИН с черезкаскадной зарядкой

Переходной процесс для ГИН с такой схемой зарядки конденсаторов в начальные моменты времени после управляемого включения первого разрядника практически ничем не отличается рассмотренного выше для ОТ простейшей схемы ГИН с покаскадной зарядкой. Скачок напряжения на втором и последующих разрядниках также определяется соотношением распределенных конструктивных емкостей С₃ и Сс, Ср. Однако в дальнейшем по мере перезаряда этих емкостей напряжение на разряднике не спадает, а, наоборот, увеличивается, приближаясь к своему предельному значению $2U_0$.

Анализ переходного процесса при включении первого разряд-

ника, проведенный в рамках тех же допущений, что и ранее, приводит к следующему выражению для напряжения на втором разряднике:

$$U_{p2}(t) \approx U_0 + U_0 \left(1 - \frac{C_p + C_c}{C_c + C_p + C_3} e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

где $\tau = (C_3 + C_c + C_p) R/2$.

Начальный скачок напряжения на разряднике при t = 0:

$$U_{p2}(0) \approx U_0 + U_0 \left(1 - \frac{C_p + C_c}{C_c + C_p + C_3} \right) = U_0 + U_0 \frac{C_3}{C_c + C_p + C_3},$$

т.е. в точности такой же, как для рассмотренного выше варианта простейшего ГИН с покаскадной зарядкой. Зато в последующие моменты времени, напряжение возрастает с постоянной времени τ до $2U_0$. Поэтому ГИН с такой схемой зарядки оказывается работо-способным даже при «плохой» с точки зрения соотношения распределенных емкостей компоновкой.

1.3.5. Усовершенствование ГИН путем изменения топологии размещения элементов

Понимание роли конструктивных («паразитных») емкостей и их влияния на величину перенапряжения на разрядниках позволяет по иному взглянуть на размещение элементов ГИН и попытаться усовершенствовать его конструкцию с точки зрения улучшения управляемости.

При простой покаскадной компоновке сделать это трудно, поскольку существенно увеличить емкость на «землю» C_3 в высоковольтных каскадах не удается – расстояние до корпуса должно быть достаточно большим для обеспечения электрической изоляции ГИН на высокое импульсное напряжение, появляющееся при его срабатывании. В то же время плотная покаскадная компоновка ГИН с малыми расстояниями между конденсаторами (необходимая толщина изоляции определяется только зарядным напряжением) приводит к большим межкаскадным емкостям и, соответственно, малым перенапряжениям на разрядниках.

Одно из возможных решений задачи достигается расположением конденсаторов в два ряда, как показано на рис. 11.

При таком расположении конденсаторов емкость между соседними каскадами становится малой: $C_{\rm c} < C_{\rm p}, C_{\rm 3}$, однако сильно увеличивается черезкаскадная емкость, т.е. емкость связи через один каскад $C_{\rm c2}$.

Проведя такой же анализ переходных процессов, какой был выполнен выше для ГИН с простым последовательным расположением конденсаторов, получим, что после включения первого разрядника суммарное напряжение на втором разряднике будет изменяться по следующему закону:

$$U_{p2} = U_0 + U_0 \frac{C_3 + C_{c2}}{C_3 + C_{c2} + C_p} e^{-t/\tau} = U_0 \left(1 + \frac{C_3 + C_{c2}}{C_3 + C_{c2} + C_p} e^{-t/\tau} \right),$$

откуда следует, что в первый момент времени амплитуда напряжения на втором разряднике достигает величины, равной

| $U_{\rm p2} = U_0 \left(1 + \frac{C_3 + C_{\rm c2}}{C_3 + C_{\rm c2} + C_{\rm p2}} \right)$ | -) | • |
|--|----|---|
|--|----|---|



Рис. 11. Схема расположения конденсаторов ГИН для уменьшения межкаскадной емкости

Поскольку для выбранной компоновки сравнительно легко реализуется условие $C_{c2} + C_3 = C_p$, то суммарное напряжение на втором разряднике приближается к максимально возможному значению, равному $2U_0$.

Таким образом, изменение только компоновки каскадов ГИН приводит к значительному расширению диапазона зарядных напряжений, при которых обеспечивается работоспособность ГИН.

Второе достоинство такого расположения каскадов состоит в том, что разрядный контур ГИН имеет зигзагообразную (бифилярную) форму, которая имеет при том же числе каскадов ГИН меньшую индуктивность. Это позволяет повысить мощность ГИН за счет уменьшения его характеристического сопротивления.

Результаты анализа различных вариантов позволяют сделать вывод, что введение дополнительных связей через один и более каскадов приводит к увеличению перенапряжения на разрядниках. Причем эти связи могут быть выполнены с использованием дополнительных высоковольтных конденсаторов помимо распределенных конструктивных емкостей. Возможна также организация резистивных связей, охватывающих большое число каскадов. В этом случае связи каскадов оказываются принудительными, и компоновка ГИН уже не имеет решающего значения, как в рассмотренных примерах.

1.3.6. ГИН с биполярной зарядкой

В рассмотренных примерах количество каскадов в ГИН и количество разрядников совпадают. Сократить вдвое число разрядников позволяет схема ГИН с биполярной зарядкой.

Простейший вариант схемы ГИН с биполярной зарядкой показан на рис. 12. По существу, каждый каскад ГИН состоит из двух последовательно соединенных конденсаторов, которые заряжаются одинаковым по величине, но разным по знаку напряжением относительно средней точки каскада с нулевым во время зарядки потенциалом. Соответственно, суммарное напряжение одного каскада составляет $2U_0$, и это удвоенное напряжение приложено к коммутирующим разрядникам. Таким образом, сокращение числа разрядников вдвое достигается за счет двукратного увеличения их рабочего напряжения.

Переходные процессы в такой схеме ГИН ничем не отличаются от процессов, рассмотренных ранее для ГИН с униполярной зарядкой. Величина перенапряжения на разрядниках полностью определяется соотношением «паразитных» емкостей. Соответственно, улучшить управляемость можно введением емкостных или резистивных связей через один и более каскадов, в частности, путем использования черезкаскадной зарядки конденсаторов ГИН, аналогично тому, как это было показано на рис. 8 для ГИН с униполярной зарядкой. По этим соображениям в ряде установок используется зигзагообразная компоновка ГИН. Причем зигзаг может включать в себя несколько каскадов. Это позволяет существенно увеличить перенапряжения на разрядниках за счет использования как резистивных, так и емкостных связей через несколько каскадов. При этом роль резистивных связей могут выполнять зарядные сопротивления, а емкостных связей – конструктивные («паразитные») емкости, образованные близлежащими элементами соответствующих каскадов. Дополнительно к этому используется управляемый запуск первых нескольких разрядников, что приводит к увеличению перенапряжения на остальных разрядниках. В совокупности все это расширяет диапазон управляемости генератора и уменьшает время срабатывания ГИН.



Рис. 12. Схема ГИН с биполярной зарядкой

В качестве примера на рис. 13 показана схема ГИН сильноточных ускорителей «Гермес-1» и «Гермес-2» (Лаборатория "Сандия", США). Первоначально она была отработана при создании ГИН ускорителя «Гермес-1» (напряжение в ударе 4 MB, запасенная энергия 100 кДж). Позднее по аналогичной схеме был собран значительно более мощный ГИН сильноточного ускорителя «Гермес-2», который является одним из самых высоковольтных генераторов по схеме Аркадьева–Маркса. Изначально предполагалось получить на его выходе напряжение 18 MB, однако из-за проблем с электроизоляцией рабочее напряжение не превышает 13 MB.



Рис. 13. Схема ГИН с биполярной зарядкой и комбинированными связями на конструктивных емкостях установок "Гермес-1" и "Гермес-2"

Надежная работа ГИН с неуправляемыми двухэлектродными разрядниками достигается наличием комбинированных связей при зигзагообразном расположении каскадов и одновременным запуском первых трех управляемых разрядников. При включении трех разрядников в нижнем ряду напряжение на четвертом разряднике стремится к $8U_0$. Из-за наличия «паразитных» емкостей C_c и C_p начальный скачок на этом разряднике будет меньше $8U_0$, его величина определяется следующим соотношением:

$$U_{\rm p4} = 8U_0 \frac{C_{\rm c}}{C_{\rm p} + C_{\rm c}} < 8U_0 \,.$$

В последующие моменты времени напряжение на разряднике нарастает с постоянной времени $\tau \approx C_p R$ до уровня $8U_0$.

Приведем основные параметры ГИН установки "Гермес-2". Рабочее напряжение зарядки $U_0 = 73$ кВ, запасаемая энергия W = 0,5 МДж. Каждая накопительная емкость составлена из двух параллельно соединенных конденсаторов емкостью 0,5 мкФ каждый; ударная емкость ГИН $C_{yg} = 5,38$ нФ. ГИН содержит 93 разрядника, емкость разрядника $C_p = 45$ пФ, конструктивная емкость связи каскадов $C_c = 190$ пФ, емкость каскада на землю $C_3 \le 10$ пФ. Время включения ГИН ~ 2 мкс.

ГИН смонтирован в баке диаметром 6 м и длиной около 12 м, заполненном трансформаторным маслом. Минимальное расстояние от структуры ГИН до стенки бака ~1,2 м.

1.3.7. Генераторы с трехэлектродными разрядниками

Трудности получения высоких перенапряжений на неуправляемых разрядниках ГИН, сильная зависимость величины перенапряжения от конструктивных емкостей, иными словами, от топологии размещения элементов ГИН, предопределили использование управляемых разрядников в качестве коммутирующих элементов во всех каскадах ГИН. Необходимое для управления разрядников импульсное напряжение формируется резистивными или специально введенными емкостными связями на высоковольтных конденсаторах с предыдущими каскадами. Такое решение задачи практически исключает зависимость величины перенапряжения на промежутках разрядников от расположения конденсаторов и других элементов ГИН. В первую очередь, оно определяется схемой включения разрядников, а именно, способом их управления.

Наиболее часто в качестве управляемых разрядников используются трехэлектродные разрядники с управляющим электродом в виде тонкого диска с отверстием, расположенного посередине между двумя основными электродами. В литературе разрядники такого типа получили название «разрядники с искажением поля».

Это название призвано подчеркнуть роль эффекта искажения поля в управлении разрядником, т.е. инициирования пробоя промежутка в результате увеличения напряженности поля на внутренней кромке среднего электрода при изменении его потенциала относительно начального, соответствующего среднему потенциалу между основными электродами разрядника. При подаче на управляющий электрод скачка напряжения (управляющего импульса), достаточного для инициирования пробоя, сначала происходит пробой между средним и одним из основных электродов, а затем второго промежутка и, соответственно, всего разрядника.

На рис.14 показаны схема и внешний вид разрядника T-508A, который серийно производится компанией Physics International, доступен и используется в конструкциях ГИН многих установок, в том числе «Сатурн» и PBFA-Z.



Рис. 14. Схема и внешний вид разрядника Т-508А: 1, 2 – основные электроды, 3 – управляющий (средний) электрод

Основные электроды полусферической формы, R = 25,4 мм, изготовлены из латуни, средний электрод – тонкий диск из нержавеющей стали или латуни с отверстием Ø 25 мм. Промежуток между основными электродами d = 25,4 мм. Рабочее напряжение – до 200 кВ при заполнении элегазом (SF₆).

К настоящему времени разработано много вариантов схем ГИН с управляемыми разрядниками, которые отличаются между собой

типом связи управляющего электрода разрядника с предыдущими каскадами. Рассмотрим примеры схемотехнических решений для ГИН ряда установок.

На рис. 15 показана схема ГИН ускорителя «ЭРГ» (ФИАН, Москва).



Рис. 15. Схема ГИН сильноточного ускорителя «ЭРГ» ФИАН: R – зарядные межкаскадные сопротивления, $R_{\rm 3ap}$ – токоограничивающие зарядные сопротивления, $R_{\rm y}$ – сопротивления связи в цепи управляющих электродов разрядников, P – искровые разрядники, $P_{\rm T}$ – тригатрон, $C_1 \div C_{30}$ – накопительные емкости, $Z_{\rm H}$ – сопротивление нагрузки, Тр. – импульсный трансформатор, I, 2 – первичная и вторичная обмотки трансформатора

ГИН включает в себя 15 каскадов, в каждом из которых установлены два конденсатора ИК100-0,4 (0,4 мкФ, 100 кВ). Зарядка ГИН – биполярная покаскадная. Первый разрядник ГИН – тригатронного типа, все остальные – трехэлектродные разрядники с управляющим средним электродом. Поджиг тригатрона осуществляется импульсом от внешнего генератора. Для поджига первого из трехэлектродных разрядников используется напряжение со вторичной обмотки высоковольтного импульсного трансформатора, первичная обмотка которого включена между корпусом ГИН и средней точкой первого каскада. Напряжение на ней появляется сразу после срабатывания тригатрона. Остальные трехэлектродные разрядники пробиваются под действием перенапряжений, возникающих за счет резистивных связей между средними электродами всех разрядников. Максимальное перенапряжение на разрядниках при таком включении – двукратное.

1.3.8. Особенности ГИН многомодульных установок

Для повышения мощности генераторов импульсов используется параллельное включение нескольких модулей. Повышение мощности единичных генераторов оказалось нецелесообразным. Практика разработки генераторов максимально высокой мощности пошла по пути параллельного соединения большого числа генераторов сравнительно небольшой мощности. Это существенно облегчило решение многих задач, упростило технологию изготовления и сборки однотипных узлов. Основным условием, определяющим возможность реализации параллельного включения генераторов на общей нагрузке, является условие синхронной работы отдельных модулей.

Параллельная работа нескольких ГИН, подключенных к общей нагрузке, возможна при условии их включения в течение времени, когда рост напряжения на нагрузке еще не снижает напряжения на разрядниках выходных каскадов. Иными словами, разброс времени срабатывания отдельных ГИН должен быть существенно меньше времени нарастания напряжения на нагрузке. Для ГИН, используемых в качестве первичных емкостных накопителей энергии для последующей зарядки промежуточных накопителей, характерное время передачи энергии не превышает единиц микросекунд, типичное время $t \approx 1-2$ мкс. В течение этого времени происходит нарастание напряжения на нагрузке. Следовательно, для устойчивой работы нескольких параллельных модулей необходимо, чтобы разброс времени включения не превышал нескольких десятков наносекунд. А это означает, что само время включения, т.е. запаздывание появления выходного сигнала относительно пускового должно быть малым.

Рассмотрим технические решения, обеспечивающие выполнение этих условий на примере установок «Ангара-5» и «Гамма».

ГИН установки «Ангара-5»

Установка «Ангара-5» состоит из восьми модулей формирования наносекундных импульсов, работающих синхронно на общую нагрузку. В состав каждого модуля входят: генератор импульсного напряжения с номинальным запасом энергии 200 кДж, водяная двойная формирующая линия, водяная передающая линия и выходной изолятор, отделяющий вакуумную передающую линию от передающей линии с водой. ГИН одного модуля состоит из трех параллельно включенных ветвей (секций), которые помещены в общий бак диаметром 3 м и длиной 7 м, заполненный трансформаторным маслом. Всего в ГИН используется 168 конденсаторов ИК-100–0,4. Внешний вид ГИН одного модуля показан на рис. 16. Схема одной ветви ГИН установки «Ангара-5» приведена на рис. 17.



Рис. 16. Внешний вид ГИН одного модуля установки «Ангара-5»



Рис. 17. Схема одной ветви ГИН модуля установки «Ангара-5»

Схема зарядки – биполярная, черезкаскадная. Все разрядники, за исключением первого и выходного, управляемые трехэлектродные с «искажением поля». Зависимое включение разрядников с более чем четырехкратным перенапряжением на искровых промежутках осуществляется с помощью резистивных связей (R_v) между средними электродами разрядников через два каскада ГИН. При таком включении оказываются связанными между собой общей колонной резисторов управляющие электроды нечетных разрядников и отдельно, другой аналогичной колонной, управляющие электроды четных разрядников. Конструктивно разрядники четных и нечетных каскадов и соответствующие им колонны резисторов, включая зарядные, разнесены по разным сторонам колонны конденсаторов ГИН. Управляющее напряжение от внешнего генератора запуска с амплитудой около 100 кВ подается на колонну резисторов четных разрядников, колонна резисторов нечетных разрядников через дополнительное сопротивление заземлена (соединена с общей шиной).

На рис. 18 показано расположение элементов ГИН в баке. Три параллельные ветви ГИН расположены на трех уровнях изоляционного стола (этажерки). Все зарядные резисторы, разрядники, резисторы связи вынесены на боковые стороны ГИН. На рис.18 хорошо видны все три яруса разрядников и жидкостных резисторов (зарядных и резисторов связи), соответствующих трем параллельным ветвям ГИН.



Рис. 18. Размещение элементов ГИН внутри бака

Конструкция используемых в ГИН разрядников модели Р-200 на максимальное напряжение 200 кВ схематично показана на рис. 19. Основные электроды разрядника имеют рабочую поверхность тороидальной формы. Благодаря этому обеспечивается большой ресурс работы. Наружный диаметр основных электродов 80 мм, внутренний – 40 мм (малый радиус тороида 10 мм). Управляющий электрод – диск толщиной 1 мм с отверстием диаметром 60 мм. Все электроды изготовлены из нержавеющей стали. Конструкция разрядника имеет высокую механическую прочность, допускающую его работу в широком диапазоне давлений газа, вплоть до 10 атм.
Рис. 19. Конструкция разрядника P-200: I – основной электрод, 2 – управляющий электрод (диск с отверстием), 3 – изоляционный корпус





Многосекционный ГИН установки «Гамма»

Генератор импульсного напряжения сильноточного микросекундного ускорителя «Гамма» (ИСЭ, г.Томск) состоит из 22 секций, включенных параллельно на общую нагрузку. Ударная емкость ГИН $C_{yg} = 0,264$ мкФ, индуктивность $L_{\Gamma И H} = 1,7$ мкГн. При максимальном зарядном напряжении $U_0 = 85$ кВ энергозапас ГИН составляет 1,04 МДж, выходное напряжение (напряжение «в ударе») – 2,8 МВ.

Отдельная секция ГИН содержит 33 каскада и собрана на конденсаторах ИК-100-0,4 (по одному в каждом каскаде). Емкость секции «в ударе» 12 нФ, индуктивность – 12 мкГн, запасаемая энергия 47,5 кДж при $U_0 = 85$ кВ. Полная схема одной секции показана на рис. 20.

Схема зарядки – однополярная, покаскадная. Коммутирующие разрядники – трехэлектродные двухзазорные со сферическими электродами диаметром 40 мм. Первый разрядник – пусковой, для расширения диапазона управляемости и повышения стабильности запуска выполнен трехзазорным с четырьмя электродами, потенциалы которых в исходном состоянии равны соответственно 0, $U_0/4$, $U_0/2$ и U_0 . Кроме того, для предварительной УФ-подсветки



Рис. 20. Электрическая схема одной секции ГИН установки «Гамма»: $R_{\rm d}$ – делитель напряжения, $R_{\rm m1,2,3}$ – измерительные токовые шунты, $P_{\rm n}$ – пусковой разрядник, $C_{\rm n}$ – пусковая емкость, $R_{\rm H}$ – сопротивление нагрузки, $L_{\rm H}$ – индуктивность нагрузки, C – накопительная емкость (0,4 мкФ, 100 кВ), $C_{\rm cB}$ – емкости связи, C_1 , C_2 – емкости между конденсаторами, C_3 , C_4 – емкости каскадов на землю и емкости между экранами каскадов, L – собственные индуктивности накопительных конденсаторов (150 нГн), L_1 и L_2 – индуктивности выводов (150 нГн), L_0 – конструктивная индуктивность (0,45 мкГн), P_0 , P'_0 – пусковые (уменьшенные вдвое) промежутки первого разрядника, P_1 и P_2 – основные искровые промежутки, K_0 – коммутатор подсветки

промежутка пускового разрядника используется дополнительный разрядник K_0 . Перенапряжение на основных разрядниках обеспечивается емкостными связями средних электродов с предыдущими каскадами. При показанных на схеме цепях связи, после срабатывания первого разрядника напряжение на зазоре P_1 второго разрядника увеличивается втрое по сравнению с исходным состоянием. При пробое зазора P_1 второго разрядника напряжение на конденсаторе C_{cB1} за счет «резонансной» перезарядки на «паразитных» индуктивностях может увеличиться до $U_{C_{cB1}} \approx -2,5 U_0$ и тогда на зазоре P_2 второго разрядника может быть достигнуто в идеальном

случае пятикратное увеличение напряжения. Это обеспечивает высокую стабильность срабатывания первых каскадов ГИН.

Одной из особенностей конструкции разрядников является размещение их всех в общем цилиндрическом корпусе (колонне) из полиэтиленовой трубы с внутренним диаметром 140 мм. Благодаря взаимной подсветке УФ-излучением искровых промежутков достигается высокая временная стабильность коммутации, необходимая для использования секции в многосекционном ГИН с большим энергозапасом.

Все секции ГИН смонтированы в общем металлическом баке, имеющем форму усеченной пирамиды и заполненном трансформаторным маслом. Высота бака 6,5 м, размер нижнего основания $4,7 \times 4,7$ м², верхнего – $3,5 \times 3,5$ м².

Нагрузкой ГИН служит сильноточный диод со срезающим разрядником, с помощью которого формируется квазипрямоугольный импульс ускоряющего напряжения.

По аналогичной схема были построены 6-, 12-, 20- и 33-каскадные модификации ГИН для различных применений.

1.4. Генераторы импульсного напряжения – формирователи мощных высоковольтных импульсов микросекундной длительности

Генерация квазипрямоугольных мощных высоковольтных импульсов микросекундной длительности не встречает принципиальных трудностей. Разработанные к настоящему времени схемы генераторов с емкостными накопителями энергии базируются, в основном, на различных модификациях генераторов Аркадьева– Маркса. Они широко используются в экспериментальной технике, в частности, для питания диодов ускорителей сильноточных электронных пучков микросекундной длительности. Основными требованиями к таким генераторам являются следующие:

 импульс напряжения должен иметь крутой фронт для обеспечения однородности взрывной эмиссии катода и плоскую вершину для получения моноэнергетического пучка;

– основная часть запасенной в ГИН энергии должна быть передана в пучок на плоском участке импульса;

– влияние изменения импеданса диода во времени на форму импульса должно быть минимальным.

Рассмотрим основные варианты используемых на практике решений.

1.4.1. Простейший вариант на базе ГИН

Для получения микросекундных импульсов может быть использован обычный ГИН с практически любым схемотехническим решением, обеспечивающим его устойчивую работу в требуемом диапазоне напряжений. Отметим, что такой вариант решения задачи широко использовался на первых порах освоения микросекундного диапазона сильноточных электронных пучков. При работе ГИН на сильноточный диод с магнитной изоляцией или диод с большим катод-анодным промежутком для получения ленточного пучка большого сечения, для которых выполняется условие $Z_{\rm A} > Z_{\rm ГИН}$, где $Z_{\rm A}$ – импеданс диода, $Z_{\rm ГИН}$ – характеристическое сопротивление (импеданс) ГИН, $Z_{\rm ГИН} = (L_{\rm ГИН}/C_{\rm ГИН})^{1/2}$, $L_{\rm ГИН}$ – полная индуктивность цепи разряда ГИН, а $C_{\rm ГИН} = C_{\rm уд}$ – емкость ГИН в ударе, разряд носит апериодический характер, а импульс напряжения на диоде имеет крутой фронт и пологий экспоненциальный спад.

Улучшить форму импульса, приблизив его к прямоугольному, можно применением срезающего разрядника $P_{\rm cp}$, как показано на рис. 21 (пунктир). Временем включения срезающего разрядника регулируется длительность импульса и, соответственно, величина спада напряжения на вершине.



Рис. 21. Схема формирования квазипрямоугольного импульса с помощью «обычного» ГИН и срезающего разрядника P_{ср} Однако такое решение резко снижает эффективность использования запасенной в ГИН энергии. Например, при формировании таким способом импульсов длительностью $t_{\rm H} \sim 5-10$ мкс с временем нарастания напряжения (фронтом) $t_{\rm p} \leq 1,5$ мкс и допустимым спадом вершины $\Delta U/U \leq 15$ %, в нагрузку передается менее 30 % запасаемой в ГИН энергии, т.е. эффективность генератора $\eta = W_{\rm H}/W_{\rm ГИH} < 0,3$. Тем не менее такой метод применяется на практике.

Для оценки основных параметров импульсов, формируемых ГИН со срезающим разрядником, можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$t_{\rm H} / t_{\rm fp} \approx \Delta U / U Z_{\rm H}^{2} / (L_{\Gamma U \rm H} / C_{\Gamma U \rm H});$$

$$\eta \approx 2 (\Delta U / U) / (1 - \Delta U / U);$$

$$I_{\rm cpe3} \approx 1.5 Z_{\rm H} I_{\rm H} / (L_{\Gamma U \rm H} / C_{\Gamma U \rm H})^{1/2},$$

где $Z_{\rm H}$ – сопротивление нагрузки, например, импеданс сильноточного диода, $I_{\rm H} = U/Z_{\rm H}$ – амплитуда тока нагрузки, $I_{\rm cpe3}$ – ток ГИН после срабатывания срезающего разрядника (ток через срезающий разрядник).

Из этих соотношений легко видеть, что для получения импульсов с $\Delta U/U \leq 0,1$ и $t_{\rm H}/t_{\rm fp} \approx 10$, ГИН должен иметь очень малую индуктивность, а коэффициент использования его энергии не превысит 20 %. Кроме того, ток срезающего разрядника $I_{\rm cpe3}$ может в десятки раз превышать амплитуду тока в нагрузке.

1.4.2. ГИН с корректирующими LC-цепями

В линейных модуляторах широко используется схема формирования прямоугольного импульса с помощью конденсатора и корректирующих *LC*-звеньев. Теория и практика применения таких систем для напряжения ≤ 50 кВ и $P \leq 10^7$ Вт хорошо разработаны и суммированы в ряде монографий и учебников, посвященных системам импульсного питания ВЧ-генераторов. Аналогичные цепи в ряде лабораторий были использованы совместно с ГИН для формирования импульсов ускоряющего напряжения мегавольтного

уровня для сильноточных диодов микросекундного диапазона длительностей.

На рис. 22 приведена схема генератора с двухзвенной цепью коррекции на выходе ГИН.



Рис. 22. Схема формирования квазипрямоугольных импульсов с помощью звеньев коррекции на выходе ГИН

Оптимальные параметры элементов схемы (см. рис. 22) определяются следующими соотношениями:

$$C_1 = 0.4 t_{\text{H}}/R_{\text{H}}; \quad L_1 = 0.135 R_{\text{H}}t_{\text{H}};$$

$$C_2 = 0.54 C_1; \quad L_2 = 0.57 L_1;$$

$$C_3 = 0.89 C_1; \quad L_3 = 0.09 L_1.$$

Такая система позволяет получить импульсы с соотношением $t_{\mu}/t_{\phi} \sim 5-8$ при неравномерности вершины $\Delta U/U \sim 0,1$. Однако она имеет два серьезных недостатка:

• корректирующие элементы конструктивно являются отдельными, остаточно сложными и крупными элементами;

• напряжение на выходе ГИН примерно на 30 % превышает напряжение на нагрузке.

Кроме того, корректирующие элементы имеют установочную энергоемкость ~ 20 % от энергоемкости ГИН, но не используются как накопители энергии.

На рис. 23 показана схема еще одного варианта генератора, с корректирующей *LC*-цепью на полное напряжение, включенной параллельно ГИН, и дополнительной индуктивностью в цепи на-грузки.



Рис. 23. Схема генератора с корректирующими цепями

Оптимальные параметры для схемы рис. 23 можно определить из следующих соотношений:

$$C_1 = 0,4 t_{\text{H}}/R_{\text{H}};$$
 $L_1 = 0,253 R_{\text{H}}t_{\text{H}};$
 $C_2 = 0,042 t_{\text{H}}/R_{\text{H}};$ $L_2 = 0,27 R_{\text{H}}t_{\text{H}}.$

Эта схема не имеет недостатков, характерных для схемы на рис. 2. В качестве индуктивностей L_1 (в цепях с основными накопителями энергии – конденсаторами C_1) можно использовать собственные индуктивности конденсаторов и межкаскадных соединений ГИН. Существенным недостатком схемы является трудность подбора емкостей C_1 и C_2 из имеющейся номенклатуры высоковольтных энергоемких конденсаторов, а также в знакопеременном характере разрядного тока конденсатора C_2 и сравнительно небольшом отношении $t_{\mu}/t_{\phi} \sim 5$ при $\Delta U/U \leq 10$ %.

1.4.3. ГИН – формирователи импульсов

Лучшие результаты можно получить, используя классический метод формирования прямоугольных микросекундных импульсов, основанный на использовании искусственных формирующих линий (ИФЛ). С помощью ИФЛ возможно получение импульсов с очень крутым фронтом ($t_{\rm u}/t_{\rm p} \ge 10$) и практически плоской вершиной $\Delta U/U \le 1$ %.

Для реализации такого метода формирования импульсов каждый каскад ГИН выполняется в виде ИФЛ. При этом возможны два варианта решения задачи – с использованием однородных и неоднородных ИФЛ.

Численный анализ схем формирования прямоугольных импульсов длительностью ≥ 10 мкс, основанных на использовании однородных ИФЛ, показывает, что оптимальные результаты с учетом амплитуды плоской вершины выходного напряжения достигаются при работе ИФЛ на несогласованную нагрузку – если импеданс ИФЛ выбрать в 2-3 раза меньшим приведенного к одному каскаду ГИН импеданса нагрузки:

$$Z_{\rm H\Phi JI} = \sqrt{L/C} \cong (0.3 \div 0.5) \ Z_{\rm H} / n$$

где L и C – индуктивность и емкость звена ИФЛ, n – число каскадов. Для получения крутого фронта и исключения выброса в начале импульса подключать ИФЛ к нагрузке необходимо через корректирующие $L_{\kappa}R_{\kappa}$ - или $R_{\kappa}C_{\kappa}$ -цепи. При этом длительность фронта $\tau_{\phi} \cong 2L_{\Gamma UH}$ / $Z_{\rm H}$ не зависит от длительности импульса $\tau_{\mu} \cong (2k-1)\sqrt{LC}$, где $L_{\Gamma UH}$ – индуктивность разрядного контура ГИН, k – число ячеек в ИФЛ. Величина $L_{\Gamma UH}$ может быть сделана достаточно малой ($\leq 0,3-0,4$ мкГн/каскад) при оптимизации конструкции каскадов ГИН и, самое главное, конструкции ошиновки. При использовании корректирующей $L_{\kappa}R_{\kappa}$ -цепи ее оптимальные параметры даются следующими соотношениями: $R_{\kappa} = 2,3 Z_{ИФЛ}$, $L_{\kappa} = 0,85 L$. Допустимые отклонения от этих значений составляют 15–20 %.

Типичная схема ГИН на основе однородных ИФЛ показана на рис. 24.



Рис. 24. Схемы ГИН с однородными ИФЛ:

R – зарядное сопротивление, P – разрядник, R_{κ} и L_{κ} – сопротивление и индуктивность корректирующей цепи, C и L – емкость и индуктивность звена однородной ИФЛ

При разряде ГИН на рассогласованную нагрузку сопротивлением $Z_{\rm H} = (2 \div 3) n Z_{\rm ИФЛ}$ напряжение на индуктивностях звеньев и на корректирующей цепи не превышает 30–35 % зарядного напряжения конденсаторов. В схеме ГИН с однородными и одинаковыми для всех каскадов ИФЛ корректирующие $L_{\rm K} R_{\rm K}$ -цепи каскадов имеют одинаковые параметры элементов. Они могут быть объединены в общую для всего ГИН корректирующую цепь, которая может быть установлена на его высоковольтном выходе или между общей шиной («землей») и первым каскадом ГИН. Последний вариант может быть удобнее по конструктивным соображениям.

При небольшом числе звеньев рассмотренная схема позволяет получить крутой фронт импульса $(\tau_{\phi}/\tau_{\mu} \le 0.05 \div 0.1)$ и неоднородность вершины ~ 5 %. Длительность вершины можно менять переключением числа звеньев. Эффективность ГИН (отношение энергии в плоской части импульса к накопленной) из-за рассогласованного режима работы (сопротивление нагрузки $Z_{\mu} = 3nZ_{\mu\Phi J}$) умень-

шается только на 20 % и остается на уровне ~ 65 %. С другой стороны, рассогласование повышает в 1,5 раза выходное напряжение (т.е. в полтора раза повышается использование зарядного напряжения). Кроме того, при изменении импеданса нагрузки за время импульса в два раза относительный спад вершины импульса не превышает 12 %, а при согласованной нагрузке такое изменение приводит к спаду \approx 35 %.

Такое схемотехническое решение было использовано при создании ряда специализированных сильноточных ускорителей электронов с длительностью импульсов от 5 до 40 мкс, разработанных и построенных в ФИАН (г. Москва), МРТИ (г. Москва), НИИЭФА (г. С.-Петербург), МИФИ (г. Москва).

На рис.25 показана фотография 10-каскадного ГИН на базе однородных ИФЛ с $t_{\mu} = 10$ мкс открытой конструкции с воздушной изоляцией. Каждый каскад ГИН представляет собой 6-звенную однородную ИФЛ, собранную на шести конденсаторах ИК-100-0,4.



Рис. 25. Внешний вид 10каскадного ГИН на основе 6звенных однородных ИФЛ на длительность 10 мкс. Конденсаторы звеньев типа ИК-100-0,4

Конденсаторы расположены горизонтально на изоляционных полках, окруженных градиентными электродами, хорошо видимыми на рис. 25.

По аналогичной схеме был разработан ГИН установки «С-4» (Стенд-4, МРТИ) на напряжение 1,8 МВ и длительность импульса до 10 мкс (номинальная энергоемкость $W_{\Gamma U H} \approx 300$ кДж), предназначенный лля питания электронного диода. ГИН состоит из 28 каскадов, каждый из которых содержит шесть конденсаторов ИК-100-0,4. Каскады ГИН выполнены в виде 3-звенных ИФЛ, общая для всех каскадов LR корректирующая цепь включена между корпусом (землей) и первым каскадом. ГИН смонтирован в цилиндрическом баке диаметром около 3 м и заполнен трансформаторным маслом. В качестве конструктивной основы ГИН (корпус, элементы крепления, разрядники) был использован ГИН одного модуля установки «Ангара-5». Вид структуры ГИН, извлеченной из бака, показан на рис. 26.



Рис. 26. Структура 10-мкс ГИН с масляной изоляцией на напряжение 1,8 МВ на основе 3-звенных ИФЛ установки «С-4» МРТИ

На рис. 27 показана схема ГИН с неоднородными ИФЛ, который использован в ускорителе СИД (НИИЭФА, г. С.-Петербург).

Одной из особенностей этого ускорителя является объединение диода с магнитной изоляцией и соленоида, создающего магнитное поле, в единую конструкцию, питаемую от общего ГИН. Поэтому для построения ГИН выбрана схема неоднородной 4-звенной ИФЛ.

Параметры ИФЛ подбирались с помощью численных расчетов. В качестве нулевого приближения при расчетах брались значения индуктивности ячеек L_m ($m = 1 \div 4$) для гиперболической ИФЛ, обеспечивающей формирование прямоугольного импульса на активной нагрузке, шунтированной индуктивностью:

$$L_{m} = \frac{L_{\mu_{3}}^{2}}{C Z_{\mu}^{2}} \left\{ \left(1 + \frac{3 C Z_{\mu}^{2}}{L_{\mu_{3}}} m\right)^{1/3} - \left(1 + \frac{3 C Z_{\mu}^{2}}{L_{\mu_{3}}} (m-1)\right)^{1/3} \right\}^{2}.$$



Рис. 27. Схема ГИН с неоднородными ИФЛ:

 C_1-C_4 и L_1-L_4 – емкости и индуктивности звеньев неоднородной ИФЛ; C_{κ} – корректирующая емкость; Z_{μ} – импеданс диода; L_{μ_3} – индуктивность изолирующего соленоида; C_0 – емкость диода; CP – срезающий разрядник; R_3 и C_3 –цепь запуска срезающего разрядника CP

Коррекция формы импульса осуществляется $R_{\kappa}C_{\kappa}$ -цепями. В качестве емкостей *C* и C_{κ} используются конденсаторы типа ИК-100-0,4 и ИК-100-0,25. В расчетах учитывались индуктивность разрядной цепи ГИН и емкость диода C_0 .

Спад импульса формировался срезающим разрядником *CP* (см. рис.27). Запуск *CP* происходит после срабатывания запускающего разрядника *3P*. Задержка срабатывания *3P* определяется постоянной времени заряда цепи R_3C_3 и легко варьируется изменением R_3 или зазора *3P*. В соответствии с результатами расчета импульс ускоряющего напряжения этой установки имел плоскую вершину длительностью 25 мкс.

1.5. Промежуточные емкостные накопители энергии. Формирующие линии

Само название «промежуточные» накопители определяет их функциональное назначение и место в структуре генераторов. Вместе со своим коммутатором промежуточный накопитель представляет собой очередное звено компрессии энергии во времени, т.е. усиления мощности, следующее за первичным каскадом. В зависимости от требуемой степени компрессии в схеме генератора могут присутствовать как несколько, так и один промежуточный емкостной накопитель. В последнем случае он является выходным каскадом генератора и, как правило, выполняет одновременно функции накопления энергии и формирования импульсов с заданными параметрами.

Принципиальным отличием режима работы промежуточных накопителей является импульсная зарядка за сравнительно короткое время: от единиц – десятков микросекунд для первого из промежуточных накопителей до сотен и менее наносекунд для последних (выходных) каскадов. Это в корне изменяет электротехнические решения, лежащие в основе их конструкций. Как правило, промежуточные емкостные накопители выполняются в виде конструктивных распределенных емкостей на полное рабочее напряжение. Возможность такого технического решения во многом определяется ростом электропрочности диэлектриков при кратковременном действии напряжения и, соответственно, возможностью увеличения плотности запасаемой в электрическом поле энергии. Благодаря этому удается для заданного рабочего напряжения заметно уменьшить поперечные размеры накопителя, что, в конечном счете, приводит к увеличению плотности потока энергии на его выходе. При этом в качестве электрической изоляции в них могут использоваться диэлектрики с высоким значением диэлектрической проницаемости и с относительно большой проводимостью, совершенно непригодные для длительного накопления энергии, например, вода. Поэтому далее мы рассмотрим основные характеристики диэлектриков, наиболее часто используемых для изоляции емкостных накопителей, и зависимости их свойств от времени действия напряжения.

1.5.1. Основные характеристики и свойства диэлектриков, используемых в промежуточных накопителях энергии

При выборе типа диэлектрика приходится учитывать широкий круг вопросов, связанных с его использованием в конструкции генератора. Среди них определяющими являются электротехнические характеристики (электрическая прочность, плотность запасаемой энергии и др.), технологичность, стоимость необходимого для эксплуатации дополнительного оборудования, а также изменение свойств после возможного пробоя.

В большинстве конструкций генераторов мощных высоковольтных импульсов в качестве изолирующей среды промежуточных накопителей используются жидкие диэлектрики. Они могут принимать любую форму и целиком заполнять пространство формирующей линии, после пробоя восстанавливают свою электрическую прочность, легко заменяются или удаляются из накопителя при его ремонте или профилактике. Из жидких диэлектриков в конструкциях промежуточных емкостных накопителей нашли применение:

- трансформаторное масло, ($\varepsilon \approx 2,2$),
- касторовое масло, ($\epsilon \approx 4,5$),
- глицерин, (ε≈40),
- деионизованная вода, ($\epsilon \approx 81$).

Наиболее часто из них используются трансформаторное масло и вода.

Обезгаженная и очищенная ионообменными смолами вода является удобным и энергоемким жидким диэлектриком, что обусловливает ее широкое применение, в первую очередь, в формирующих линиях с низким волновым сопротивлением. Основная трудность, связанная с использованием воды, это ее высокая проводимость, которая жестко ограничивает время заряда емкостного накопителя с водяной изоляцией.

Напомним, что постоянная времени саморазряда конденсатора $\tau_{cam} = RC$, где R – сопротивление утечки его изоляции, а C – емкость, которая не зависит от его конфигурации, а целиком опреде-

ляется свойствами заполняющего межэлектродный промежуток диэлектрика: $\tau_{cam} = \epsilon \epsilon_0 \rho$, где ρ – удельное сопротивление диэлектрического заполнения. (Это легко проверить, например, для плоского или цилиндрического конденсатора, подставив в выражение $\tau_{cam} = RC$ выражения для емкости и сопротивления изоляции, выраженного через удельное сопротивление.)

Оценим ограничения на времена зарядки накопителей с водой, основываясь на следующих данных, полученных при эксплуатации больших установок. Непосредственно после обработки воды ионообменными смолами, ее удельное сопротивление составляет около 10^7 Ом·см. Спустя некоторое время, в течение которого вода пребывает внутри емкостного накопителя и находится в контакте с элементами его конструкции, оно падает до уровня 10^6 Ом·см. Постоянная времени саморазряда емкостного накопителя при этом $\tau_{\text{сам}} = \varepsilon_0 \rho \approx 7$ мкс. Применение непрерывной прокачки воды через ионообменные фильтры позволяет поддерживать удельное сопротивление на уровне (2–3) 10^6 Ом·см. При такой величине удельного сопротивления и допустимых потерях энергии за счет токов утечки не более 10% время зарядки накопителя не должно превышать 1 мкс.

Газовая изоляция имеет малую энергоемкость и поэтому используется редко и в относительно маломощных установках.

Из твердых диэлектриков в промежуточных накопителях применяются майлар (лавсан) ($\varepsilon \approx 3$; $E_{np} = 2-2,6$ MB/см для тонких пленок), полиэтилен ($\varepsilon \approx 2$; $E_{np} = 1,4-1,7$ MB/см), полипропилен ($\varepsilon = 2,1$; $E_{np} = 2$ MB/см).

1.5.2. Электрическая прочность жидких диэлектриков. Формулы Мартина

Импульсная электрическая прочность жидких диэлектриков не является постоянной величиной. Напряженность электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика, зависит от целого ряда факторов, наиболее важными из которых являются время воздействия высокого напряжения, площадь и состояние электродов, наличие примесей. Многочисленные исследования показали, что развитие пробоя начинается с электродов. Для ряда диэлектриков напряженности электрического поля вблизи электродов, при которых развивается пробой, $E_{\rm np}$, неодинаковы для положительного и отрицательного электродов, $E_{\rm np}^+ \leq E_{\rm np}^-$. Это явление получило название эффекта полярности, а диэлектрики, у которых $E_{\rm np}^+ \neq E_{\rm np}^-$, называют полярных диэлектриков, используемых в емкостных накопителях, пробойное электрическое поле на электроде отрицательной полярности $E_{\rm np}^-$ может заметно превышать $E_{\rm np}^+$ на электроде положительной полярности. Значения пробивных напряженности зависят от характера обработки и состояния поверхности электродов. Полировка поверхности и покрытие ее диэлектрическими пленками с высокой электрической прочностью повышают прочность воды и масла на (10–20) %.

Ч.Мартин из Исследовательского центра по разработке ядерного оружия (AWRE, Англия) на основе статистической обработки данных по пробою ряда жидких диэлектриков предложил следующие зависимости пробойной напряженности электрического поля от времени действия напряжения и площади электродов со слабо неоднородным полем:

$$E_{\rm np}^+ = \frac{a^+}{t_{\rm sol}^{1/3}S^{1/10}}, \quad {\rm M} \quad E_{\rm np}^- = \frac{a^-}{t_{\rm sol}^{1/3}S^{1/10}},$$

где E^+ и E^- – пробойные напряженности электрического поля у положительного и отрицательного электродов, соответственно, (MB/см), при которых вероятность пробоя составляет 50 %;

 $t_{\rm s\phi}$ – эффективное время действия напряжения, мкс, в течение которого напряженность электрического поля изменяется от $0.63E_{\rm np}$ до $E_{\rm np}$, (соотношения применимы для $0.1 \le t_{\rm s\phi} \le 1$ мкс);

S – эффективная площадь поверхности электродов, см², на которой напряженность электрического поля $E ≥ 0,9E_{\rm np}$, (соотношения применимы для электродов с $1 < S < 10^6$ см²); a^+ и a^- – числовые коэффициенты, зависящие от типа диэлектрика.

Приведенные зависимости часто объединяют и записывают в общем виде

$$E_{\rm np}^{\pm} = \frac{a^{\pm}}{t_{\rm sp}^{1/3} S^{1/10}},$$

подразумевая соответствие пробойных напряженностей и числовых коэффициентов для положительного и отрицательного электродов.

Ч. Мартином были получены следующие значения коэффициентов a^+ и a^- :

– для воды $a^+ = 0,3$ и $a^- = 0,6$, коэффициент полярности $a^-/a^+ = 2$;

– для трансформаторного масла $a^+ = 0,5$, коэффициент полярности $a^-/a^+ = 1 \div 1,5$;

– для глицерина и касторового масла $a^{\pm} = 0,7$.

Как видно из приведенных данных, коэффициент полярности у воды имеет наибольшее значение и составляет $a^-/a^+ = 2$. Коэффициент полярности у масла имеет значительный разброс и достигает 1,5 (определяется это, в основном, источником (местом) происхождения исходного сырья – нефти, из которой получено масло, для отечественных масел полярность выражена слабо).

В последующий период времени предложенные Ч. Мартином соотношения были многократно проверены и уточнены. В опубликованных работах имеются расхождения полученных данных как для числовых коэффициентов, так и для показателей степени зависимостей от времени и площади, которые, по-видимому, отражают влияние условий проведения конкретных измерений (состояния поверхностей электродов, подготовку воды или других диэлектриков).

Наиболее часто в настоящее время для расчета пробивных напряженностей в системах с большой площадью ($S \ge 1000 \text{ см}^2$) электродов для воды используются следующие уточненные соотношения:

$$E_{\rm np}^{+} = \frac{0.23}{t_{\rm sp}^{0.333} S^{0.058}} \text{ (MB/cm)}, \quad E_{\rm np}^{-} = \frac{0.56}{\alpha t_{\rm sp}^{0.333} S^{0.07}} \text{ (MB/cm)},$$

где $\alpha = 1 + 0.12 \left(\frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{cp}}} - 1 \right)$ – коэффициент, учитывающий неодно-

родность электрического поля, $E_{\rm max}$ – максимальная напряженность, а $E_{\rm cp}$ – усредненная напряженность электрического поля в зазоре между электродами. Для масла аналогичные зависимости имеют следующий вид:

$$E_{\rm np}^+ = \frac{0.48}{t_{\rm sp}^{0.333} S^{0.073}}$$
 (MB/cm), $E^- = (1 \div 1.5) E^+$.

1.5.3. Некоторые свойства газообразных и твердых диэлектриков

По аналогии с приведенными выше соотношениями для жидких диэлектриков были получены выражения $E_{\rm пр}$ для газов. У газовой изоляции зависимость пробивной напряженности от времени действия напряжения выражена значительно слабее, чем у жидкостей и зачастую на практике ею пренебрегают. Например, для чистого элегаза (SF₆):

$$E_{\rm np} = \frac{6.3 p^{0.88}}{t_{\rm sp}^{0.08} S^{0.05}},$$

где $E_{\rm пр}$ в единицах MB/м, p – давление в атмосферах, t – время в мкс, S – площадь в м².

В емкостных накопителях в качестве конструктивных элементов (диафрагмы, опоры, изоляторы) широко используются такие твердые диэлектрики, как полиэтилен, лавсан, капролон, плексиглас. Для них были получены следующие эмпирические соотношения (при пробое по объему диэлектрика):

$$E_{\rm np}V^{1/10}=k ,$$

где $E_{\text{пр}}$ в MB/см, V – объем в см³.

У полиэтилена k = 2,5, у плексигласа k = 3,3, у лавсана k = 3,6 (для толстых образцов). У тонких пленок $E_{\rm np}$ не зависит от объема.

При повторных воздействиях импульсов высокого напряжения с амплитудой, близкой к пробойной, электрическая прочность твердых диэлектриков снижается (эффект электрического «старения» изоляции). Ресурс изоляции приблизительно оценивается как $N = (E_{\rm np} / E)^8$, где N – количество импульсов, E – рабочая напряженность поля, воздействию которой подвергается твердый диэлектрик.

1.5.4. Промежуточные емкостные накопители

Собственно промежуточные емкостные накопители, которые служат для сокращения времени зарядки последующих каскадов генератора, работают обычно в квазистационарном режиме, когда времена зарядки накопителя и вывода из него энергии в последующее звено значительно превосходят время пробега волны в самом накопителе. Такой промежуточный накопитель представляет собой, по сути, высоковольтный конденсатор, конструктивно образованный парой (или несколькими парами) электродов, разделенных слоем диэлектрика. В силу удобства эксплуатации и относительной простоты изготовления элементов, в качестве таких конденсаторов используются конструкции с коаксиальными цилиндрическими или дисковыми электродами.

В качестве примера на рис. 28 показано устройство промежуточного емкостного накопителя простой коаксиальной конструкции, используемого на ряде установок лаборатории Сандия (США). В качестве изоляции в накопителе используется вода. Распределение электрического поля на элементах конструкции накопителя иллюстрируется картиной эквипотенциалей, показанных на этом рисунке. На выходе накопителя (справа от коаксиального конденсатора) установлен многозазорный газовый разрядник, с помощью которого осуществляется коммутация накопителя и вывод энергии в формирующую линию. Накопитель в сборе с разрядником помещен в общий с ГИН бак с маслом.



Рис. 28. Схематическое изображение конструкции коаксиального конденсатора промежуточного емкостного накопителя лаборатории Сандия (США)

В последнее время в качестве промежуточных емкостных накопителей стали использоваться высоковольтные конденсаторы триаксиальной конструкции, часто называемые конденсаторами с двухсторонней зарядкой. От показанного на рис.28 простого коаксиального конденсатора они отличаются наличием еще одного цилиндрического электрода, который установлен внутри высоковольтного полого электрода, и соединен с корпусом, находящимся под нулевым потенциалом. Фактически такая конфигурация электродов образует два параллельно включенных конденсатора. Тем самым достигается более эффективное использование объема промежуточного накопителя.

Основное внимание при разработке и проектировании рассмотренных накопителей, работающих в квазистационарном режиме, уделяется вопросам обеспечения электрической прочности. С этой целью проводятся расчеты напряженности электрического поля, определяются оптимальные размеры и профиль электродов, для заданного режима работы выбирается тип диэлектрика, используемого в качестве изолирующей среды. При эффективном времени действия напряжения $t_{9\phi} \leq 1$ мкс расчеты допустимых значений напряженности электрического поля на электродах ведутся с использованием уточненных формул Мартина.

1.5.5. Промежуточные емкостные накопители – формирователи импульсов на основе отрезков линий передачи

В выходных каскадах генераторов наносекундных импульсов в качестве емкостных накопителей энергии чаще всего используются отрезки передающих линий с распределенными параметрами. С их помощью в одном устройстве объединяются функции накопления энергии и формирования импульсов с заданными параметрами (форма, длительность, выходное сопротивление).

Напомним основные характеристики линий передачи с распределенными параметрами и рассмотрим способы формирования импульсов с помощью отрезков таких линий.

Для простоты будем рассматривать идеальные линии, не имеющие потерь, коммутаторы также будем считать идеальными. Характеристики отрезка такой передающей линии целиком определяются ее погонной (на единицу длины) индуктивностью L_0 (Гн/м) и погонной емкостью C_0 (Ф/м), которые принято называть первичными параметрами линии. Вторичные волновые параметры линии:

- волновое сопротивление линии $Z_{\rm B} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$, Ом,
- скорость распространения электромагнитной волны в линии

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}, \text{ M/c.}$$

Отрезок разомкнутой линии длиной l представляет собой емкостной накопитель энергии, емкость которого равна $C = lC_0$. При зарядке до напряжения U_0 в электрическом поле отрезка линии накапливается энергия $W = lC_0U_0^2/2$. В определенных условиях, речь о которых пойдет далее, она может быть полностью выделена в нагрузке за минимально возможное время – время двойного пробега волны по линии.

Из всего многообразия схем включения линий и построения на их основе генераторов коротких импульсов мы рассмотрим две, а именно, схемы одинарной и двойной формирующих линий, которые стали доминирующими для генераторов мощных высоковольтных импульсов. Учитывая, что переходные процессы формирования импульсов с помощью отрезков линий передачи подробно изложены во многих учебниках и учебных пособиях, в этом разделе мы ограничимся суммированием наиболее важных моментов, необходимых для дальнейшего анализа методов формирования импульсов с предельными параметрами.

Одинарная формирующая линия (ОФЛ)

Если отрезок линии длиной l, предварительно заряженный до напряжения U_0 , с помощью коммутатора K подключить к нагрузке с активным сопротивлением $R_{\rm H}$, то на нагрузке появится импульс напряжения $U_{\rm H}(t)$, параметры которого зависят от соотношения $R_{\rm H}$ и $Z_{\rm B}$. Это схема (рис. 29) так называемой одинарной формирующей линии (ОФЛ).



Рис. 29. Принципиальная схема ОФЛ:

 U_0 – источник зарядного напряжения, R_3 – зарядное сопротивление, $Z_{\rm B}$ – волновое сопротивление отрезка линии, l – длина отрезка линии, K – коммутатор, $R_{\rm H}$ – сопротивление нагрузки

Режим, когда $R_{\rm H} = Z_{\rm B}$, как известно, называется согласованным. В этом режиме энергия, накопленная в линии, выделяется в нагрузке за один импульс, длительность которого $t_{\rm H}$ равна времени пробега волны вдоль линии и обратно, $t_{\rm H} = 2l/v$, а амплитуда – половине зарядного напряжения линии $U_{\rm H} = U_0/2$. Если сопротивление нагрузки не согласовано с волновым сопротивлением линии, $R_{\rm H} \neq Z_{\rm B}$, линия не может быть разряжена в течение одного (основного) импульса. В таком режиме за основным импульсом следует цуг послеимпульсов в виде ступенек меньшей амплитуды и длительностью $t_{\rm H} = 2l/v$ каждая (рис. 30). Величина напряжения и полярность *k*-й ступеньки определяются соотношением между $R_{\rm H}$ и $Z_{\rm B}$:

$$U_{\rm Hk} = U_0 \frac{R_{\rm H}}{R_{\rm H} + Z_{\rm B}} \left(\frac{R_{\rm H} - Z_{\rm B}}{R_{\rm H} + Z_{\rm B}} \right)^{k-1}$$

где *k* = 1, 2....



Рис. 30. Форма импульсов напряжения на активной несогласованной нагрузке при разряде идеальной ОФЛ: $a - R_{\rm H} < Z_{\rm B}$, $\delta - R_{\rm H} > Z_{\rm B}$

Двойная формирующая линия (ДФЛ)

Рассмотренная выше схема формирования импульсов с помощью одного отрезка линии с распределенными параметрами является наиболее простой. Главный ее недостаток состоит в том, что амплитуда импульса напряжения на нагрузке составляет только половину зарядного напряжения. Для получения импульсов с амплитудой, равной зарядному напряжению, используют схему, состоящую из двух отрезков, которая получила название двойной формирующей линии (ДФЛ). По имени ее автора такую схему часто называют линией Блюмляйна или просто «блюмляйном». Схема ДФЛ показана на рис. 31.



Рис. 31. Схема двойной формирующей линии: l, 2 – отрезки линии с волновым сопротивлением $Z_{\rm B}$ длиной l каждый, K – коммутатор, U_0 – источник зарядного напряжения, $R_{\rm H}$ – сопротивление нагрузки, R_3 – зарядное сопротивление

В наиболее простом виде ДФЛ состоит из двух одинаковых линий с волновым сопротивлением $Z_{\rm B}$ длиной l, между которыми включено сопротивление нагрузки $R_{\rm H}$.

В исходном состоянии обе линии заряжены до напряжения U_0 , а напряжение на нагрузке $U_{\rm H}$ равно нулю. При замыкании установленного в конце одной из линий коммутатора K в момент времени t = 0 по этой линии распространяется волна напряжения с амплитудой, равной зарядному напряжению. После пробега волны по линии через время l/v разность потенциалов на нагрузке становится отличной от нуля из-за появления разности напряжений в линиях слева и справа от нагрузки. Если $R_{\rm H} = 2Z_{\rm B}$, то разность потенциалов на клеммах нагрузки, т.е. амплитуда формируемого импульса равна зарядному напряжению линии. После прихода в момент времени 3l/v волн, отраженных от концов отрезков линий, процесс формирования импульса заканчивается. Вся энергия, запасенная в обоих отрезках линии, в таком режиме выделится в нагрузке за один импульс, длительность которого равна 2l/v.

Если сопротивление нагрузки не равно согласованному, т.е. $R_{\rm H} \neq 2Z_{\rm B}$, то на нагрузке появляется серия послеимпульсов (отра-

женных импульсов). Каждый следующий импульс появляется через интервал времени 2l/v после окончания предыдущего. Амплитуда и полярность этих импульсов определяются соотношением между $R_{\rm H}$ и $2Z_{\rm B}$:

$$U_{k} = -\frac{2R_{\rm H}U_{0}}{2Z_{\rm B} + R_{\rm H}} \left(\frac{R_{\rm H} - 2Z_{0}}{R_{\rm H} + 2Z_{0}}\right)^{k-1}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

1.5.6. Основные типы линий с распределенными параметрами, используемые для формирования и передачи импульсов высокой мощности

Обе рассмотренные выше схемы формирования импульсов могут быть реализованы с помощью линий различных типов. В современных конструкциях генераторов для формирования, а также для передачи импульсов применяются три основных типа линий: коаксиальная, полосковая и радиальная. Напомним их основные параметры.

Коаксиальная линия. Образована двумя соосно расположенными цилиндрическими электродами – внешним и внутренним (рис. 32).



Рис. 32. Геометрия коаксиальной линии. Справа – структура полей в линии

Волновое сопротивление коаксиальной линии

$$Z_{\rm B} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{D_2}{D_1} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{R_2}{R_1}, \text{ Om },$$

где $D_1 = 2R_1$ и $D_2 = 2R_2$ – радиальные размеры (соответственно, диаметры и радиусы) внутреннего и внешнего электродов линии, ε – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

На рис. 32 справа показана конфигурация полей в линии. Основной волной в линии является волна типа ТЕМ. Скорость волны в линии $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$, где c – скорость света в вакууме. Напряженность

электрического поля в линии

$$E(r) = \frac{U_0}{r\ln(R_2/R_1)},$$

где U_0 – напряжение на линии, r – текущий радиус, $R_2 \ge r \ge R_1$.



Рис. 33. Схематическое изображение ОФЛ на основе отрезка коаксиальной линии

На рис. 33 показано схематическое изображение коаксиальной ОФЛ. Ее реализация в виде отрезка коаксиальной линии очевидна и практически совпадает с изображением на рассмотренной ранее принципиальной схеме (см. рис. 29).

Несколько сложнее выглядит топологическое пре-

образование схемы ДФЛ в конструкцию в виде двух вложенных друг в друга отрезков коаксиальных линий. Рис. 34 иллюстрирует умозрительные этапы такого преобразования. В итоге получаем конструкцию, состоящую из двух коаксиальных линий с волновыми сопротивлениями Z_{B1} , Z_{B2} , которые образованы, соответственно, центральным *I* и средним 2, 3 электродами, и средним и внешним 4 электродами. Внутренний электрод ДФЛ через зарядную индуктивность *L* связан с внешним (корпусом) и находится в исходном состоянии под нулевым потенциалом, а средний электрод заряжается от ГИН или промежуточного накопителя до напряжения U_0 . Коммутатор *K* при таком преобразовании оказывается во внутренней линии, однако он может быть установлен в любой из двух линий. При пробое коммутатора через t = l/v появляется напряжение между внутренним электродом и корпусом, которое прикладывается к нагрузке $R_{\rm H}$.

Зарядная индуктивность L, включенная параллельно нагрузке, шунтирует ее во время импульса. Для уменьшения эффекта шунтирования индуктивность необходимо увеличивать, однако возможность увеличения L ограничена допустимым снижением скорости зарядки внутренней линии. Компромиссное решение сводится к выбору такой величины индуктивности, при которой ток через нее во время импульса составляет малую долю тока через нагрузку.



Рис. 34. Топологическое преобразование схематического изображения ДФЛ с двумя отдельными линиями в коаксиальную конструкцию с общим средним электродом двух коаксиальных линий: a – первый этап объединения электродов линий с одинаковым потенциалом, δ – преобразование в коаксиальную геометрию, s – итоговая схема ДФЛ в коаксиальном исполнении

Полосковая линия. Образована двумя плоскими параллельными электродами шириной *b*, отстоящими друг от друга на расстоянии *d* (рис. 35).





Рис. 35. Полосковая линия: слева – геометрия, справа – конфигурация полей в линии

Волновое сопротивление (без учета краевых эффектов) $Z_{\rm B} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon}} \frac{d}{b}$, Ом, скорость волны в линии $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}$. Напряженность

электрического поля в зазоре $E = \frac{U_0}{d} = \text{const}$.

Радиальная (дисковая) линия. Образована двумя дисковыми электродами с общей осью вращения (рис. 36).



Рис. 36. Схема радиальной (дисковой) линии

Линия неоднородная – волновое сопротивление является функцией радиальной координаты, вдоль которой распространяется волна $Z_{\rm B} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \frac{d}{r}$, Ом. Скорость волны $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$. Напряженность электрического поля в дисковой линии (плоские электроды, d = const) $E = \frac{U_0}{d} = \text{const}$.

В общем случае, радиальная линия может иметь электроды, отличные от плоских дисков, например, конические для получения заданного закона изменения волнового сопротивления, в частности, изменяющегося по экспоненциальному закону. Такие линии в настоящее время рассматриваются как основной вид передающей (и одновременно трансформирующей) линии для сведения в центральную зону энергии импульсов большого числа расположенных по периферии модулей генератора в проектируемых установках УТС на уровень мощности $\approx 10^{15}$ Вт.

1.5.7. Предельные возможности линий

Рассмотрим вопрос о предельном токе и предельной мощности, которые могут быть получены при разряде линии на согласованную нагрузку. Очевидно, что ток в нагрузке тем больше, чем больше напряжение, до которого заряжена линия. Максимальное напряжение, до которого можно зарядить линию при заданных размерах ограничивается пробоем изолирующего диэлектрика. Пробой происходит при достижении напряженностью электрического поля предельной величины – пробивной напряженности, $E = E_{\rm np}$.

Для коаксиальной линии предельное напряжение равно $U_0 = R_1 \left(\ln \frac{R_2}{R_1} \right) E_{\rm np}$, а для полосковой и радиальной (дисковой) линий – $U_0 = d \cdot E_{\rm np}$. При разряде линии ток в согласованной нагрузке (в течение импульса длительностью $t_{\rm H} = 2l/v$) равен: $I = U_0 / 2Z_{\rm B}$.

Найдем из этих выражений предельные значения удельного тока линии (тока, приходящегося на единицу характерного размера линии). В согласованном режиме разряда они равны соответственно:

$$\frac{I}{D_{\rm l}} = \frac{1}{240} E_{\rm np} \sqrt{\varepsilon} - для коаксиальной линии;$$
$$\frac{I}{b} = \frac{1}{754} E_{\rm np} \sqrt{\varepsilon} - для полосковой линии;$$

 $\frac{I}{r} = \frac{1}{120} E_{\rm np} \sqrt{\varepsilon}$ – для радиальной линии.

Из полученных выражений видно, что удельный ток линии определяется свойствами диэлектрика, заполняющего эту линию, а именно параметром $E_{\rm np}\sqrt{\varepsilon}$. Соответственно, предельная мощность, которую способна развить линия при работе на согласованную нагрузку, $P \sim E_{\rm np}^2 \sqrt{\varepsilon}$, а плотность энергии, запасаемой в линии $w \sim \varepsilon E_{\rm np}^2$.

Сравним, для примера, воду и трансформаторное масло по параметру $E_{\rm np}^2 \sqrt{\epsilon}$, определяющего предельную мощность импульсов в согласованной нагрузке:

$$\frac{E_{\rm np}^{\rm BOAa}}{E_{\rm np}^{\rm Macno}} \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_{\rm BOAa}}{\varepsilon_{\rm Macno}}} = \frac{E_{\rm np}^{\rm BOAa}}{0.4E_{\rm np}^{\rm Macno}}$$

и, поскольку $E_{\rm np}^{\rm вода} > 0, 4E_{\rm np}^{\rm масло}$, то при генерации импульсов предельно высоких мощностей применение воды в качестве диэлектрика формирующей линии является более предпочтительным.

В следующем разделе мы проведем более подробный анализ предельных возможностей линий коаксиальной конструкции, рассмотрим выбор оптимальных соотношений размеров электродов в зависимости от свойств используемого диэлектрика для достижения максимальной мощности или амплитуды напряжения формируемых импульсов.

1.5.8. Оптимизация коаксиальных формирующих линий

Коаксиальные ОФЛ и ДФЛ наиболее часто применяются в качестве емкостных накопителей энергии в системах формирования импульсов наносекундной длительности с высокой мощностью. По сравнению с другими типами линий они обладают следующими достоинствами:

• аксиальная симметрия обеспечивает азимутальную однородность полей; • замкнутый наружный проводник является электромагнитным экраном, исключающим электромагнитное излучение в окружающее пространство в поперечном направлении;

• электроды цилиндрической (конической) геометрии, элементы конструкции (фланцы, изоляционные диафрагмы и др.) кругового сечения удобны в конструктивном и технологическом отношениях;

• внешний электрод служит естественным барьером для изолирующей среды внутри линии и чаще всего используется в качестве корпуса установки.

Основные расчетные соотношения для коаксиальных ФЛЭ

Волновое сопротивление ОФЛ

$$z_{\rm b} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{R_2}{R_1}, \, \text{Om},$$

где R_2 и R_1 – радиусы внешнего и внутреннего электродов линии, ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей линию.

Для ДФЛ, состоящей из двух коаксиальных линий, одна из которых образована внутренним (центральным) и средним электродами, а вторая – средним и внешним электродами (см. рис. 34,*в*), волновые сопротивления равны, соответственно:

$$z_{\rm B1} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{R_{\rm cp}}{R_{\rm l}}, \text{ Ом} - для внутренней линии,}$$
$$z_{\rm B2} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{R_{\rm 2}}{R_{\rm cp}}, \text{ Ом} - для внешней линии,}$$

где R_1 , R_{cp} и R_2 – радиусы внутреннего, среднего и внешнего электродов (для среднего электрода конечной толщины в приведенных выражениях должны фигурировать значения внутреннего и внешнего его радиусов для нахождения волновых сопротивлений внутренней и внешней линий соответственно).

Длина ОФЛ и ДФЛ для получения в нагрузке импульса длительностью *t*_и определяется временем двойного пробега волны в линии:

$$l=\frac{ct_{\rm H}}{2\sqrt{\varepsilon}}\,,$$

где с – скорость света.

Радиальные размеры (габариты) ФЛ зависят от величины рабочего (зарядного) напряжения и свойств диэлектрика, используемого для изоляции линии. Рассмотрим соображения, лежащие в основе выбора габаритов на примере ОФЛ.

Напряженность электрического поля между проводниками линии, $R_2 \ge r \ge R_1$, равна

$$E = \frac{U_0}{r \ln \frac{R_2}{R_1}}.$$

Подставляя сюда значение логарифма отношения радиусов, выраженное через волновое сопротивление линии,

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{z_{\rm B}\sqrt{\varepsilon}}{60},$$
$$E = \frac{60U_0}{rz_{\rm B}\sqrt{\varepsilon}},$$

получим

и, соответственно, напряженности на поверхности внешнего и внутреннего электродов:

$$E_2 = \frac{60U_0}{R_2 z_{\rm B} \sqrt{\varepsilon}}; \qquad E_1 = \frac{60U_0}{R_1 z_{\rm B} \sqrt{\varepsilon}}.$$

Напряженность электрического поля на поверхности и одного и второго электродов не должна превосходить предельно допустимую. Пусть для определенности внутренний электрод находится под отрицательным потенциалом. Тогда должны выполняться следующие условия:

$$E_1 \le p^- E_{\Pi p}^-$$
и $E_2 \le p^+ E_{\Pi p}^+$,

где $p^{\pm} < 1$ – коэффициент использования изоляции, (обычно $p \approx 0, 7 \div 0, 8$), $E_{\rm np}$ – расчетная пробивная напряженность поля. Отсюда нетрудно найти значения радиусов электродов:

$$R_{1} = \frac{60U_{0}}{p^{-}E_{\rm np}^{-}z_{\rm B}\sqrt{\varepsilon}} , \quad R_{2} = \frac{60U_{0}}{p^{+}E_{\rm np}^{+}z_{\rm B}\sqrt{\varepsilon}}$$

С другой стороны, соотношение между R_1 и R_2 определено заданным волновым сопротивлением линии для выбранной изолирующей среды. Выражая R_2 через R_1 и $z_{\rm B}$ с учетом полученного выше соотношения для R_1 найдем:

$$R_2 = R_1 \exp\left(\frac{z_{\rm B}\sqrt{\varepsilon}}{60}\right) = \frac{60U_0}{p^- E_{\rm np}^- z_{\rm B}\sqrt{\varepsilon}} \exp\left(\frac{z_{\rm B}\sqrt{\varepsilon}}{60}\right).$$

Таким образом, получено два соотношения для определения радиуса внешнего электрода R_2 , выраженные через максимально допустимые напряженности электрического поля на поверхности внутреннего и внешнего электродов. Следовательно,

$$R_2 = \max\left\{\frac{60U_0}{p^+ E_{\Pi p}^+ z_B \sqrt{\varepsilon}}; \frac{60U_0}{p^- E_{\Pi p}^- z_B \sqrt{\varepsilon}} \exp\left(\frac{z_B \sqrt{\varepsilon}}{60}\right)\right\}.$$

Итак, R_1 и R_2 однозначно определяются зарядным напряжением U_0 , параметрами диэлектрика $E_{np}^{\pm}\sqrt{\varepsilon}$ и волновым сопротивлением линии $z_{\rm B}$. Последнее, в свою очередь определяет ток в согласованной нагрузке $I_{\rm H} = \frac{U_0}{2z_{\rm B}}$ (при $r_{\rm H} = z_{\rm B}$).

Оптимизация волнового сопротивления коаксиальных ФЛ

Под оптимизацией волнового сопротивления ФЛ подразумевается нахождение некоторых оптимальных соотношений радиальных размеров ее электродов, при которых наиболее полно реализуются возможности коаксиальной линии как емкостного накопителя энергии и формирователя импульсов. Обычно рассматриваются два типа оптимизации – по напряжению и по мощности. Решение любой из этих задач зависит от ряда параметров, в том числе свойств используемого для изоляции диэлектрика, в частности, от коэффициента его полярности. Рассмотрим последовательно варианты такой оптимизации, вначале для простой геометрии ОФЛ, а затем для более сложной ДФЛ для неполярных диэлектриков и отметим отличия в случае использования в линии полярного диэлектрика. На последнем этапе оценим поправки, связанные с эффектом площади электродов ФЛ.

Оптимизация ОФЛ по напряжению (неполярный диэлектрик)

Оптимизация ОФЛ по напряжению сводится к нахождению такого соотношения радиальных размеров электродов линии R_2/R_1 , для которого при заданной величине R_2 достигается максимальная электрическая прочность ФЛ, т.е. при котором напряжение на линии максимально. Часто такую оптимизацию называют «минимум габаритов» ФЛ, поскольку при реализации условий максимальной электрической прочности радиальный размер внешнего электрода линии R_2 минимален для заданного напряжения зарядки U_0 .

Максимальное напряжение, до которого может быть заряжена ОФЛ, может быть записано в следующем виде:

$$U_{\max} = R_1 \ln \frac{R_2}{R_1} \cdot E_{\max} ,$$

где E_{max} — максимально допустимая напряженность на внутреннем наиболее напряженном электроде линии. Из этого выражения легко найти экстремум зависимости U_0 от R_1 , который достигается при выполнении следующего условия:

$$\frac{\partial U_0}{\partial R_1} = \ln \frac{R_2}{R_1} - R_1 \frac{1}{\frac{R_2}{R_1}} \cdot \frac{R_2}{R_1^2} = 0$$
, откуда $\ln \frac{R_2}{R_1} = 1$.

Соответственно, волновое сопротивление линии $z_{\rm B} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}}$, (Ом).

При таком значении $z_{\rm B}$ достигается минимум напряженности электрического поля на внутреннем электроде и, соответствен-

но, максимум электрической прочности. При заданном значении R_2 линия может быть заряжена до напряжения U_{max} =

$$= R_1 E_{\max} = \frac{E_{\max} R_2}{e}.$$

Таким образом, параметры линии, оптимизированной по напряжению, выклядят следующим образом:

$$z_{\rm B} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}};$$
 $R_1 = \frac{R_2}{e};$ $U_{\rm max} = \frac{E_{\rm max}R_2}{e}.$

Оптимизация по мощности ОФЛ (неполярный диэлектрик)

Оптимизация коаксиальной ОФЛ по мощности предполагает нахождение такого соотношения радиальных размеров электродов линии R_2/R_1 , при котором достигается максимальная мощность импульсов в согласованной нагрузке.

Чтобы провести оптимизацию ОФЛ по мощности, найдем сначала энергию, запасаемую в линии на единице длины при зарядке ее до напряжения U_0 :

$$W_{1} = \int_{R_{1}}^{R_{2}} \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_{0} E^{2}(r) \cdot 2\pi r dr = \pi \varepsilon \varepsilon_{0} \int_{R_{1}}^{R_{2}} \frac{U_{0}^{2}}{r^{2} \ln^{2} \frac{R_{2}}{R_{1}}} r dr = \pi \varepsilon \varepsilon_{0} \frac{U_{0}^{2}}{\ln \frac{R_{2}}{R_{1}}}.$$

При разряде линии на согласованную нагрузку эта энергия будет выделена за время $\Delta t = 2\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu_0}$, а значит мощность, развиваемая линией, окажется равной

$$P = \frac{W_1}{\Delta t} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{U_0^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}}.$$

Так как $\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi$ (Ом), выражение для мощности в нагрузке

приобретает следующий вид:

$$P = \frac{1}{240} \sqrt{\varepsilon} \cdot \frac{U_0^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}}.$$

Зарядное напряжение U_0 при заданных геометрических размерах линии R_1 и R_2 определяется максимально допустимой напряженностью поля

$$E_{\max} = \frac{U_0}{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}},$$
$$U_0 = E_{\max} R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

откуда

Таким образом, максимальная мощность линии при заданных ее геометрических размерах равна:

$$P = \frac{1}{240} \sqrt{\varepsilon} R_1^2 E_{\max}^2 \sim \sqrt{\varepsilon} E_{\max}^2 \,.$$

Пусть теперь R_2 задано и требуется найти такое R_1 и, следовательно, $z_{\rm B}$, при котором $P=P_{\rm max}$ (при заданных свойствах диэлектрика є и $E_{\rm max}$). Экстремум функции $P(R_1)$ достигается при

$$\frac{\partial P}{\partial R_1} = \frac{1}{240} \sqrt{\varepsilon} E_{\max}^2 \left(2R_1 \ln \frac{R_2}{R_1} - \frac{R_1^2 \cdot R_1}{R_2} \cdot \frac{R_2}{R_1^2} \right) = 0,$$

$$2 \ln \frac{R_2}{R_1} = 1 \quad \text{или} \quad \frac{R_2}{R_1} = \sqrt{e}.$$

откуда

Таким образом, линия, оптимизированная по мощности, имеет следующие параметры:

$$z_{\rm B} = \frac{30}{\sqrt{\varepsilon}}; \quad R_{\rm I} = \frac{R_2}{\sqrt{e}}; \quad P_{\rm max} = \frac{R_{\rm I}^2 \sqrt{\varepsilon} E_{\rm max}^2}{480} = \frac{R_2^2 \sqrt{\varepsilon} E_{\rm max}^2}{e \cdot 480}$$

Оптимальные волновые сопротивления для линий с полярными диэлектриками

У полярных диэлектриков $\frac{E_{np}^-}{E_{np}^+} = g > 1$. Примем для определен-

ности, что внутренний электрод линии имеет отрицательный потенциал по отношению к внешнему электроду.
Значения напряженности электрического поля на внутреннем и внешнем электродах линии соотносятся как: $\frac{E(R_1)}{E(R_2)} = \frac{R_2}{R_1}$. Для ли-

нии, оптимизированной по напряжению, $\frac{R_2}{R_1} = e$, т.е. напряжен-

ность поля на поверхности внешнего электрода в *e* раз меньше, чем на поверхности внешнего. Поскольку для всех используемых на практике диэлектриков коэффициент полярности $1 \le g \le 2$, т.е. g < e, то электрическая прочность линии будет определяться напряженностью на внутреннем электроде и полученное ранее выражение сохраняет силу, т.е. оптимальное волновое сопротивление

$$z_{\rm B} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}}.$$

Для линии, оптимизированной по мощности, значение волнового сопротивления принимает различные значения в зависимости от коэффициента полярности:

1) если коэффициент полярности $g > \sqrt{\varepsilon} = 1,65$ (например, у во-

ды
$$g = 2$$
), $R_1 = \frac{R_2}{\sqrt{g}}$ и $z_{\rm B} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln g$, a $P_{\rm max} = \frac{R_2^2 \ln g \sqrt{\varepsilon} E_{\rm max}^2}{240g^2}$;
2) если $g < 1,65$, то $\frac{R_2}{R_1} = \sqrt{e} = 1,65$ и $z_{\rm B} = \frac{30}{\sqrt{\varepsilon}}$.

Учет эффекта площади

Этот эффект проявляется в зависимости пробивной, а, соответственно, и предельно допустимой напряженности электрического поля от площади поверхности электродов. Для оценки его влияния на выбор оптимального волнового сопротивления воспользуемся формулами Мартина. Из них следует, что максимальная напряженность на отрицательном (как и ранее) внутреннем электроде не

должна превышать
$$E_{\text{max}}^- = \frac{p^- a^-}{t_{\Rightarrow \varphi}^k S_{\Rightarrow \varphi}^m}$$

С учетом того, что площадь поверхности $S = 2\pi R_1 l = 2\pi R_1 \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \frac{t_{\mu}}{2}$, где c – скорость света в пустоте, t_{μ} – дли-

тельность импульса, формируемого линией, получим:

$$E_{\max}^{-} = \frac{p^{-}a^{-}}{\left(\frac{\pi t_{\rm H}c}{\sqrt{\varepsilon}}\right)^m R_{\rm l}^m t_{\rm 9\varphi}^k}.$$

Пример учета эффекта площади при оптимизации ОФЛ по мощности

Подставляя это соотношение в выражение для мощности, развиваемой линией на согласованной нагрузке, получим:

$$P = \frac{\sqrt{\varepsilon}}{240} R_1^2 \ln \frac{R_2}{R_1} \frac{(p^- a^-)^2}{\left(\frac{\pi t_u c}{\sqrt{\varepsilon}}\right)^{2m}} R_1^{2m} t_{3\phi}^{2k} \sim R_1^{2(1-m)} \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

Максимум мощности достигается при:

$$\frac{\partial P}{\partial R_1} \sim 2(1-m)\frac{R_1^{2(1-m)}}{R_1}\ln\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_1^{2(1-m)}}{R_1} = 0$$

Из решения этого уравнения следует, что $\ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{2(1-m)}$, а оптимальное волновое сопротивление $z_{\rm B} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{30}{(1-m)\sqrt{\epsilon}}$

(Ом), откуда
$$R_1 = \frac{R_2}{e^{\frac{1}{2(1-m)}}}$$
.

Соответственно, для такой линии

$$P_{\max} = \frac{R_1^2 \sqrt{\epsilon} E_{\max}^2}{480} = \frac{R_2^2 \sqrt{\epsilon} E_{\max}^2}{480 e^{\frac{1}{2(1-m)}}}$$

а максимальное зарядное напряжение

$$U_{0} = E_{\max} R_{1} \ln \frac{R_{2}}{R_{1}} = E_{\max} R_{1} \frac{1}{2(1-m)} =$$
$$= \frac{p^{-}a^{-}R_{1}}{\left(\frac{\pi t_{\mu}c}{\sqrt{\varepsilon}}\right)^{m} R_{1}^{m} t_{2\varphi}^{k} \cdot 2(1-m)} = 0,5 \frac{p^{-}a^{-}}{\left(\frac{\pi t_{\mu}c}{\sqrt{\varepsilon}}\right)^{m} t_{2\varphi}^{k}} \cdot \frac{R_{1}^{(1-m)}}{1-m}.$$

Напомним, что для воды и масла k = 1/3, а m = 0,06 у воды и m = 0,08 у масла.

Для масла, при g < 1,65 оптимальное волновое сопротивление $z_{\rm B} = \frac{33,3}{\sqrt{\varepsilon}}$ реализуется при соотношении радиусов $\frac{R_2}{R_1} = 1,74$. Для воды, у которой коэффициент полярности g = 2, оптимальное значение $z_{\rm B} = 5,13$ (Ом), а соотношение радиусов $\frac{R_2}{R_1} = 2,16$.

Учет эффекта площади при оптимизации по напряжению дает следующие значения:

$$\frac{R_2}{R_1} = 3,04$$
; $z_{\rm B} = \frac{66,7}{\sqrt{\epsilon}} = \begin{cases} 7,4 \text{ Ом, (вода),} \\ 43 \text{ Ом, (масло).} \end{cases}$

Оптимизация волновых сопротивлений ДФЛ

Как и ранее будем придерживаться следующих обозначений: R_1 , $R_{\rm cp}$, R_2 – радиусы внутреннего и внешнего электродов линии (ДФЛ), а $z_{\rm B1}$ и $z_{\rm B2}$ – волновые сопротивления внутренней и внешней линий. В общем случае, ДФЛ может быть несимметричной, т.е. волновые сопротивления внутренней и внешней линий могут быть неравными. Более того, как показывает детальный анализ, именно несимметричная ДФЛ обеспечивает получение максимальных значений амплитуды напряжения и мощности импульсов.

Оптимизация ДФЛ по напряжению (без учета эффектов полярности и площади)

Рассмотрим ДФЛ, у которой обе линии имеют одинаковую максимальную напряженность электрического поля (ДФЛ с равнонапряженными линиями). Тогда

$$E_{\max} R_1 \ln \frac{R_{\rm cp}}{R_1} = E_{\max} R_{\rm cp} \ln \frac{R_2}{R_{\rm cp}} = U_0$$

- напряжение, до которого заряжены линии.

В наиболее тяжелых условиях находится внутренняя линия, имеющая меньшие радиальные размеры. Максимальная ее электрическая прочность достигается когда

$$\ln \frac{R_{\rm cp}}{R_{\rm l}} = 1$$
, откуда $z_{\rm B1} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}}$ и $\frac{R_{\rm cp}}{R_{\rm l}} = e$.

Учитывая это, получим:

$$\ln \frac{R_2}{R_{\rm cp}} = \frac{R_1}{R_{\rm cp}} = e^{-1}$$
или $\frac{R_2}{R_{\rm cp}} = e^{1/e} = 1,44$
$$z_{\rm B2} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon} \cdot e} = \frac{22,07}{\sqrt{\epsilon}}.$$

И

Видно, что в случае равнонапряженной линии $z_{B1} \neq z_{B2}$, следовательно, в согласованной нагрузке $R_{H} = z_{B1} + z_{B2}$ за время t_{μ} выделится не вся энергия, запасенная в линиях.

Действительно, при разряде линии, исходно заряженной до напряжения U_0 , в согласованной нагрузке $R_{\rm H} = z_{\rm B1} + z_{\rm B2}$ в течение первого импульса длительностью $t_{\rm H}$ выделится энергия

$$W_{\rm H} = \frac{U_0^2}{z_{\rm B1} + z_{\rm B2}} t_{\rm H} \,.$$

Энергия, исходно запасенная в обеих линиях, равна

$$W_{\Pi} = \left(\frac{U_0^2}{4z_{B1}} + \frac{U_0^2}{4z_{B2}}\right) t_{\mu} = \frac{1}{4}U_0^2 t_{\mu} \frac{z_{B1} + z_{B2}}{z_{B1}z_{B2}}$$

Соответственно, доля энергии, выделяемая в нагрузке за время *t*_и, равна

$$\eta = \frac{W_{\rm H}}{W_{\rm II}} = 4 \frac{z_{\rm B1} z_{\rm B2}}{\left(z_{\rm B1} + z_{\rm B2}\right)^2},$$

и для оптимизированной линии

$$\eta = 4 \frac{60 \cdot 22,07}{(82,07)^2} \approx 0,785$$
, т.е. около 79 %.

Сравнение оптимизированных по напряжению ОФЛ и ДФЛ

Сравним напряжения на нагрузке, развиваемые ОФЛ и ДФЛ, имеющими одинаковые габариты (т.е. радиус внешнего электрода R_2) и одинаковый тип диэлектрика. Такие линии могут быть заряжены соответственно до:

$$\begin{split} U_{0 \text{ ОФЛ}} = E_{\max} \frac{R_2}{e}, \\ U_{0 \text{ ДФЛ}} = E_{\max} \frac{R_{\text{ср}}}{e}, \\ OTKYДA & \frac{U_{0 \text{ ОФЛ}}}{U_{0 \text{ ДФЛ}}} = \frac{R_2}{R_{\text{ср}}} = \frac{R_2}{eR_1}. \\ \Pi \text{реобразуя} \quad \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2}{R_{\text{ср}}} \cdot \frac{R_{\text{ср}}}{R_1} \quad \text{и логарифмируя} \quad \ln \frac{R_2}{R_1} = \ln \frac{R_2}{R_{\text{ср}}} + \\ + \ln \frac{R_{\text{ср}}}{R_1}, \text{ получим:} \\ \ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon}}{60} (z_{\text{в1}} + z_{\text{в2}}). \\ OTKYДA & \frac{U_{0 \text{ ОФЛ}}}{U_{0 \text{ ДФЛ}}} = \frac{1}{e} \exp \left(\frac{\sqrt{\varepsilon}}{60} (z_{\text{в1}} + z_{\text{в2}}) \right). \\ \text{С учетом, что } z_{\text{в1}} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}}, \text{ получим:} \\ \frac{U_0 \text{ ОФЛ}}{U_{0 \text{ ДФЛ}}} = \frac{1}{e} \exp \left(1 + \frac{z_{\text{в1}}}{z_{\text{в2}}} \right) = \exp \left(\frac{z_{\text{в2}}}{z_{\text{в1}}} \right). \\ \text{Окончательно} \\ \frac{U_0 \text{ ОФЛ}}{U_0 \text{ дФЛ}} = \exp \left(\frac{22,7}{60} \right) = 1,445. \end{split}$$

Напряжение на согласованной нагрузке ОФЛ и ДФЛ равны соответственно:

$$U_{\rm H\,O\Phi\Pi} = \frac{1}{2} U_{0\,O\Phi\Pi}, \quad U_{\rm H\,Д\Phi\Pi} = U_{0\,Д\Phi\Pi}.$$

Следовательно

$$\frac{U_{\rm H \ O} \Phi \Pi}{U_{\rm H \ Д} \Phi \Pi} = \frac{0.5 \cdot U_{0 \ O} \Phi \Pi}{U_{0 \ Д} \Phi \Pi} = 0,723 > 0,5 \quad \text{или} \quad U_{\rm H \ Д} \Phi \Pi = 1,4U_{\rm H \ O} \Phi \Pi.$$

Таким образом, напряжение на согласованной нагрузке ДФЛ, оптимизированной по напряжению и имеющей тот же внешний радиус R_2 , что и оптимизированная по напряжению ОФЛ, будет в 1,4 раза выше (но не в 2 раза, как это могло бы показаться на первый взгляд).

Оптимизация ДФЛ по мощности (без учета эффектов полярности и площади)

Рассмотрим равнонапряженную ДФЛ, т.е. ДФЛ, в которой максимальные напряженности поля в обеих линиях одинаковы. Тогда

$$E_{\max} R_1 \ln \frac{R_{cp}}{R_1} = E_{\max} R_{cp} \ln \frac{R_2}{R_{cp}} = U_0$$
,
откуда $R_1 z_{B1} = R_{cp} z_{B2}$ и $z_{B2} = \frac{R_1}{R_{cp}} z_{B1}$.

Мошность в согласованной нагрузке

$$P = \frac{U_0^2}{z_{\rm B1} + z_{\rm B2}} = \frac{U_0^2}{z_{\rm B1} \left(1 + R_{\rm I}/R_{\rm cp}\right)} = \frac{\sqrt{\epsilon}E_{\rm max}^2}{60} \cdot \frac{R_{\rm I}^2 \ln \frac{R_{\rm cp}}{R_{\rm I}}}{1 + R_{\rm I}/R_{\rm cp}}.$$

Найдем R_1/R_{cp} , при котором $P = P_{max}$:

$$\frac{\partial P}{\partial R_1} = 0 \Longrightarrow \left(2\ln\frac{R_{\rm cp}}{R_1} - 1\right) \left(1 + \frac{R_1}{R_{\rm cp}}\right) = \frac{R_1}{R_{\rm cp}} \ln\frac{R_{\rm cp}}{R_1}$$
$$\ln\frac{R_{\rm cp}}{R_1} = \frac{1 + R_{\rm cp}/R_1}{1 + 2R_{\rm cp}/R_1} \quad \text{M} \quad \left(\frac{R_{\rm cp}}{R_1}\right)_{\rm onrr} \approx 1,835.$$

ИЛИ

Следовательно, для оптимизированной по мощности ДФЛ, волновые сопротивления линий равны соответственно

$$z_{\rm B1} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{R_{\rm cp}}{R_{\rm l}} = \frac{36, 42}{\sqrt{\epsilon}},$$
$$z_{\rm B2} = \frac{19, 85}{\sqrt{\epsilon}},$$
$$\frac{z_{\rm B1}}{z_{\rm B2}} = \frac{R_{\rm cp}}{R_{\rm l}} = 1,835.$$

При разряде на согласованную нагрузку коэффициент передачи энергии ДФЛ в основном импульсе составит

$$\eta = 4 \frac{z_{\rm B1} z_{\rm B2}}{\left(z_{\rm B1} + z_{\rm B2}\right)^2} = 4 \frac{z_{\rm B1}/z_{\rm B2}}{\left(1 + z_{\rm B1}/z_{\rm B2}\right)^2} \approx 0.91.$$

Оптимизация ДФЛ по мощности с учетом эффекта полярности

При использовании в линии диэлектрика с коэффициентом полярности g < 1,65 справедливы полученные выше соотношения, а при g > 1,65 (вода) оптимальные соотношения при отрицательной полярности среднего электрода соответствуют:

$$\frac{R_2}{R_{\rm cp}} = 1,29$$
; $\frac{R_{\rm cp}}{R_1} = 1,8$.

При положительной полярности среднего электрода.

Учет эффекта площади

Для симметричной линии ($z_{\rm B1} = z_{\rm B2}$) оптимизация по напряжению с учетом эффекта площади приводит к следующим результатам:

$$\begin{aligned} \frac{R_2}{R_{\rm cp}} &= \frac{R_{\rm cp}}{R_1} = 1,74,\\ z_{\rm B1} &= z_{\rm B2} = \frac{33,3}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (для \ g < 1,65). \end{aligned}$$

Оптимизация по мощности дает:

$$\frac{R_2}{R_{\rm cp}} = \frac{R_{\rm cp}}{R_1} = 1,301,$$
$$z_{\rm B1} = z_{\rm B2} = \frac{15,8}{\sqrt{\epsilon}}.$$

Для равнонапряженной линии ($z_{\rm B1} \neq z_{\rm B2}$) оптимизация по напряжению дает:

$$\frac{R_2}{R_{\rm cp}} = 1,44; \qquad \frac{R_{\rm cp}}{R_1} = 1,97;$$
$$z_{\rm B1} = \frac{40,6}{\sqrt{\epsilon}}; \qquad z_{\rm B2} = \frac{22,1}{\sqrt{\epsilon}};$$

при этом коэффициент использования энергии η = 91 %.

В заключение отметим, что при $z_{\rm B1} > z_{\rm B2}$ выгоднее коммутировать внутреннюю линию, поскольку через коммутатор будет про-

текать меньший $\left(\frac{U_0}{z_{\rm Bl}}\right)$ ток, но технически выполнить это труднее.



Рис. 37. Области преимущественного использования ОФЛ и ДФЛ с масляной и водяной изоляцией, а также изоляцией из полимерной пленки

В зависимости от сопротивления нагрузки и диапазона рабочих напряжений области преимущественного использования ОФЛ и ДФЛ с трансформаторным маслом или водой выглядят так, как показано на диаграмме рис. 37.

1.6. Трансформирующие и передающие линии

Выше были получены выражения для оптимальных волновых сопротивлений ОФЛ и ДФЛ, при которых для заданных габаритов линии и параметров диэлектрика $E_{\rm max}$ и є на согласованной нагрузке могут быть сформированы импульсы с максимально возможной мощностью или амплитудой напряжения. С другой стороны, эти соотношения предопределяют величину сопротивления нагрузки для реализации согласованного режима работы линии и выделения в ней запасенной в линии энергии или, по крайней мере, большей ее части. Однако такое согласование не всегда возможно. Часто возникает необходимость формирования импульсов в нагрузке, сопротивление которой отличается от оптимального, т.е. сопротивления, необходимого для согласования с оптимизированной линией.

Один из путей решения этой проблемы состоит в выборе иных, нежели оптимальные, волновых сопротивлений линии, при которых параметры ее несильно отличаются от экстремальных. Не случайно поэтому на приведенной выше диаграмме (см. рис. 37) определены области *преимущественного* использования линий различных типов с тем или иным диэлектриком. В пределах этих областей, действительно, указанные на них линии имеют явное преимущество перед линиями другого типа или с другим диэлектриком.

Другой путь решения задачи состоит в использовании дополнительного звена в структуре генератора, а именно между линией и нагрузкой, обеспечивающего трансформацию сопротивлений и, соответственно, согласование нагрузки с оптимизированной (или близкой по параметрам к ней) линией. По необходимости трансформирующее устройство должно обладать высокой электрической прочностью (включается на полное напряжение на выходе ФЛ) и способностью работы в волновом режиме. Этим требованиям удовлетворяют трансформаторы на линиях с распределенными параметрами.

1.6.1. Трансформатор наносекундных импульсов на неоднородной линии

Одним из вариантов такого трансформатора является неоднородная линия, т.е. линия с переменным волновым сопротивлением Z(x), где x – продольная координата в направлении распространения волны. Из теории длинных линий известно, что с помощью неоднородной линии можно передавать без искажения фронт импульсов напряжения и тока с коэффициентом трансформации $n = \sqrt{Z_{\rm BX}/Z_{\rm BbIX}}$, где $Z_{\rm BX}$, $Z_{\rm BbIX}$ – волновые сопротивления линии на входе и на выходе. При распространении импульса по неоднородной линии аэтого кроется в неодинаковой трансформации составляющих спектра передаваемого импульса с различными частотами (вспомним, что между входом и выходом линии имеется гальваническая связь и по постоянному току, а также для низких частот коэффициент трансформации всегда будет равен единице).

Величина спада зависит от закона изменения волнового сопротивления Z(x) и от электрической длины линии, т.е. от времени пробега волны вдоль трансформирующей линии (ТЛ). При заданной длительности импульса $t_{\rm u}$ и величине коэффициента трансформации *n*, спад плоской вершины импульса ($\Delta U/U$) тем меньше, чем больше отношение электрической длины линии (т.е. $l_{\rm TЛ}/v$) к длительности импульса $t_{\rm u}$ ($l_{\rm TЛ}$ – длина трансформирующей линии, v – скорость распространения волны в линии).

Из всего многообразия неоднородных линий для трансформации передаваемых импульсов чаще всего используется экспоненциальная линия, т.е. линии, у которой волновое сопротивление в направлении распространения волны изменяется как $Z(x) = Z_0 e^{\alpha x}$, где Z_0 – волновое сопротивление на входе линии (см. рис. 38).



Рис. 38. Распространение импульса единичной амплитуды по экспоненциальной линии

По сравнению с другими «простыми» (описываемыми стандартными математическими функциями) линиями она вносит минимальные искажения импульса. Для экспоненциальной линии коэффициент трансформации связан с ее длиной ($l_{\text{TЛ}}$) как $n = e^{\alpha l_{\text{TЛ}}/2}$. Для такой линии относительный спад вершины импульса $\Delta U/U = \frac{t_{\text{и}} (\ln n)^2}{t_{\text{TЛ}}} = \frac{t_{\text{и}} (\ln n)^2}{l_{\text{TЛ}} / v}$, где $t_{\text{TЛ}} = l_{\text{TЛ}} / v$ – время пробега волны по ТЛ, v – скорость волны в линии, которая для экспоненциальной линии постоянна. И если в обеих линиях, и ФЛ и ТЛ, используется один и тот же диэлектрик, нетрудно получить соотношение между длинами этих линий, коэффициентом трансформации и сколом

$$\frac{l_{\rm TJI}}{l_{\rm \Phi JI}} = \frac{0.25 [\ln(Z(l_{\rm TJI})/Z(0))]^2}{\Delta U/U},$$

где *l*_{ФП} – длина формирующей линии.

вершины:

Задаваясь величиной допустимого спада вершины импульса, например, $\Delta U/U = 0,1$, легко посчитать длину ТЛ в единицах длин ФЛ в зависимости от желаемого коэффициента трансформации.

| п | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 2,0 | 3,0 |
|---|------|------|------|------|-----|-----|
| $\frac{z_{\rm b}(l_{\rm TJI})}{z_{\rm b}(0)}$ | 1,44 | 1,69 | 1,96 | 2,56 | 4 | 9 |
| $rac{l_{\mathrm{T}\Pi}}{l_{\Phi\Pi}}$ | 0,33 | 0,69 | 1,1 | 2,2 | 4,8 | 12 |

Для примера в табл. 2 приведены результаты такого расчета для $\Delta U/U = 0,1$

Таблица 2

Видно, что с увеличением коэффициента трансформации *n* длина ТЛ при допустимом спаде вершины $\Delta U/U = 0,1$ быстро растет и уже при *n* = 2 почти в пять раз превышает длину ФЛ.

Вот здесь и возникает вопрос о том, а что же лучше – развивать генератор в длину, увеличивая длину ТЛ, или же выбрать неоптимальную ФЛ, увеличив ее поперечные размеры для получения заданной мощности или напряжения в нагрузке? Ответ на этот вопрос можно получить лишь в результате всестороннего (включая и «архитектурную» сторону дела в виде размеров экспериментального зала и др.) анализа задачи и альтернативных путей ее решения.

Обычно на практике ограничиваются соотношением $l_{\text{TII}} / l_{\Phi \text{II}} \approx 1$ и $n \approx 1, 4$.

При небольших коэффициентах трансформации неоднородную экспоненциальную линию по технологическим соображениям заменяют более простой в изготовлении конической линией.

Для линии, образованной внешним цилиндрическим и внутренним коническим электродами волновое сопротивление изменяется как

$$Z_{x} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \left(\frac{R_{2}}{R_{1\mathrm{H}} + \frac{R_{1\mathrm{K}} - R_{1\mathrm{H}}}{l_{\mathrm{TJI}}} x} \right),$$

где $R_{1\text{H}}$, $R_{1\text{K}}$ – радиусы внутреннего электрода в начале и в конце ТЛ. В результате, получаем следующие основные расчетные соотношения для конической коаксиальной ТЛ:

$$Z(0) = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln\left(\frac{R_2}{R_{1\mathrm{H}}}\right); \qquad Z(l_{\mathrm{TJI}}) = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln\left(\frac{R_2}{R_{1\mathrm{K}}}\right);$$
$$n = \sqrt{\frac{\ln(R_2/R_{1\mathrm{K}})}{\ln(R_2/R_{1\mathrm{H}})}}.$$

Одним из альтернативных решений, проверенных на практике, является использование в качестве ТЛ ступенчатой («лестничной») линии, представляющей собой последовательность отрезков однородных линий с различным волновым сопротивлением. В качестве примера такого решения можно привести систему трансформации импульсов установки OWL-II (см. рис. 45), которая включает в себя двухступенчатую или трехступенчатую коаксиальную ТЛ. Волновое сопротивление водяной ОФЛ – 3,9 Ом, волновые сопротивления отрезков линий двухступенчатой ТЛ равны 2,8 и 1,9 Ом, а в трехступенчатой к ним на выходе был добавлен еще один отрезок линии сопротивлением 1,1 Ом. Волновое сопротивление промежуточной секции линии выбиралось близким к среднеквадратичному значению волновых сопротивлений предшествующей и последующей линий, т.е. $Z_{\rm IID} = \sqrt{Z_{\rm BX} Z_{\rm BbIX}}$. Суммарная длина двухступенчатой ТЛ, обеспечивающей получение коэффициент трансформации $n \approx 1.4$, как это можно видеть на рис. 45, приблизительно такая же, как и длина ОФЛ.

Трансформатор на отрезках линий

Другим альтернативным решением неоднородной ТЛ является использование трансформатора на отрезках линий. Трансформатор представляет собой N одинаковых линий, которые с одной стороны включены параллельно, а с другой – последовательно. При подключении генератора со стороны параллельного соединения линий трансформатор работает как повышающий. Входное сопротивление трансформатора при таком включении $Z_{\rm BX} = Z_0/N$, а выходное – $Z_{\rm Bbix} = Z_0 N$, где Z_0 – волновое сопротивление одной линии. Если поменять местами подключение генератора и нагрузки, то такая система линий будет работать как понижающий трансформа-

тор, соответственно, приведенные значения входного и выходного сопротивлений поменяются местами. Коэффициент трансформации – дискретный и в первом приближении (без учета влияния паразитных волн, распространяющихся в промежутках между линиями трансформатора) равен *N*.

Трансформаторы такого типа, выполненные на двух полосковых линиях, были использованы в ряде установок мегавольтного уровня для удвоения напряжения на нагрузке. Уникальная конструкция трансформатора на линиях с большим коэффициентом трансформации, выполненная на сборке коаксиальных линий с водяной изоляцией, была создана для понижения выходного импеданса опытного модуля «Ангара-5-1».

Отметим одну, очень важную особенность работы любой из рассмотренных выше систем трансформации импульсов. Суть ее состоит в том, что трансформирующая линия (или сборка линий) работает в режиме бегущей волны. Она испытывает действие высокого напряжения лишь в течение длительности импульса $t_{\rm u}$, в то время как ФЛ находится под напряжением во время зарядки t_3 , которое в несколько раз больше $t_{\rm u}$. Учитывая, что электропрочность диэлектрика с уменьшением времени действия напряжения растет как $E_{\rm np} \sim t^{-1/3}$, напряженность электрического поля в ТЛ может заметно превышать поля в ФЛ. Для большинства установок эти времена соотносятся как $t_3 \sim 1$ мкс и $t_{\rm u} \leq 100$ нс, откуда нетрудно получить, что $E_{\rm np TЛ} / E_{\rm np ФЛ} \approx 2 - 2,5$. Возможность увеличения рабочей напряженности поля позволяет заметно уменьшить поперечные размеры ТЛ по сравнению с соответствующими размерами ФЛ.

Эти же соображения и оценки предельных значений напряженности электрического поля в равной мере относятся и к однородным линиям, которые используются для передачи импульсов с выхода генератора (с выхода ФЛ) к нагрузке, и называемым передающими линиями.

1.6.2. Передающие линии

Передающие линии представляют собой отрезки коаксиальных или полосковых линий с постоянным по длине волновым сопротивлением, равным выходному сопротивлению генератора. Они применяются в тех случаях, когда нагрузка по тем или иным причинам не может быть установлена непосредственно на выходе формирующей линии. Примером таких систем могут служить многомодульные генераторы, работающие на общую нагрузку, такие как «Ангара-5», PBFA-Z (ее последняя модификация ZR) и другие. Минимальное расстояние от нагрузки, на котором располагаются отдельные модули, определяется поперечными размерами формирующих линий и может достигать десятка и более метров. Значительно меньшие поперечные размеры передающих линий за счет более высоких рабочих напряженностей электрического поля позволяют осуществить сведение энергии импульсов до зоны меньших радиальных размеров. На практике с их помощью осуществляется транспортировка импульсов до области вакуумного изолятора, а на следующем участке от изолятора до нагрузки используются вакуумные линии с магнитной изоляцией. Часто, с целью более плотной компоновки системы транспортировки энергии, в качестве передающих используются полосковые линии с электродами, расположенными в вертикальной плоскости (при круговом расположении модулей в горизонтальной плоскости), например, как это сделано на установках «Saturn» и ZR.

1.6.3. Резонансная зарядка формирующей линии

Зарядка формирующей линии, как и любого другого промежуточного емкостного накопителя, осуществляется в течение сравнительно короткого времени путем перекачки энергии из емкости предшествующего накопителя, например, ГИН. В специальной литературе для такого процесса часто используется термин «резонансная» зарядка, который, подразумевает возможность повышения амплитуды зарядного напряжения по отношению к напряжению, до которого был заряжен первичный или предшествующий промежуточный накопитель. Такая возможность не связана с какими-либо резонансными явлениями, а определяется характером передачи энергии из одной, предварительно заряженной емкости, в другую, исходно разряженную.

Время зарядки, как правило, значительно превосходит время пробега волны по линии или конструктивной емкости собственно промежуточного накопителя, поэтому для анализа процесса зарядки может быть использована простая эквивалентная схема с сосредоточенными элементами, показанная на рис.39. Для определенности будем считать, что первичным накопителем является ГИН, а заряжаемой емкостью – ФЛ, в соответствие с этим введем обозначения элементов схемы.



Рис. 39. Эквивалентная схема импульсной зарядки промежуточного емкостного накопителя

В исходном состоянии емкость, обозначенная на схеме как емкость ГИН в ударе $C_{\Gamma UH}$, заряжена до напряжения U_0 , емкость формирующей линии $C_{\Phi \Pi}$ – разряжена. Индуктивность $L_{\Gamma UH}$ представляет собой суммарную индуктивность собственно ГИН и конструктивную или специально введенную дополнительно индуктивность цепи зарядки линии (причины введения дополнительной индуктивности будут рассмотрены в следующем разделе).

Анализ процессов, происходящих после замыкания ключа, не представляет больших трудностей. Если пренебречь потерями энергии, считая активное сопротивление цепи зарядки и ГИН малым, то разряд ГИН носит колебательный характер с частотой

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_{\Gamma UH} \frac{C_{\Gamma UH} C_{\Phi \Pi}}{C_{\Gamma UH} C_{\Phi \Pi}}}},$$

а напряжение на емкости $C_{\Phi\Pi}$ изменяется по гармоническому закону

$$U_{\Phi\Pi} = U_0 \frac{C_{\Gamma U H}}{C_{\Gamma U H} + C_{\Phi\Pi}} (1 - \cos \omega t) .$$

Напряжение на линии достигает максимума при $\omega t = \pi$, когда $\cos \omega t = -1$,

$$U_{\phi J I} = 2U_0 \frac{C_{\Gamma U H}}{C_{\Gamma U H} + C_{\Phi J I}} = 2U_0 \frac{1}{1 + C_{\Phi J I} / C_{\Gamma U H}} \,.$$

Амплитудное значение $U_{\Phi \Pi}$ определяется напряжением первичного накопителя U_0 и соотношением емкостей $C_{\Phi \Pi}/C_{\Gamma U H}$. При выполнении условия $C_{\Phi \Pi} = C_{\Gamma U H}$ максимальное напряжение на линии $U_{\Phi \Pi} = U_0$. Уменьшение емкости линии по сравнению с емкостью ГИН ведет к росту максимального напряжения зарядки линии, т.е. если $C_{\Phi \Pi}/C_{\Gamma U H} < 1$, то $U_{\Phi \Pi} > U_0$. И, наоборот, увеличение этого отношения приводит к снижению амплитуды напряжения на линии.

Максимально возможное напряжение зарядки линии приближается к $2U_0$ при $C_{\Phi \Pi}/C_{\Gamma U H} \approx 1$. Однако такой режим невыгоден по энергетическим соображениям, хотя иногда и используется на практике (при необходимости получения максимально высокого напряжения).

Зная зависимости напряжения зарядки линии от параметров схемы, нетрудно найти коэффициент передачи энергии $\eta = W_{\Phi \Pi} / W_{\Gamma U H} = \frac{C_{\Phi \Pi} U_{\Phi \Pi}^2}{C_{\Gamma U H} U_0^2}$. Подставляя приведенные выражения, получим, что в момент достижения максимума напряжения на линии $\eta = 4 \frac{C_{\Phi \Pi} / C_{\Gamma U H}}{(C_{\Phi \Pi} / C_{\Gamma U H} + 1)^2}$. Максимум этого выражения $\eta = 1$ дос-

тигается при $C_{\Phi\Pi} = C_{\Gamma UH}$. При всех других соотношениях емкостей $\eta < 1$.

Графики зависимостей зарядного напряжения линии и коэффициента передачи энергии η от соотношения емкостей линии и ГИН представлены на рис. 40.



Рис. 40. Зависимости максимального напряжения на линии и коэффициента передачи энергии от соотношения емкостей линии и ГИН

Наличие активного сопротивления в цепи заряда ведет к потерям энергии и уменьшению как амплитуды напряжения на линии, так и коэффициента передачи энергии. На практике емкость ФЛ или промежуточного накопителя выбирают близкой к емкости ГИН, но несколько меньшей ее, обычно $C_{\Phi \Pi}/C_{\Gamma U H} \approx 0.9$. Выбор такого соотношения емкостей позволяет компенсировать снижение напряжения зарядки относительно U₀ из-за наличия потерь (в частности, в разрядниках ГИН) и сохранить достаточно высокий коэффициент передачи энергии, который остается близким к 100 % (при $C_{\Phi \Pi}/C_{\Gamma U H} \approx 0.9$ эффективность передачи энергии $\eta \approx 0.99$).

1.6.4. Предымпульсы

Предымпульсом принято называть напряжение, возникающее на нагрузке во время зарядки формирующей линии, т.е. предшествующее основному импульсу. В большинстве случаев его появление является крайне нежелательным, а допустимая величина предымпульсного напряжения жестко ограничивается. Если нагрузкой ФЛ служит сильноточный диод с взрывоэмиссионным катодом, то при определенном уровне напряжения предымпульса возможно образование катодной плазмы. Расширение плазмы ведет к изменению эффективной геометрии диода и, соответственно, его характеристик к моменту прихода основного импульса, вплоть до заполнения ускоряющего промежутка и закорачивания диода. В установках для термоядерных исследований по получению горячей плазмы в Z-пинчах исходной нагрузкой служит так называемый лайнер, который представляет собой тонкостенный газовый или твердотельный цилиндр или цилиндрическую сборку тонких (микронного диаметра) проволочек. Появление предымпульса может приводить к разрушению лайнера и преждевременному образованию плазмы. Поэтому во всех случаях принимаются меры, направленные на уменьшения величины предымпульсного напряжения до безопасного уровня для рабочей нагрузки.

Причины появления предымпульса различны для ОФЛ и ДФЛ.

Рассмотрим вначале более простую схему генератора с ОФЛ с последовательно включенным на ее выходе коммутатором. Эквивалентная схема генератора на стадии зарядки показана на рис. 41.



Рис. 41. Эквивалентная схема генератора с ОФЛ на стадии зарядки линии: *a* – без подавления предымпульса, *б* – с предымпульсным разрядником РП в цепи нагрузки Z_н

Во время зарядки линия отделена от нагрузки коммутатором (разрядником P), который в течение всего времени зарядки остается в разомкнутом состоянии. Нагрузка гальванически не связана с ФЛ. Однако между ними неизбежно присутствует емкостная связь. Ее составляющие определяются межэлектродной емкостью собственно разрядника и проходной (конструктивной) емкостью между обращенными друг к другу торцевыми частями ФЛ и нагрузки

(высоковольтный электрод вакуумного изолятора диода или торец отрезка передающей линии), между которыми располагается разрядник. На схеме рис.41 эти емкости объединены в одну емкость области разрядника C_p . Если учесть, что нагрузка Z_H обладает собственной распределенной емкостью C_H (емкость между высоковольтным электродом и корпусом), то в результате мы получаем емкостной делитель, коэффициент деления которого и определяет долю зарядного напряжения, прикладываемого к нагрузке до включения коммутатора, т.е. величину предымпульсного напряжения:

$$U_{\text{предымп}} \approx U_{\Phi \Pi} \frac{C_{\text{p}}}{C_{\text{H}}}.$$

Важно отметить, что в такой схеме полярность напряжения предымпульса совпадает с полярностью зарядного напряжения ФЛ и генерируемого ей импульса.

Эффективным способом подавления предымпульса является установка на выходе ФЛ (после основного коммутатора) отрезка передающей линии ПЛ и дополнительного (предымпульсного) разрядника РП (рис. 41, δ). Емкость отрезка ПЛ $C_{\Pi\Pi}$ выполняет рольнизковольтного плеча первого емкостного делителя, а проходная емкость предымпульсного разрядника $C_{P\Pi}$ вместе с емкостью нагрузки образуют второй делитель. В результате, напряжение предымпульса на нагрузке $Z_{\rm H}$ определяется суммарным коэффициентом передачи, равным произведению коэффициентов передачи делителей. Часто для уменьшения проходной конструктивной емкости между ФЛ и нагрузкой устанавливается сплошной металлический экран с окнами для электродов основного коммутатора.

Рассмотрим причины появления предымпульса в генераторе с ДФЛ. Эквивалентная схема генератора во время зарядки ДФЛ показана на рис. 42.

Поскольку время зарядки t_3 ДФЛ значительно больше времени пробега волн по линиям, на эквивалентной схеме они представлены сосредоточенными емкостями.

В схеме ДФЛ нагрузка подключена параллельно зарядной индуктивности L₃, следовательно, то напряжение, которое появляется во время зарядки на L₃, непосредственно прикладывается к нагрузке, представляет собой предымпульсное напряжение. Основная причина его появления – протекание через L_3 тока зарядки внутренней линии C_1 . Поскольку эквивалентная схема зарядки линий, как это видно из рис. 42, содержит три LC-контура с различными собственными частотами колебаний, то напряжение на L_3 может быть знакопеременным, т.е. полярность его может изменяться в течение времени зарядки.



Рис. 42. Эквивалентная схема генератора с ДФЛ на стадии зарядки линии: $C_{\Gamma UH}$ – ударная емкость, а $L_{\Gamma UH}$ – суммарная индуктивность ГИН и цепи зарядки, L_3 – зарядная индуктивность внутренней линии ДФЛ, C_1 , C_2 – емкости линий ДФЛ, $Z_{\rm H}$ – сопротивление нагрузки

Амплитуда предымпульсного напряжения зависит, в первую очередь, от соотношения $L_{\Gamma UH}/L_3$. Для уменьшения предымпульса необходимо увеличивать $L_{\Gamma UH}$ и уменьшать L_3 . Однако зарядная индуктивность внутренней линии L_3 должна быть достаточно большой, чтобы не шунтировать нагрузку во время импульса, т.е.

необходимо, чтобы $\frac{L_3}{(z_{B1} + z_{B2})} \approx t_{\mu}$. Увеличение $L_{\Gamma UH}$ ведет к

уменьшению скорости зарядки и увеличению времени действия напряжения, что снижает электропрочность линий, поэтому нежелательно или недопустимо. Обычно по результатам предварительных расчетов находятся области приемлемых значений этих параметров, и в итоге выбирается некоторое компромиссное решение. Типичное для многих установок соотношение индуктивностей составляет $L_{\Gamma UH}/L_3 \ge 10$.

В ходе разработки и создания генераторов наносекундных импульсов с ДФЛ были предложены и опробованы несколько вариантов схемы зарядки, которые позволяют значительно уменьшить или полностью устранить появление предымпульсного напряжения. Некоторые из них показаны на рис. 43.



Рис. 43. Варианты схем зарядки ДФЛ с подавлением предымпульса: *а* – схема зарядки с индуктивной связью, *б* – схема параллельной зарядки линий ДФЛ

Широкого распространения эти схемы зарядки ДФЛ не получили из-за сложностей их технической реализации. В частности, для схем параллельной зарядки линий необходимо, чтобы источник зарядного напряжения (ГИН) должен быть оторван от земли, так как после срабатывания коммутатора его потенциал повышается до $U_0/2$. Как и в случае с ОФЛ, простым и эффективным способом снижения предымпульсного напряжения до безопасного для нагрузки уровня является применение в схеме дополнительного (одного или нескольких) предымпульсного разрядника с отрезком передающей линии. Именно такое решение используется на практике наиболее часто.

1.6.5. Примеры систем формирования импульсов некоторых крупных установок

Генераторы импульсов на базе ОФЛ

«Стенд-300» («С-300», РНЦ «Курчатовский институт», Москва). Установка импульсной мощностью 10 ТВт состоит из восьми модулей. Суммарный энергозапас первичных накопителей (ГИН) энергии – 890 кДж. Каждый модуль включает в себя: 20-каскадный ГИН, промежуточный емкостной накопитель с водяной изоляцией, газовый разрядник, две водяные полосковые ОФЛ, многоканальный водяной разрядник и две полосковые передающие линии. Промежуточный накопитель коаксиальной конструкции заряжается от ГИН до 3,5 MB за время 1,3 мкс. Емкость накопителя 15 нФ. Волновое сопротивление каждой из двух полосковых линий 4,8 Ом. ФЛ заряжаются до 3,2 MB за время 180 нс. Волновое сопротивление передающих линий 2,4 Ом. Суммарный выходной импеданс генератора составляет 0,15 Ом. Амплитуда напряжения выходного импульса 1,3 MB, длительность – 45 нс. В режиме короткого замыкания нагрузки амплитуда тока 4,2 MA, длительность импульса тока ≈100 нс. Схема установки «С-300» показана на рис. 44.



Рис. 44. Схема формирования импульсов установки «С-300». Справа – схема ФЛ и ПЛ

Ускоритель OWL-II. Установка, относящаяся к сильноточным ускорителям второго поколения (70-е годы прошлого столетия). При ее создании было найдено много новых интересных решений. Подробно описанная в литературе, она стала классическим примером низкоомного генератора на основе ОФЛ с водой.

Система формирования импульсов ускоряющего напряжения (рис.45) включает в себя: ОФЛ с водяной изоляцией с волновым сопротивлением 3,9 Ом, многоканальный водяной разрядник с искажением поля, ступенчатую трансформирующую линию, состоящую из двух отрезков линий с волновым сопротивлением 2,8 Ом и 1,9 Ом, между которыми установлен многоканальный предымпульсный разрядник. Особенностью конструкции ОФЛ является применение раздвижной линии с управляемым приводом, что позволяет оперативно изменять длительность формируемого импульса от 60 до 120 нс. Подавление предымпульса осуществляется как с помощью предымпульсного разрядника, так и дополнительной индуктивности, шунтирующей первую ступень трансформирующей линии (до предымпульсного разрядника). Основные выходные параметры: энергия электронов 1,3 МэВ, ток пучка 0,8 МА. При добавлении еще одного отрезка трансформирующей линии с волновым сопротивлением $Z \approx 1,1$ Ом получен пучок с энергией 0,9 МэВ и током 1,2 МА. Максимальная энергия в электронном пучке – более 150 кДж.



Рис.45. Схема системы формирования импульсов ускорителя OWL-II с водяной изоляцией: 1 – пластиковые диафрагмы, 2 – перемещаемый шток, 3 – поджигающий электрод основного коммутатора, 4 – газовый управляемый (тригатронный) разрядник, 5 – привод перемещения поджигающего электрода коммутатора, 6 – индуктивность подавления предымпульса, 7 – предымпульсный разрядник, 8 – изолятор диода, 9 – диафрагма предымпульсного разрядника, 10 – рабочий промежуток основного коммутатора, 11 – убираемые опоры внутреннего электрода ОФЛ, 12 – вода, 13 – масло

Генераторы на основе ДФЛ

Установка «Ангара-5», состоящая из восьми модулей, является одним из самых мощных в мире генераторов наносекундных импульсов, выполненных на основе ДФЛ с водяной изоляцией. Система формирования импульсов одного модуля включает в себя: ГИН, ДФЛ, пять коммутирующих двухзазорных управляемых газовых разрядников, передающую линию с встроенным предымпульсным разрядником. Напряжение зарядки ДФЛ – 2,1 МВ, эффективное время зарядки – 0,87 мкс. ДФЛ несимметричная – волновое сопротивлении внутренней линии равно 1,36 Ом, внешней – 0,82 Ом. Коммутируемая линия – внутренняя. Полярность зарядки (полярность среднего электрода ДФЛ) – положительная. Волновое сопротивление передающей линии с водяной изоляцией – 2,5 Ом.

Схема ДФЛ с указанием основных размеров показана на рис.46.



Рис. 46. Схема ДФЛ установки «Ангара-5»: *1* – средний (высоковольтный) электрод ДФЛ, *2* – защитный разрядник (всего 2 шт.), *3* – жидкостный резистор, *4* – основной коммутатор, включающий пять газовых разрядников по окружности, *5* – предымпульсный разрядник в передающей линии

«AURORA». Установка «Aurora», построенная компанией Physics International в 1972 г., является самым высоковольтным в мире генератором наносекундных импульсов с использованием ДФЛ. Установка состоит из четырех модулей ДФЛ с изоляцией трансформаторным маслом, заряжаемых от одного общего ГИН с энергозапасом 5 МДж. Максимальное рабочее напряжение – 14 МВ, суммарный ток четырех модулей 4×400 кА в импульсе длительностью 125 нс. Схема и основные размеры ДФЛ приведены на рис. 47.



Рис. 47. Схема модуля ДФЛ с масляной изоляцией установки «Aurora»: *I* – предымпульсный разрядник, *2* – передающая линия, *3* – внешний электрод, *4* – внутренний электрод, *5* – масляный многоканальный разрядник с регулируемым зазором

Одной из особенностей ДФЛ является использование масляного многоискрового управляемого разрядника с искажением поля. Основной промежуток разрядника может оперативно изменяться с помощью встроенного во внутренний электрод гидропривода. Максимальный зазор разрядника – 60 см.

2. ГЕНЕРАТОРЫ МОЩНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ИНДУКТИВНЫХ НАКОМИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Устройства, описываемые ниже, а именно, индуктивные накопители энергии, для обеспечения работы требуют определенного периферийного оборудования. Данное оборудование более сложное, нежели аналогичное для емкостных накопителей, поэтому выбор типа импульсного источника тока должен исходить из анализа задачи и, в конечном итоге, из экономической целесообразности.

Как уже отмечалось в предыдущей главе, импульсный источник электрической энергии имеет в своем составе минимальный набор устройств, показанный на рис.48: первичный источник напряжения или тока, аккумулятор энергии (накопитель), коммутатор или переключатель цепи нагрузки.



Рис. 48. Типичная структура импульсного источника электрической энергии

Что касается нагрузки потребителя импульсного тока, то хотя она и не входит в комплекс источника, но в значительной мере определяет рабочий режим импульсной системы: токи, напряжения, длительность импульса. Являясь частью разрядного контура (или элементом системы передачи электромагнитной энергии), она в существенной мере определяет мощность, развиваемую импульсным источником. Поэтому всегда необходима процедура оптимизации всей разрядной цепи, известная обычно под названием "согласования" нагрузки. Исключение составляет случай, когда внутренний импеданс источника во много раз превышает импеданс нагрузки и не влияет на величину и форму тока. Хотя последний случай встречается достаточно редко, однако его используют, когда нужно выдержать форму тока, независимо от различных особенностей происходящих процессов. Такой прием оказывается полезным, в частности, для проведения сравнительных исследований электрического разряда при существенном изменении параметров нагрузки.

В представленном наборе устройств определяющим является аккумулятор – накопитель энергии. Выделим три характерных параметра, по которым различные накопители можно сравнивать между собой:

• время τ_0 , в течение которого накопитель может хранить энергию, полученную от первичного источника,

• удельная энергоемкость *w* запасаемой в накопителе энергии,

• удельная мощность *p*, которую накопитель может отдать при импульсном разряде на нагрузку в оптимальном случае.

Коммутатор тока также играет важную роль в системе транспортировки энергии к нагрузке. В зависимости от типа источника энергии (источник напряжения или тока) он должен иметь либо нормально разомкнутые контакты, либо нормально замкнутые с последующим включением нагрузки в цепь аккумулятора – усилителя мощности, как показано на рис. 49. Однако в любом случае время его срабатывания τ_{κ} должно быть достаточно мало. Критерий малости имеет фундаментальный смысл для упомянутой выше процедуры согласования, поэтому сформулируем его, исходя из самых простых рассуждений.

Система транспортировки энергии из накопителя в нагрузку обладает собственной частотой колебаний ω_s и, соответственно, характерным временем процесса передачи энергии $\tau_s \sim 1/\omega_s$. В табл. З эти характерные времена выражены через основные параметры системы для магнитных и емкостных накопителей и нагрузок трех различных типов: активное сопротивление *R*, емкость *C* и индуктивность *L*.

При передаче энергии в нагрузку с высоким КПД существенную роль могут играть потери в коммутаторах тока $Q_{\rm K}$, величину которых можно получить из интеграла, взятого в пределах от t = 0до $t = \tau_{\rm K}$:

$$Q_{\rm K} = Q_{\rm K} \int_0^{\tau_{\rm K}} I_{\rm K}(t) U_{\rm K}(t) dt \, .$$

Таблица 3

| Магн | итный накс | питель | Емкостной накопитель | | | |
|----------------------------|-----------------------------|--|----------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--|
| Тип на- грузки <i>Z</i> | $	au_s$ и $	au_{	extsf{k}}$ | | Тип на- грузки Z | $	au_s$ и $	au_{	extsf{k}}$ | | |
| R | $\tau_s = L/R$ | $\tau_{\kappa M H} \ll \tau_s$ | R | $\tau_s = RC$ | $\tau_{\rm K M H H} << \tau_{\rm S}$ | |
| С | $\tau_s = \sqrt{LC}$ | $\tau_{ m K\ MHH} << 	au_{s}$ | С | $\tau_s = 0$ | $\tau_{K M M H} >> \tau_{S}$ | |
| L | $\tau_s = 0$ | $	au_{	ext{K MUH}} >> 	au_{	extsf{S}}$ | L | $\tau_s = \sqrt{LC}$ | $\tau_{\rm K M H H} << \tau_{\rm S}$ | |



Рис. 49. Коммутация тока в системе накопитель – нагрузка: *а* – разряд магнитного накопителя, *б* – разряд емкостного накопителя. Характерные времена – см. табл. 3

На стадии коммутации тока один из сомножителей в подынтегральном выражении равен соответствующей величине, развиваемой на нагрузке: $U_{\rm K} = U_{\rm H}$ для магнитного и $I_{\rm K} = I_{\rm H}$ для емкостного накопителя. Второй сомножитель в подынтегральном выражении в момент t = 0 (начало процесса) больше, чем соответствующая величина, развиваемая на нагрузке. Для индуктивного накопителя $I_{\rm K}(0) >> I_{\rm H}(0)$, и $U_{\rm K}(0) >> U_{\rm H}(0)$ для емкостного. Во многих случаях при подсчете потерь энергии в коммутаторе ее величина оказывается, если не больше, то сравнима с энергией, переданной в нагрузку за время $\tau_{\rm K}$. Чтобы в целом КПД передачи энергии был высоким, необходимо, чтобы выполнялось условие $\tau_{\rm K} << \tau_{\rm S}$.

Это условие не всегда выполнимо. В табл. 3 указаны особые случаи передачи энергии: $L_0 \rightarrow L_{\rm H}$ и $C_0 \rightarrow C_{\rm H}$. Для них, полагая им-

педанс нагрузки независящим от времени, характерное собственное время системы будет $\tau_s = 0$, а реальное время передачи энергии будет определяться временем переключения тока τ_{κ} . По истечении времени τ_{κ} процесс передачи энергии будет окончен, а строгий расчет, проведенный в соответствии с законами сохранения даст оценку КПД ≤ 0.25 .

2.1. Общие характеристики индуктивного накопителя

Индуктивный накопитель энергии представляет собой катушку (в простейшем случае соленоид), заряжаемую от внешнего источника тока. Характерную величину удельной энергоемкости *w* можно получить, исходя из прочности проводников обмотки, которая удерживает давление магнитного поля. Предположим, что обмотка соленоида на рис.50 достаточно тонкая (величина *dr* порядка 0,1 от радиуса *r* катушки) и выполнена из обычной стали или бронзы с пределом текучести $\sigma_{\rm T} = 3 \cdot 10^8 \, {\rm H} \cdot {\rm m}^{-2}$.



Рис. 50. Поперечное сечение магнитной катушки накопителя энергии

Чтобы не допустить разрыва обмотки, надо удовлетворить очевидному соотношению:

$$2\sigma_{\rm T} dr/r > B^2/(2\mu_0) = w, \qquad (2.1)$$

не зависящее от ее длины *l*.

Соответствующая максимальная удельная энергоемкость для выбранных нами величины отношения dr/r и материала составит $w_{\text{макс}} = 6 \cdot 10^7 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$. Отметим, что последняя величина на три порядка превышает удельный запас энергии импульсных конденсаторов с бумажно-масляной изоляцией.

Оценим другой важный параметр индуктивного накопителя τ_3 – характерное время нагрузки энергии. Положим, что соленоидальная обмотка на рис. 50 содержит *n* витков, а ее длина *l* значительно превышает радиус *r*. Пусть удельное сопротивление материала обмотки $\rho > 0$, следовательно, она будет нагреваться при зарядке накопителя и рассеивать энергию. Ее индуктивность *L* и активное сопротивление *R* легко оценить:

$$L = \mu_0 \pi r^2 n^2 / l; \qquad R = 2\pi r n^2 \rho / (l dr),$$

а затем определить τ₃:

$$\tau_3 = L/R = \mu_0 r \, dr / 2\rho.$$

Для катушки с радиусом 1м при $\rho = 1,8 \cdot 10^{-8}$ Ом · м (бронза) будем иметь $\tau_3 \approx 3,5$ с. За это время начальная амплитуда тока в катушке уменьшится в *е* раз, и большая часть начальной знергии будет превращена в тепло. Поэтому цикл зарядки такой катушки должен быть коротким, таким, чтобы время зарядки удовлетворяло условию $t_S < \tau_3$. Очевидно, что мощность источника зарядки должна быть достаточно велика для индуктивного накопителя с теплой резистивной обмоткой. На практике для этих целей используют либо зарядку от преобразователей, питаемых от специальной трансформаторной подстанции, подключенной к ЛЭП, либо от электромашинных генераторов ударного действия, роторы которых, как правило, снабжаются маховиками.

В практике физического эксперимента известны примеры использования индуктивных накопителей различного масштаба с запасом знергии от десятков килоджоулей до сотен мегаджоулей. Первые часто служат простыми обострителями мощности для емкостных источников тока. Такой прием впервые был использован Мезонье, в дальнейшем он получил развитие в технике импульсных термоядерных установок. Самый крупный импульсный магнитный накопитель в мире был разработан в НИИЭФА и построен в России (ГНЦ ТРИНИТИ) для токамака ТСП с адиабатическим сжатием плазмы. Катушка накопителя – электромагнит тороидального типа, ее эскиз приведен на рис. 51 вместе с фрагментом обмотки токамака ТСП, максимальная величина индукции импульсного магнитного поля, в которой на малом радиусе (вблизи оси) может достигать 20 Тл.



Рис. 51. Поперечный разрез индуктивного накопителя ТИН-900 для питания тороидальной обмотки токамака ТСП (Т-14)

Полный запас энергии в 32 катушках, собранных в тор, составляет около 900 МДж при максимальной амплитуде генерируемого тока в выходной обмотке 1,8 МА. Характерная величина длительности фронта тока в нагрузке-электромагните токамака (проектная) около 30 мс при полной длительности импульса около 0,5 с. Для зарядки такого крупного накопителя используются два генератора переменного тока (модернизированный вариант турбогенератора типа ТКД-200 для электростанции), снабженные дополнительно цилиндрическими маховиками с весом около 80 т (рис. 52). Время зарядки ТИН-900 от двух параллельно работающих генераторов ТКД-200 током 150 кА составляет 5 с. Этот накопитель, а точнее импульсный энергетический комплекс, является уникаль-

ным сооружением. В настоящее время рассматриваются альтернативные варианты его использования для ряда прикладных задач.



Рис. 52. Общий вид одного из четырех генераторов ТКД-200 с инерционным накопителем

Меньшую величину запасаемой энергии имеет другой накопитель ИН-1, который построен и работает в ТРИНИТИ. При времени зарядки 2с он запасает 12,5 МДж магнитной энергии, которая поступает от электромашины ГСП 8500 при токе 50 кА и напряжении 800 В. Этот генератор постоянного тока имеет собственный ротор с большим моментом инерции и показан на рис. 53.



Рис. 53. Ударный генератор ГПС-8500

Альтернативным способом зарядить мощный индуктивный накопитель с запасом энергии, превышающим 10 МДж, можно лишь снимая мощность с достаточно близко установленной ЛЭП. Но это является единичными исключениями из правил, поскольку распределительные энергосистемы плохо переносят значительные пиковые нагрузки.

Учитывая, что резистивные индуктивные накопители в основном используют зарядные устройства на базе электромашин с маховиками, анализ их удельных весовых характеристик и аналогичных характеристик маховиков целесообразно провести по единой схеме.

Удельная энергия w_h для соленоида с поперечным сечением на рис. 50 $w_h = w V/M$, где V и M – объем и масса катушки. Если γ – удельный вес материала обмотки, то из (2.1) получим:

$$w_h = 2\sigma_{\rm T} dr/r \Big[\pi r^2 / (2\pi r dr \gamma) \Big] = \sigma_{\rm T} / \gamma .$$

Это выражение имеет общий характер для различных устройств, содержание энергии в которых определено выдерживаемыми механическими напряжениями в материале.

В частности, рассматривая рис. 50 как вращающийся обод маховика и полагая в (2.1), что механические напряжения σ_{T} в материале обеспечивают центростемительное ускорение при угловой скорости вращения ϖ , получим кинетическую энергию на единицу длины маховика:

$$W_{\rm KHH} = \gamma \left(r^2 \varpi^2 / 2 \right) dr \, 2\pi r \; ,$$

где максимальная угловая скорость определена соотношением $\sigma_{\rm T} dr < \gamma dr r \left(r \varpi^2 \right)$, а погонный вес маховика $P = \gamma dr 2\pi r$.

Комбинируя три последних выражения, получим, что с точностью до некоторого коэффициента $k_f < 1$, отражающего геометрию маховика (наше условие dr << r – частный случай), $w_h = k_f \sigma_1/\gamma_1$, где σ_1 и γ_1 относятся к соответствующим прочным материалам. Так для легированных сталей $\sigma_1/\gamma_1 = 100$ кДж/кг, для электропроводных материалов обмоток накопителей на основе меди величина σ_e/w_e на порядок меньше. Алюминий и его сплавы имеют лучшие, чем у меди показатели: $\sigma_{\rm T}/\gamma = 24$ кДж/кг, поэтому из этого материала изготовляется большинство катушек накопителей. Из приведенных оценок видно, что использование тандема магнитный накопитель – электромашина с маховиком оправдано высокими удельными весовыми характеристиками компонентов.

2.2. Схемы генераторов на основе индуктивных накопителей и коммутаторы тока

Собственно индуктивный накопитель является промежуточным звеном в цепи передачи импульса энергии к нагрузке и выполняет две функции: усиление мощности импульса; согласование импульсного источника с нагрузкой, причем не только по заданному току и напряжению, но и по КПД использования энергии.

Простейшая электрическая схема генератора на основе индуктивного накопителя показана на рис. 54, где G – генератор зарядного тока, 3 – замыкатель нагрузки, а K – выключатель, обеспечивающий переключение тока в нагрузку.

Обычно формирование коротких импульсов тока не требует выключения генератора *G* при выводе энергии в нагрузку ввиду его малого импеданса. Исполнение замыкателя З тока может быть различным в зависимости от величины разрядных токов и длительности импульса. Разновидности их конструкций в достаточной степени отработаны в процессе создания и эксплуатации генераторов на



Рис. 54. Индуктивный накопитель с зарядным генератором *G* и нагрузкой *Z*_н

основе мощных емкостных накопителей энергии. Используются разрядники различных типов, замыкатели с твердотельной разрушаемой изоляцией, в последнее время применяют удобные в работе, но дорогие и пока менее надежные в экплуатации полупроводниковые тиристоры. Ключевым элементом схемы является выключатель, прерывающий ток за время τ_k , меньшее времени τ_H вывода энергии в нагрузку. Для обострения (усиления) мощности в k раз индуктивным накопителем на рис. 54 необходимо, чтобы разрядное напряжение U_H на нагрузке было в k раз больше напряжения зарядки U_S генератора G. Такое напряжение $U_H > 10^3 U_S$ возникает на разрыве контактов выключателя, поэтому "гашение" тока, а затем предохранение от пробоя разомкнутого контактного промежутка составляет известную проблему. Быстродействие срабатывания выключателя определяется как его конструкцией, так и характером нагрузки, однако высокий КПД передачи энергии в нагрузку можно получить только при условии $\tau_k << \tau_s$. Для увеличения разрядной мощности системы желательно повышать не только напряжение U_H , но и усилить ток по отношению к амплитуде тока I_0 зарядки накопителя.

В практике физического эксперимента нашли применение два типа генератора на индуктивных накопителях с усилением тока нагрузки: с трансформаторной схемой вывода тока и секционированные катушки с умножением тока (по обращенной схеме гене-



Рис. 55. Индуктивный накопитель с трансформаторным усилением тока

ратора Маркса). В варианте, показанном на рис. 55, использована вторичная трансформаторная обмотка, соединенная с нагрузкой.

Здесь прерывание тока осуществляется по первичной цепи накопителя, при этом магнитный поток "перехватывается" вторичной понижающей обмоткой. Выключатель прерывает ток в первичной обмотке при повышенном напряжении, определяемом коэффициентом трансформации. К конст-

рукции и исполнению катушки накопителя в данном варианте предъявляются высокие требования по двум причинам. Паразитная индуктивность $L_{\rm n}$, соответствующая магнитному потоку рассеяния обмоток, является дополнительной нагрузкой для коммутатора K, который должен рассеивать соответствующую энергию $W_{\rm P} = L_{\rm n} I^2/2$
при отключении тока. Поэтому геометрия обмоток должна быть оптимизирована, а зазор между обмотками предельно уменьшен. С другой стороны, в этом зазоре должна сохраняться высоковольтная изоляция, разделяющая потенциалы обмоток. Учитывая значительные ударные электродинамические нагрузки на катушки, которые возникают при зарядке и выводе энергии, требования к малым зазорам между обмотками и обеспечение изоляции противоречивы и удовлетворяются только при достижении некоторого компромисса. По аналогичной схеме выполнен накопитель ТСП на рис. 51, однако при таких больших размерах катушек ($D \sim 4$ м) влияние зазоров оказалось относительно мало. При выборе трансформаторной схемы усиления тока следует учитывать, что весовые характеристики накопителя ухудшаются примерно вдвое из-за добавочной массы вторичной обмотки. Также необходимо предусмотреть некоторый избыток начальной запасаемой знергии из-за неполной магнитной связи между обмотками. В большинстве случаев величина связи взаимоиндукции не превышает 0,85 и может быть увеличена лишь при использовании специальной технологии чередования намотки первичных и вторичных витков.

В схеме рис. 56 усиление тока в нагрузке осуществляется переключением обмоток катушек-секций $L_1 \div L_4$ после зарядки током I_0 от генератора G. Последовательное соединение при зарядке преобразуется в параллельное при срабатывании системы замыкателей тока 3 и выключателей $K_1 \div K_4$.



Рис. 56. Индуктивный накопитель с умножением тока секций-катушек

Очевидно, что конструктивно данная схема сложнее, чем трансформаторная и требует плотной компоновки элементов конструкции в связи с большим числом выводов обмотки. Пример такой компоновки показан на рис. 57.



Рис. 57. Тридцатисекционный индуктивный накопитель ИН-1 установки МОЛ (ТРИНИТИ)

Катушка этого накопителя соленоидального типа, разделенная на 30 секций, имеет 135 витков. В каждой секции содержится 4,5 витка обмотки, выводы которой выходят на обе боковые поверхности катушки. Непосредственно на выводах установлены выключатели токов взрывного типа. Принцип действия и их характеристики будут подробно рассмотрены в следующем разделе. Использование большого числа коммутирующих модулей в секционированных накопителях с умножением токов делает систему более гибкой. Здесь можно получить произвольную величину тока в нагрузке, начиная от величины зарядного тока I₀ и вплоть до NI₀ (*N* – число секций) в зависимости от числа приводимых в действие модулей коммутаторов. Кроме того, при определенной последовательности их включения есть возможность формировать желаемым образом форму тока в нагрузке, например, в канале рельсотрона или другом электромагнитном устройстве. Ранее были предложены новые принципиальные решения по эффективному использованию таких схем магнитных накопителей для питания токамаков и других мощных импульсных электромагнитов. Дальнейшее развитие аналогичные системы питания с секционированными катушками получили применительно к ускорителям макротел – рельсотронам с распределенным по длине канала вводом энергии.

2.3. Выключатели токов индуктивных накопителей

Для переключения токов индуктивных накопителей разработано достаточно много разнообразных устройств, работающих на различных принципах. Какие-то конструкции были заимствованы из многолетнего опыта эксплуатации промышленных выключателей тока, действующих в энергосетях и распределительных устройствах. Однако требования к высоким мощностям и малым габаритам экспериментальных физических установок, как правило, не позволяют прямо использовать стандартные серийно производимые отключающие аппараты.

2.3.1. Электрический взрыв проводников при коммутации импульсных токов

Первый индуктивный накопитель, продемонстированный Мезонье и обостряющий импульс энергии конденсаторной батареи, использовал для переключения тока в нагрузку электрически взрываемую проволочку. Электровзрыву и сопутствующим ему явлениям посвящено очень большое число исследований. Несмотря на то, что определенные особенности в поведении этого объекта при очень высоких токах и плотностях энергии до сих пор полностью не выяснены, можно по известным данным с хорошей точностью рассчитывать работающие на этом принципе быстрые коммутаторы токов.

Выделение тепла в единичном объеме проводника при прохождении тока можно выразить следующим образом:

$$dA = \rho_0 \left(1 + \beta Q\right) j^2 dt,$$

где *A* – удельное теплосодержание, *j* – плотность тока, равномерно распределенного по сечению, β – размерный коэффициент.

Представим это соотношение в интегральном виде

$$\int j^2 dt = \int dA\beta / \left[\beta \rho_0 \left(1 + \beta\right)\right]$$

и, произведя интегрирование в правой части, получим:

$$1 + \beta A = \exp\left(\beta \rho_0 \int j^2 dt\right).$$

При сильном нагреве вещества проводника в левой части можно пренебречь единицей. Тогда видно, что теплосодержание проводника однозначно зависит от величины интеграла $J = \int j^2 dt$.

Связь величины интеграла *J* (или как принято говорить "интеграла тока") с фазовым состоянием проводников хорошо изучена экспериментально, например, при разрушении от нагрева (плавлении, испарении) проволочек и фольг протекающим током. В табл. 4 приведены численные значения интеграла тока *J* для часто используемых проводников из меди и алюминия.

Таблица 4

| Металл | Твердый | Расплав | Кипение | Пар |
|----------|--|---------|---------|------|
| | Размерность $[J] = 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{см}^{-4}$ | | | |
| Алюминий | 0,32 | 0,40 | 0,59 | 1,09 |
| Медь | 0,89 | 1,05 | 1,24 | 1.95 |

Вполне естественным ограничением является максимальный поперечный размер проводника (диаметр или толщина), который должен быть меньше толщины скинового слоя, рассчитанного за время полного протекания тока. Образующийся плотный металлический пар являет собой непроводящую среду до тех пор, пока тепловое расширение канала не приведет к достаточному падению плотности пара, при котором в соответствии с законом Пашена произойдет его пробой. Эти стадии процесса хорошо можно отследить по фотографиям электровзрыва алюминиевой проволочки диаметром 25 мкм, взорванной в воздухе от быстрого емкостного источника тока (рис. 58). Начальное напряжение на конденсаторе 18 кВ. Максимальный ток превышал 1 кА. Фото проводящего канала проволочки выполнено с хорошим разрешением в собственном свете разряда в последовательные моменты времени от 20 до 160 нс с начала подачи тока.



Рис. 58. Серия фотографий электрически взрываемой алюминиевой проволочки в воздухе

Соответствующая осциллограмма тока и напряжения на токовом канале проволочки показана на рис. 59.



Рис. 59. Ток I и напряжение U при электрическом взрыве проволочки

На фотографиях (см. рис. 58) хорошо видно, что в начале процесса нагрева проволочки она удлиняется и искривляется. К 60-й наносекунде видимый канал резко расширяется, после чего свечение исчезает, возобновляясь на 160-й наносекунде в периферийной области расширяющегося пара, где происходит ионизация металлического пара. В период между электрическим взрывом и вторичным пробоем канала напряжение на конденсаторе сохраняется неизменным.

При использовании электрического взрыва для отключения токов проводники помещают в среду, препятствующую возникновению вторичного пробоя. Такой средой может быть, например, мелкий кварцевый песок или стеклоткань. Лучшие результаты получены при взрыве в трансформаторном масле. В песке или стеклоткани металлический пар быстро конденсируется на развитых поверхностях среды. При взрыве в масле плотная среда удерживает высокое давление металлического пара, а на границе канала образуются продукты теплового разложения масла, интенсивно охлаждая частицы пара.

С помощью электрического взрыва можно прерывать токи от сотен ампер до мегаампер, и переключать их в нагрузку, получая значительные напряжения. Типичные напряжения определяются длиной проводника l и погонной электрической прочностью $E_{\rm II}$ ос-

таточного канала $E_{\rm m} = U_{\rm max}/l$. Последняя существенным образом зависит от интенсивности электрического взрыва, обусловленного величиной плотности тока через проводник. Эта зависимость обусловлена гидродинамическими неустойчивостями различного вида, которые при больших временах протекания тока могут развиваться в проводнике в жидкометаллической фазе. Не вдаваясь в подробности, при оценках можно ориентироваться на следующее эмпирическое правило: произведение времени протекания тока через взрываемый проводник на погонную электрическую прочность канала примерно равно 10 Вс/м. Иными словами, для коммутации тока 50 кА с помощью проволочки сечением 1 мм², мы должны пропускать ток в течение 100 мкс (см. выше «интеграл тока») и при этом погонная электрическая прочность канала будет на уровне E_п ~ 100 кВ/м. В целом, это неплохой результат, учитывая, что данный прерыватель тока стартует автоматически, не требуя дополнительных устройств для привода его в действие и запуска.

Этот тип размыкателей тока, несмотря на необходимость полной замены рабочего элемента после разового срабатывания (контейнер с проволочкой вместе с фрагментами окружающей среды) применяется очень широко в электрофизическом эксперименте. Однако только с его помощью полностью решить проблему коммутации тока индуктивных накопителей не представляется возможным. Если индуктивный накопитель в импульсном мощном источнике – основной аккумулятор энергии, то, например, при секундных временах накопления и 100 мкс времени вывода энергии в нагрузку коэффициент обострения мощности должен составить величину $\tau_0/\tau_{\rm H} = 10^4$. С помощью электрически взрываемого проводника удается получить обострение мощности лишь в 6–10 раз, что обусловлено относительно коротким промежутком времени его нагрева в фазе с металлической проводимостью (см. табл. 4).

Среди других особенностей электрического взрыва проводников, обусловивших интерес к их использованию в различных приложениях, следует отметить яркую вспышку линейчатого излучения при взрыве в воздухе или вакууме и сильную ударную волну, возбуждаемую при взрыве в окружающей плотной среде (например, в жидкости). Для сравнения можно сказать, что плотность тепловой энергии, накопленной в проводнике перед электрическим взрывом, сравнима с плотностью энергии, содержащейся в известных взрывчатых веществах и достигает величин от 4–5 кДж/г до 10 кДж/г. Заметим к тому же, что объемная плотность металлов в несколько раз выше, чем у взрывчатки. Большие развиваемые импульсные давления используются для привода некоторых механических устройств в процессах обработки поверхностей промышленных изделий и для штамповки. А короткие световые вспышки нашли применение в импульсной оптической диагностике разнообразных процессов и объектов.

2.3.2. Выключатели тока с взрывным приводом

Практика быстрого отключения длительно протекающих токов, а мы вынуждены считать секундные токи зарядки индуктивных накопителей длительными, привели к широкому распространению многоступенчатых коммутаторов тока. При данном подходе функции длительного (1–10с) пропускания зарядного тока и быстрого (10^{-5} с) прерывания тока разделены между параллельно включенными коммутирующими устройствами.

В простых конструкциях контактных соединений, не требующих выполнения сложных технологических операций при снаряжении выключателя, для снижения электрического сопротивления увеличивают поверхность соприкосновения контактов и повышают давление на контакты. Механически контактное соединение становится более прочным и термостойким, но для быстрого разъединения контактов требуется увеличивать как энергию, так и мощность привода выключателя. Каждый из этих параметров ограничен сверху, и вряд ли целесообразно, если энергия привода станет сравнимой с запасом энергии в индуктивном накопителе. К тому же при увеличении энергии привода возрастают габариты выключателя, и его не удается разместить удобным образом между выводами соседних секций накопителя.

Что касается мощности привода, выключателя, то она существенным образом зависит от типа выключателя и способа, с помощью которого достигается увеличение его сопротивления, а также от вольт-амперных характеристик нагрузки, в которую переключают ток.

Рассмотрим простую конструкцию с контактной вставкой, показанную на рис. 60, а. Положим, что контакты погружены в масло, и гашение дуги, возникающей на разрыве контактов, осуществляется потоком масла, сформированным под действием давления продуктов взрыва ВВ (или электрически взрываемой фольги) привода. Гашение дуги может быть эффективным только в том случае, если поток масла интенсивно охлаждает дугу, эффективно отбирая выделяющуюся в ней тепловую энергию от протекающего тока. Очевидно, что при этом температура паров масла и продуктов его распада не должна сильно возрастать, т.е. лишь малая доля вещества потока масла может испаряться и превращаться в продукты распада. Из этого условия следует, что изменение внутренней энергии вещества потока должно быть мало по сравнению с плотностью его кинетической энергии. А, следовательно, мощность в потоке всегда должна превышать мощность, выделяемую в гасимой дуге. Поэтому для активных выключателей (в отличие от пассивных электровзрывных элементов) всегда должно выполняться условие, чтобы мощность привода превышала разрывную мощность выключателя. Разрывной мощностью Р_р называется мощность, выделяемая на контактах выключателя. Для простоты можно использовать оценку этой величины как $P_{p} = I_{\text{макс}} \cdot U_{\text{макс}}$.

При разрыве токопроводящей цепи контактная вставка должна переместиться на расстояние, сравнимое с зазором b_1 за время τ_1 .



Рис. 60. Схема перемещения контактов выключателя (*a*); параллельные контакты (б)

Здесь b_1 будет определяться величиной $U_{\text{макс}}$, и величина b_1 должна обеспечить достаточную электрическую прочность разрываемого промежутка без его пробоя во время импульсного разряда тока в нагрузке. Таким образом, скорость V вставки задана: $V \ge b_1/\tau_1$. Пусть масса вставки равна m_1 . При заданном сопротивлении и, соответственно, при заданной площади контакта a_1^2 величина $m_1 \sim b_1 a_1^2$. Тогда энергия привода контактов $V_{\text{пр}} \sim b_1^3 a_1^2/\tau_1^2$, а мощность привода $P_{\text{пр}} \sim b_1^3 a_1^2/\tau_1^3$. Эти параметры, объединяющие совместимость режима зарядки $(a_1^2 \sim \tau_0)$ и малого времени вывода энергии в нагрузку, практически нереализуемы в одном устройстве.

Используем добавочный параллельный размыкатель 2 с более легкими контактами, возложив на него функцию быстрого переключения тока в нагрузку. Для этого случая схема двухступенчатого коммутатора показана на рис. $60, \delta$. Тогда для размыкателя l, переключающего ток в шунтирующую цепь, можно ограничиться требованием невысокой разрывной мощности, при времени переключения тока $\tau_2 >> \tau_1$, однако его электрическая прочность (а, соответственно, и величина b_2) должна соответствовать той же величине $U_{\text{макс}}$.

Полагая для простоты, что устройства подобны по принципу действия, оценим суммарную энергию привода двух параллельных прерывателей как

$$W'_{\rm np} \sim b_1^3 a_1^2 / \tau_2^2 + b_2^3 a_2^2 / \tau_1^2$$

Будем считать, что $b_2 = b_1$, а площади сечения a_1^2 и a_2^2 выберем, исходя из величины «интегралов» тока (см. табл. 4), соответствующих времени протекания полного тока (τ_0 и τ_2) через металлические проводники выключателей. При этом полагаем, что сопротивление любого нормально замкнутого выключателя обратно пропорционально величинам $a_{1,2}^2$, поэтому цикл зарядки осуществляется при протекании тока через размыкатель *1*, а размыкатель *2* пропускает ток при срабатывании первого. Выбирая соотношение

площадей контактов в соответствии с соотношениями $(a_1^2 \sim \sqrt{\tau_0})$, $(a_2^2 \sim \sqrt{\tau_0})$, получим, что

$$W_{\rm np}' \sim b_1^3 a_1^2 / \tau_1^2 + (\tau_1^2 / \tau_2^2 + \sqrt{\tau_2 / \tau_0}) \,,$$

где множитель перед скобками – исходная энергия привода эквивалентного одноступенчатого выключателя.

При правильно выбранных соотношениях между временами $\tau_{0,1}$ τ_2 и τ_1 , которые должны удовлетворять неравенству $\tau_0 >> \tau_2 >> \tau_1$, выражение в круглых скобках в вышеприведенной формуле $(\tau_1^2/\tau_2^2 + \sqrt{\tau_2/\tau_0}) \ll 1$, а полная энергия привода может быть значительно снижена:

$$W'_{\Pi p} << W_{\Pi p}$$

Медленные размыкатели тока первой ступени часто называют разьединителями.

Для примера оценим относительную экономию энергии привода при введении дополнительной ступени (разъединителей) в системе коммутации секционированного накопителя ИН-1. Для экспериментально измеренных временных характеристик накопления и переключения токов:

• время зарядки магнитного накопителя $\tau_0 \le 1,5$ с;

• время срабатывания размыкателя 2 (переключение токов в нагрузку) $\tau_1 \leq 50$ мкс;

• время срабатывания разъединителей (переключение тока в размыкатель 2) $\tau_2 = 350$ мкс.

При этих параметрах

$$W'_{\rm np} / W_{\rm np} = (\tau_1^2 / \tau_2^2 + \sqrt{\tau_2 / \tau_0}) \approx 2 \cdot 10^{-2}.$$

Таким образом, введение промежуточных выключателей или многоступенчатого коммутатора обеспечивает существенную экономию в энергии привода этих устройств. Известно успешное использование и 3-ступенчатых размыкателей тока с использованием в последней ступени, например, электрически взрываемых проволочек или фольг.

Общие сведения об устройстве взрывного привода

Как было выше сказано, для выключателей импульсного ИН нужна высокая мощность привода контактов. По этой причине взрывчатые вещества (ВВ), химическая энергия которых освобождается с высокой скоростью горения или детонации, привлекают пристальное внимание конструкторов такой аппаратуры и экспериментаторов. Согласно правилам техники безопасности использование BB возможно при соблюдении целого ряда требований к используемому помещению, документального оформления и дополнительного оснащения как экспериментального стенда, так и создания вспомогательных служб для учета и хранения зарядов. При выполнении установленных требований организация или предприятие получает соответствующую лиценцию. Кроме того, персонал установки, работающий с BB, в обязательном порядке проходит специальное обучение. Эти меры обеспечивают безопасность работ и предотвращают неконтролируемое использование взрывчатых материалов. В случае невозможности выполнения таких требований, вместо ВВ можно применить электрически взрываемые проводники (ЭВП), что мы ранее отмечали. Несмотря на то, что для работы с ЭВП нужны батареи импульсных конденсаторов и место для их размещения, в ряде случаев такая замена является хорошей, хотя и вынужденной альтернативой ВВ.

Для примера приведем картинку сравнительных испытаний двух образцов ВВ (вверху размещен столбик гексагена, внизу идентичный образец ВЭБ). На рис. 61 показана фоторазвертка свечения детонационных волн для этих образцов ВВ. Типичные ВВ обладают удельным запасом энергии 4–5 МДж/кг, спокойно горят на воздухе при нагреве и детонируют при падении на поверхность заряда потоков энергии высокой плотности. Скорость распространения волны детонации, которая по сути является цепной реакцией горения, составляет для различных ВВ величину от 5 до 8 км/с.

Результаты обработки данного эксперимента (по углу наклона фронта свечения) показали, что скорости детонационных волн этих образцов ВВ приблизительно одинаковы и составляют 7,74 км/с для гексагена и 7,23 км/с для ВЭБ. Небольшое отличиие наблюдается для времени выхода детонационной волны на стационарный



Рис. 61. Фото сборки при испытаниях образцов ВВ с наложенной фоторазверткой свечения продуктов детонации. Высота каждого из образцов, симметрично расположенных отностельно средней втулки, равна 68 мм. Скорость развертки по пленке 1500 м/с

режим. Для образцов из ВЭБ оно составляет примерно 2 мкс. Для инициализации детонационной волны в объеме заряда на его поверхности устанавливают инициирующие элементы, называемые электродетонаторами. Фото электродетонатора показано на рис. 62, изделие является серийно выпускаемой продукцией оружейной промышленности. Такие электродетонаторы на рис. 61 размещены на свободных торцах столбиков ВВ (вверху и внизу).



Рис. 62. Электродетонатор АТЭД-15, торцевая часть (рабочая) при снаряжении прилегает к поверхности ВВ

Электродетонатор содержит тонкий электрически взрываемый проводник и небольшое количество (~ 0,2 г) взрывчатого вещества, выходящего на поверхность детонатора и имеющего повышенный порог инициализации взрыва. Сопротивление проволочки составляет 0,2 Ом, она может быть разрушена импульсным током 10–100 А, но при этом подрыва электродетонатора не произойдет. Для инициализации срабатывания детонатора необходим быстрый (2 мкс) импульс тока с амплитудой более 800 А, подаваемый от специальной схемы поджига. Этим надежно обеспечено предохранение снаряженных зарядов ВВ от случайных срабатываний (статическое электричество, электромагнитные наводки и помехи и прочее).

В качестве приводных элементов размыкателей используются заряды ВВ различного веса (обычно от 1 до 100 г) и конфигураций, соответствующих геометрии, устройству контактных элементов и используемому принципу гашения дуги. Продукты детонации при высоком давлении, которое может достигать величины сотни мегабар, обладают плохой проводимостью, что при напряжениях переключения тока между двумя ступенями U < 3 кВ позволяет погасить дугу. Однако при выводе тока в нагрузку с напряжением десятки киловольт эффективное гашение дуги требует принятия специальных мер.

Взрывные выключатели накопителя ИН-1 и стенд МОЛ

Рассмотрим конструкцию двухступенчатой системы выключателей тока, созданной и работающей в ТРИНИТИ на 30-секционном накопителе ИН-1 с умножением тока. Принципиальная электрическая схема стенда с обозначением основных элементов приведена на рис. 63.

Для зарядки ИН-1 служит ударный генератор (Г) постоянного тока ГПС-8500 (см. рис. 53). Зарядка накопителя ИН-1, общий вид которого приведен на рис. 57, до максимальной величины тока 50 кА производится за 1,5 с. При зарядке накопителя его секции L1-L30 соединены последовательно через 30 взрывных размыкателей PB50/50 (PB1-PB30), расположенных по сторонам соленоида ИН-1.



Рис. 63. Общая электрическая схема первого каскада усиления стенда МОЛ: Г – генератор зарядного тока; L1-L30 секции накопителя ИН-1; PB1–PB30 – размыкатели (разъединители) 1 ступени PB50/50; PB31 – PB32 размыкатели PB50/1000 (2 ступень); $L_{\rm My}$ – индуктивный накопитель второго каскада(нагрузка); C1 – согласующая емкость

В качестве привода размыкателей используется 1,5 г взрывчатого вещества (ВВ). После зарядки накопителя ИН-1 и срабатывания замыкателей ЗМ-1 и ЗМ-2, подключающих нагрузку (L_{MY}), размыкатели PB50/50 производят коммутацию секций из последовательного соединения в параллельное. Замыкателями токов секций служат сдвоенные полупроводниковые лавинные диоды типа ВДЛ. Умножение тока ИН-1 происходит в цепи с низким сопротивлением и индуктивностью. В цепь умноженного тока включены два размыкателя мегаамперного тока PB50/1000 (на схеме PB31 и PB32), которые при последующем прерывании тока обеспечивают передачу энергии в следующий каскад стенда – тороидальный магнитный усилитель (МУ).

Общий вид размыкателей обоих типов показан на рис. 64.

В схеме параллельно размыкателям включена согласующая емкость C_1 (3 мФ, 40 кВ). Общий вид магнитного усилителя приведен на рис. 65.



Рис. 64. Взрывные размыкатели: слева PB50/50, прерываемый ток 50 кА, справа PB 50/1000, прерываемый ток до 1 МА



Рис. 65. Магнитный усилитель стенда МОЛ

Таким образом, в схеме умножения тока (см. рис. 63) применен двухступенчатый коммутатор тока. Конструкцию взрывных размыкателей их работу и основные характеристики рассмотрим ниже.

Размыкатели тока РВ 50/50

Размыкатели PB50/50 рассчитаны на протекание зарядного тока ИН-1 амплитудой до 50 кА в течение нескольких секунд и его выключение менее, чем за миллисекунду. Конструкция устройства разработана в НИИЭФА, модернизирована и доведена до рабочих характеристик в ТРИНИТИ. Разрез размыкателя показан на рис. 66.



Рис. 66. Устройство размыкателя PB50/50: 1, 6 – верхнее и нижнее контактные кольца (медь); 2, 5 – верхняя и нижняя контактные вставки (медь); 3 – электродетонатор; 4 – BB (~2 г); 7 – центрирующее кольцо (капролон); 8 – корпус (СТЭФ)

Установочные крепления (справа) служат одновременно и подводами тока. Они изготовлены из стали и соединяются непосредственно с выводами накопительного соленоида ИН-1. Подаваемый на размыкатель PB50/50 импульс инициирования (запуска) обеспечивает срабатывание электродетонатора АТЭД-15 *3* и подрыв BB *4*, расположенного между двумя массивными медными контактными вставками *2*, *5*. Вставки сверху и снизу поджаты медными контактными кольцами *1*, *6*. Под действием давления продуктов детонации ВВ контактные вставки деформируют кольцевые буртики контактных колец, и выходят в конические полости уловителей сверху и снизу корпуса размыкателя. Конфигурация уловителей предотвращает резкий удар вставок по корпусу размыкателя при их остановке. В нижнем уловителе предусмотрены резьбовые отверстия для извлечения вставки, расклиненной в конической полости после срабатывания размыкателя. Внутренние элементы размыкателя I, 2, 5, 6 заменяются после каждого пуска.

Оптимизация конструкции и доводка размыкателей тока до заданных рабочих параметров – достаточно сложная задача. В данном случае перед монтажом 30 размыкателей на ИН-1 необходимо было знать время прерывания тока, поведение напряжения на контактах, а также необходимое время восстановления электрической прочности зазора между контактами после обрыва тока.

Для получения характеристик размыкателей был собран испытательный стенд, на котором была исследована работа размыкателей при переключении тока. Определено время восстановления электрической прочности путем подачи высокого напряжения (до 50 кВ) зондирующего импульса. Электрическая схема стенда показана на рис. 67. Конденсаторная батарея C_0 обеспечивала зарядку схемы начальным током. Два последовательно соединенных размыкателя *P*₁ и *P*₂ переключали ток накопительной индуктивности L₁ в нагрузку L_H. Величина индуктивности нагрузки могла меняться в пределах от 5 до 20 мкГн. Схема с двумя размыкателями давала возможность провести зондирование размыкателей высоким напряжением, а также защищала систему запуска низковольтной батареи С₀. Зондирующий импульс подавался от конденсатора С₁ замыкателем 31 на среднюю точку размыкателей (Б) после обрыва тока. Выбор величины L_H определялся индуктивностью соединительной линий размыкателя PB 50/50 с выключателем второй ступени в схеме ИН-1.

Примерно через 2 мс после включения батареи C_0 на размыкатели P_1 и P_2 одновременно подавался импульс запуска детонаторов. С последующей задержкой 1 – 3 мс в точку *Б* между размыкателями подавался импульс высокого напряжения ~ 45 кВ. В ходе экспериментов регистрировались токи в размыкателях $I_{\rm PB}$ и Рис. 67. Электрическая схема испытательного стенда: P_1 и P_2 – размыкатели тока PB50\50; $C_0 =$ = 45 мФ (5 кВ); $C_1 = 25$ нФ (50 кВ); $L_1 = 55$ мкГн; $L_{\rm H} = 5-20$ мкГн



нагрузке $I_{\rm H}$, а также напряжения в точке A (датчик $R_{\rm Д}$ с трансформатором тока) и точке Б (высокоомный делитель, на схеме не показан).

Результат типичного эксперимента с переключением тока в нагрузку $L_{\rm H}$ =15 мкГн приведен на рис. 68 ($U_{\rm PB}$ – измеряемое напряжение на размыкателе).

Рис. 68. Результаты эксперимента с величиной нагрузки $L_{\rm H} = 15$ мкГн. В интервале времени 0–2 мс происходила зарядка накопительной индуктивности L_1 током



Осциллограммы показали, что максимальное напряжение на одном размыкателе при прерывании тока не превышало 1 кВ, время прерывания тока равно 0,32 мс. Импульс высокого напряжения, поданный через 2 мс после срабатывания размыкателей, привел к пробою промежутка между вставками в одном из размыкателей.

Такие характеристики были неудовлетворительными как по электрической прочности, так и быстродействию, поэтому далее исследовалась динамика перемещения контактов размыкателя. Для определения скорости расхождения контактных вставок один из размыкателей был оснащен показанной на рис. 69 системой оптоэлектронных датчиков, корпус которой вворачивался в одно из отверстий нижнего уловителя. Прерывание шести световых пучков обеспечивалось штоком, изображённым на рис. 70, соединенным с нижней контактной вставкой.



Рис. 69. Система оптических датчиков для контроля перемещения нижней вставки



Рис. 70. Нижняя контактная вставка со штоком (после срабатывания)

Измерение скорости движения нижней контактной вставки дало величину 26 м/с. Из показанных на рис.71 результатов видно, что длина разгона контактов составляет не более 2–3 мм, а остальное расстояние вставка проходит с постоянной скоростью.



Рис. 71. Результаты измерения скорости движения нижней контактной вставки для двух вариантов заменяемых элементов: *1* – исходный, *2* – доработанный

Кроме этого было экспериментально определено, что увеличение массы BB с 2,0 до 4 г мало влияет на скорость движения вставки. Это связано с быстрым разрушением центрирующего кольца, истечением и быстрым падением давления радиально истекающих продуктов детонации.

Поэтому конструкция была изменена, как показано на рис. 72.



Рис. 72. Доработанные элементы размыкателя

Центрирующее кольцо 1 было выполнено из СТЭФ с круговой намоткой арматуры, выдерживающей давление продуктов детонации без разрушения. Его высота увеличена до 25 мм, обеспечивая каждой из вставок 2 разгонную длину более 10мм. Осевое отверстие для заряжания ВВ и электродетонатора после установки заряда закрывалось резьбовым колпаком 4, для чего мягкая медная вставка усилена стальным вкладышем 3 с ответной резьбой. В колпаке 4 оставлено отверстие Ø 4 мм только для выводов проводов электродетонатора. В последующих испытаниях для зарядов использовалось минимальное количество ВВ от 1,5 до 2 г. Измерения показали, что скорость движения вставки увеличилась до 40 м/с. Как видно из представленной на рис. 71 зависимости, вставка ускоряется по всей высоте центрирующего кольца, выдерживающего давление продуктов ВВ. Зарегистрированные осциллограммы прерывания тока с доработанным комплектом элементов приведены на рис. 73 и 74. Напряжение на каждом размыкателе увеличилось почти в два раза и составило 1,9 кВ. Вместе с этим изменился и характер поведения этой величины, которая растет в ходе всего процесса прерывания тока. Зондирующий импульс напряжения величиной 45 кВ размыкатели выдержали при величине задержки, равной 1 мс после подачи импульсов запуска.



Рис. 73. Результаты эксперимента с доработанным комплектом элементов. Видна низкочастотная наводка на осциллограмме U



Рис. 74. Напряжение на одном размыкателе, токи в размыкателях и нагрузке

Дополнительные эксперименты выявили, что вставки расходятся на полное взаимное расстояние 9 см за время ~ 900 мкс. Но еще до их остановки в уловителях при подаче зондирующего импульса в момент t = 700 мкс от момента подрыва BB размыкатель выдерживает расчетное напряжение 45 кВ. Эти данные были весьма важными при выборе режима работы ИН-1 по следующим причинам:

– при полном токе, переключаемом 30-ю размыкателями PB 50/50 во вторую ступень коммутации активные потери в кабельных линиях соединений приводят к заметным потерям энергии, составляющем величину ~ 1 МДж/мс;

– время задержки, обеспечивающее восстановление электрической прочности выключателей РВ 50/50, пропорционально сечению разрушаемых токопроводов размыкателей второй ступени, требующих энергии заряда ВВ.

Характеристики размыкателей РВ50/1000

Устройство сильноточного размыкателя, позволяющего прерывать токи до 1 МА показано на рис. 75.

Его корпус выполнен в виде двух стальных обойм, соединенных на прочной трубе из СТЭФ (Ø 200×30) с помощью клея и поперечных штифтов. Обоймы стянуты шпильками через изоляторы. При снятом верхнем флянце в корпус размыкателя устанавливается заменяемая сборка, состоящая из сворачиваемого из листа тонкого алюминиевого цилиндра, снаружи которого расположены кольцевые ножи. Объем внутри цилиндра заполня-



Рис. 75. Устройство размыкателя РВ50/1000: *I* – электродетонатор; *2* – ВВ; *3* – парафин; *4* – разрушаемый цилиндрический токопровод; *5* – набор ножей; *6* – стеклотекстолитовая труба; *7* – металлический корпус с креплениями

ется парафином, в котором сформировано центральное отверстие для размещения заряда ВВ. Заряд состоит из нескольких отрезков детонирующего шнура с полной массой до 30 г и электродетонатора АТЭД-15.

Предварительные исследования характеристик работы размыкателя также получены во время стендовых испытаний при относительно малых токах. Ток величиной 50–60 кА переключался в нагрузку величиной 4 мкГн. Электрическая прочность размыкателя после срабатывания определялась подачей на него статического напряжения, при повышении которого происходил электрический пробой. Подводящие провода при этом отключались.

При использовании алюминия марки АМГ толщиной 1,5 мм, сечение которого изначально было выбрано с избыточным запасом, не удавалось получить полного и симметричного разрезания фольги даже при некотором (допустимом прочностью корпуса) увеличении количества ВВ. Поэтому в последующих экспериментах была использована алюминиевая фольга толщиной 0,5 мм марки АД. В экспериментах были также испытаны варианты сборок с кольцевыми ножами различной формы: треугольные из стеклотекстолита; треугольные с плоскими стальными вставками; прямоугольные стальные. Они показаны на рис.76, а. Для кольцевых ножей из СТЭФа с треугольным сечением изображена фотография заменяемой сборки после срабатывания показана. Наилучшие результаты получены на прямоугольных стальных ножах: напряжение переключения тока составило 4,8 кВ против 4,0 кВ для ножей из стеклотекстолита с треугольным сечением. Длительность прерывания тока на стеклотекстолитовых ножах составила величину ~ 70 мкс. Результаты эксперимента приведены на рис. 77.

При использовании стальных ножей прямоугольного сечения достигалось наименьшее время (40 мкс) прерывания тока. Значительное уменьшение сечения разрушаемых токопроводов стало возможным благодаря достигнутому ранее повышению быстродействия размыкателей тока секций PB50/50.

Также был испытан вариант с усиленным (двойным) токопроводом из фольги (0,5 + 0,5 мм) без снятия электрических параметров пуска, который показал, что и в этом случае фольга равномерно разделяется на отдельные фрагменты.



Рис. 76. Различные конфигурации ножей для разрушения токопровода размыкателя (*a*); фотография заменяемой сборки с ножами треугольной формы после срабатывания (б)

Рис. 77. Результаты экспериментов с размыкателем РВ50/1000: Фольга толщиной 0,5 мм, индуктивность нагрузки 4 мкГн, —— ножи из СТЭФа треугольного сечения; --- металлические прямоугольные ножи



Результаты пробного пуска стенда МОЛ (ИН-1 с разрядом на МУ) с доработанными размыкателями обоих типов приведены на рис. 78. При зарядном токе с генератора 12 кА величина умноженного тока накопителя ИН-1 составила 350 кА с средним временем переключения тока размыкателями РВ50\50 0,26 мс.

Полный ток каждой пары размыкателей PB50\1000 показан на рис. 79. При величине тока 140 кА среднее время срабатывания размыкателей PB50\1000, шунтированных емкостью C_1 , составила 50 мкс. Пробный пуск не выявил неполадок и отказов ни в одном из 34-х задействованных взрывных коммутаторов. Как и планиро-

валось при разработке схемы стенда, с помощью согласующей емкости удалось почти в 1,4 раза поднять амплитуду тока зарядки МУ по сравнению с полной величиной разрядного тока ИН-1. Таким образом, были получены необходимые данные, которые позволили продолжить работы по дальнейшему строительству стенда МОЛ, и перейти к вводу в рабочий режим магнитного усилителя.





Рис. 79. Значения токов в размыкателях PB50\1000

Приведенный выше пример не исчерпывает многообразия конструкций взрывных размыкателей тока. При повышении требуемого быстродействия сильноточных размыкателей количество используемого в них ВВ может многократно возрастать (до 10 кг и более), а для разрушения токопроводов могут использоваться хорошо известные эффекты кумуляции потоков диэлектрического вещества. Такие приемы широко используются в технике генерации быстрых импульсов тока с помощью взрывомагнитных генераторов. Однако эти устройства отличаются полным самоуничтожением при рабочем пуске и выходят за рамки лабораторных электрофизических устройств, которые здесь рассматривались.

Плазменные прерыватели тока

Впервые плазменный прерыватель тока (ППТ) был предложен и экспериментально показан в действии в 1985г. Это предложение Б. Ковальчука и Г. Месяца привлекло внимание, так как открывало возможности дальнейшего обострения мощности микросекундных генераторов напряжения. К настоящему времени данное направление мощной импульсной техники привело к созданию устройств, позволяющих коммутировать мегаамперные токи при напряжении 1–3 MB, и получило достаточную теоретическую базу, позволяющую прогнозировать параметры ППТ при их разработке и создании.

Обычно применяемая схема генератора с ППТ показана на рис. 80 и представляет собой L-C контур (ГИН), замкнутый через проводящий размыкатель, $R_{\Pi\Pi T}$, который шунтирует нагрузку. Собственно ППТ представляет собой два коаксиальных электрода, разделенных зазором и помещенных в вакуумный объем.

Рис 80 Схема генератора с ППТ и его устройство: C емкость ГИН; L₁ и L_2 – наружная и вакуумная части накопительной индуктивности; 1 - токовод ГИНа ; 2 – изолятор; 3 - соленоидвнешнего магнитного поля *H_z*; 4 – линия соелинения ППТ-нагрузка; 5 – нагрузка; 6 – вакуумная камера; 7 – переплазменная



мычка между сэлектродами ППТ; 8 – плазменная пушка; I – ток ППТ; H_{0} – собственное магнитное поле тока I, H_{z} – поле соленоидов

Ввод тока в вакуумный объем к ППТ осуществляется через токовод *l*, проходящий через высоковольтный вакуумный изолятор. Система импульсных пушек *8*, каждая из которых представляет собой два изолированных электрода с небольшим (~ 1 мм) пробиваемым промежутком, позволяет перед началом подачи импульса с ГИН равномерно заполнить плазмой зазор между электродами ППТ и обеспечить, замыкание токового контура с малым активным импедансом.

Через несколько микросекунд после срабатывания пушек включают ГИН, ток в цепи ППТ нарастает, энергия емкости преобразуется в индуктивностях L_1 и L_2 в магнитную энергию за время $\tau_{np} = 0,3-2$ мкс, соответствующее четверти периода разряда ГИН. Нижняя граница для τ_{np} здесь определена частотными характеристиками ГИН, использующими доступные промышленные конденсаторы. Верхняя граница – существованием приэлектродных плазменных явлений, которые при больших временах (более 3 мкс) протекания тока приводят к прогрессирующему увеличению концентрации плазмы в зазоре. Параметры контура, геометрия зазора и пушек подбираются таким образом, чтобы по достижению амплитудного значения тока режим проводимости заканчивался, и в ППТ происходил обрыв тока. Типичная картина последовательности процесса протекания токов в ППТ показана на рис. 81.

В фазе обрыва тока ППТ на нагрузке развивается напряжение $U_{\text{макс}} = (L_1 + L_2) dI/dt$, большая часть тока переключается в нагрузку Z. На входном изоляторе появляется только часть напряжения $U_{\text{макс}}$. При правильном выборе соотношения между L_1 и L_2 конструкцию изоляции внешних цепей можно сделать достаточно простой.

Как сказано выше, для обрыва тока в ППТ необходимо выполнить ряд взаимосвязанных условий. Можно выделить три типичных режима работы ППТ в зависимости от характерного размера зазора *а* между электродами и концентрации инжектированной в зазор плазмы *n*: режим магнитной гидродинамики (МГД), режим электронной магнитной гидродинамики (ЭМГ) и режим эрозии проводимости.

МГД режим реализуется при выполнении неравенства:

$$na^2 >> Mc^2/Ze^2$$
,

где M – масса иона, Z – зарядовое число. При этом условии динамика плазмы описывается моделью «снежного плуга». Токовая оболочка движется вперед по направлению к нагрузке под действием силы F = [JB], причем движение плазмы у анода происходит интенсивнее из-за спадающего по радиусу распределения магнитного поля. У поверхности анода образуется вакуумный «клин», ограничивающий область плотной плазмы. Когда вершина «клина» достигает границы инжектированной плазмы, у анода формируется протяженная область малоплотной плазмы и ППТ переходит в ЭМГ режим, условия для которого удовлетворяют соотношению:



$$mc^2/e^2 < na^2 < Mc^2/Ze^2.$$

Рис. 81. Токи ППТ и характерные времена процессов: *I* – ток плазменных пушек, *2* – ток ГИНа, *3* – ток в нагрузке *Z*

При этом электроны становятся замагниченными в собственном магнитном поле протекающего тока. В этой фазе ППТ ток в радиальном направлении переносится ионами, а магнитное поле аномально быстро проникает в плотную плазму. Теоретически решение задачи выражается в появлении волны конвективного переноса магнитного поля (КМС «волны»), вызывая замагниченность электронной компоненты и возрастание скорости токового фронта до $V_{\phi} = 10^6 \text{ м} \cdot \text{c}^{-1}$. При этом наступает фаза эрозии проводимости– радиальное электрическое холловское поле $E = [\mathbf{vB}]/\mathbf{c}$ ускоряет ионы к катоду. Этот процесс при отсутствии возобновления источника ионов принимает форму волны разрежения плазмы, распространяющейся от катода к аноду. ППТ переходит в вакуумный режим, где вблизи поверхности анода при больших токах нагрузки может работать магнитная изоляция. Омическое сопротивление ППТ в момент срабатывания достигает величины порядка 1 Ом. Переход к режиму эрозии проводимости плазмы можно усилить, прикладывая внешнее соленоидальное магнитное поле, направленное вдоль оси системы, как показано на рис. 80.



Рис. 82. Система коаксиальных плазменных пушек, установленных на аноде. Для сокращения числа питающих кабелей каждая пара пушек включена последовательно, для чего установлены перемычки на внешних электродах коаксиалов

Успешная работа ППТ согласно описанному выше упрощенному механизму прерывания тока требует взаимного согласования всех элементов, режимов работы и выбора соответствующих материалов для изготовления устройства.

Ряд проведенных исследовательских работ показал, что:

– при генерации высоких напряжений U > 1 MB энергия, поглощаемая в размыкателе (расходуемая на ускорение ионов) и необходимая для

организации режима прерывания тока, должна быть сравнима или даже превышать энергию импульса тока в нагрузке;

– максимальная величина напряжения, развиваемая на ППТ при обрыве тока $U_{\Pi\Pi T}$ связана с напряжением питающего ГИНа соотношением $U_{\Pi\Pi T} = \alpha U_{\Gamma u H}^{4/7}$, где коэффициент α принимает значения от 2,5 до 3,5 (последняя величина при использовании внешнего магнитного поля);

– максимальный заряд, пропущенный через ППТ на стадии проводимости (зарядки индуктивного накопителя), не должен превышать 3–5 мК на 1 см длины окружности зазора ППТ.

Кроме того, амплитуда токов используемых плазменных пушек, пример исполнения которых приведен на рис. 82, достаточна близка к амплитуде коммутируемого тока.



Рис. 83. Общая компоновочная схема вакуумной камеры с ППТ-5: 1 – модуль сопряжения; 2 – изолятор; 3 – левый экран; 4 – правый экран; 5 – корпус ППТ с фланцами; 6 –вакуумная камера; 7 – катушка магнитной системы ППТ; 8 – диэлектрические фланцы; 9 – инжекторы ППТ; 10 – диэлектрические кольца ППТ; 11 – катод; 12 – анодный узел; 13 – форкамера; 14 – изолятор; 15 – диэлектрическая стенка с уплотнениями

Данное, сравнительно новое направление развития мощных быстрых (100 нс) прерывателей тока в последние годы интенсивно развивается и привлекает повышенный интерес в связи с задачами создания крупных установок УТС с инерциальным удержанием плазмы. На рис. 83 показан разработанный проект ППТ для прерывания тока индуктивного накопителя с током 2 МА при напряжении 3 МВ, разработанный в ГНЦ РФ ТРИНИТИ. Он будет изготовлен и опробован в 2009 г.

Для этого случая входное питающее напряжение ИН составляет около 1 MB, поэтому изолятор 2 выполнен составным из колец с разнесенным вдоль потенциалом. Для этого выполнены расчеты распределения электрических полей и установлены выравниваюцие экраны. Также рассчитывалась конфигурация магнитного поля в зазоре ППТ, создаваемого встроенной в катод *11* соленоидоидальной катушкой. Система инжекции плазмы предусматривает размещение на катоде 160 коаксиальных плазменных пушек.

2.4. Импульсный вывод магнитной энергии из индуктивных накопителей

В начале данной главы были отмечены трудности, связанные с импульсным питанием индуктивных нагрузок. Низкий КПД (~0,25) передачи энергии может быть еще оправдан при импульсном питании нагрузки термоядерного драйвера, хотя бы потому, что плазменный размыкатель (ППТ) в этих схемах требует для срабатывания (эрозии проводимости плазмы) большого вложения энергии. Кроме того, другие способы получения электрических импульсов такой мощности ~10¹⁵ Вт нам пока неизвестны.

Однако нет никаких оснований распространить эти количественные результаты в общем виде на все ИН, работающие с индуктивными нагрузками. В данном разделе показано, как можно удовлетворить законы сохранения энергии и магнитного потока, и одновременно снять жесткие ограничения, упомянутые в начале главы.

Рассмотрим простейшую схему (рис. 84), и напишем для нее основные соотношения, связывающие начальные и конечные величины токов.



Рис. 84. Переключение начального тока I_0 из ИН в индуктивную на-грузку. $I_{\rm H}$ — конечная величина тока

Из уравнения сохранения магнитного потока

$$L_0 I_0 = (L_0 + L_{\rm H}) I_{\rm H}$$

можно определить величину конечного тока

$$I_{\rm H} = I_0 / (1 + L_{\rm H}/L_0) = I_0 / (1 + \lambda).$$

Здесь введен параметр согласования индуктивностей $\lambda = L_{\rm H}/L_0$, который используем для компактности выражений.

Подстановка этой величины І_н в уравнение баланса энергии

$$L_0 I_0^2 = (L_0 + L_{\rm H}) I_{\rm H}^2 + 2W_{\rm p}$$

вместе с введенным параметром определяет энергию в нагрузке:

$$W_{\rm H} = W_0 \lambda / (1 + \lambda)^2$$

и величину энергии *W*_p, рассеянной коммутатором *К*:

$$W_{\rm p} = W_0 \lambda / (1 + \lambda). \tag{2.2}$$

Отметим, что максимальная величина КПД $\eta_{\text{макс}} = W_{\text{нмакс}} / W_0 = 0,25$ в нагрузке достигается при оптимальной величине параметра $\lambda = 1$.

Разложим W_н на множители

$$W_{\rm H} = [\lambda/(1+\lambda)] [W_0/(1+\lambda)].$$
 (2.3)

Первый множитель в квадратных скобках – это относительное содержание оставшейся в системе магнитной энергии в индуктивной нагрузке. Если рассматривать его в отрыве от процесса, то мы заинтересованы увеличивать параметр λ , концентрируя магнитную энергию в нагрузке. Второй член – собственно оставшаяся магнитная энергия в системе после того, как коммутатором *К* была рассеяна (безвозвратно потеряна) энергия W_p :

$$W_0 - W_p = W_0 - W_0 \lambda/(1 + \lambda) = W_0 [1 - \lambda/(1 + \lambda)] = W_0/(1 + \lambda).$$

Отсюда следует, что при попытке увеличить параметр λ система импульсной передачи резко уменьшает магнитную энергию, преобразуя ее в коммутаторе тока (и вероятнее всего в тепловую энергию. В конфигурации схемы (см. рис. 84) эту ситуацию преодолеть не представляется возможным, так как средняя величина тока, протекающего через размыкатель больше, чем величина тока нагрузки, а напряжения на этих элементах равны.

Обратимся к ИН с системой умножения токов в N секциях. Большая величина разрядного тока не обязывает пропускать полный ток $I \sim NI_0$ через размыкатели одновременно. Поочередным подключением отдельных секций-катушек с индуктивностью L_i к нагрузке $L_{\rm H}$ на рис. 85 можно добиться, чтобы ток нагрузки в течение двух-трёх шагов процесса превысил зарядный ток накопителя I_0 , а следовательно, и амплитуду коммутируемого тока каждого из последующих размыкателей.



Рис. 85. Эквивалентная схема секционированного ИН при последовательной работе *N* размыкателей тока

Преодолев это ограничение, оценим количественно ожидаемые изменения в величине каждого из сомножителей в (2.3). Для потерь энергии имеем теперь *N* шагов переключения тока, для каждого из которых эквивалентная индуктивность в (2.2) $\lambda^* < L_{\mu}/L = \lambda/N$ (отношение индуктивностей справа от размыкателя к индуктивности слева). Начальная энергия каждой секции W_0/N , откуда следует, что при каждом шаге рассеивается знергия $W_0/N [\lambda/N/(1 + \lambda/N)] \sim$ $\sim W_0/N^2$, если параметр λ не сильно превышает 1. Тогда оценка второго сомножителя в (2.3) с учетом суммирования шагов (и суммирования потерь энергии) дает величину $(1 - W_0/N)$. Даже полагая λ ~1 в первом сомножителе (2.3), ожидаемый КПД импульсной передачи энергии составит около 0,5. Далее баланс энергии, оставшейся в системе, легко сместить в сторону увеличения ее в нагрузке, даже за счет некоторого роста рассеянной энергии. Но это уже задача оптимизации системы, как и многих других моментов, которые здесь не затронуты.

В заключение заметим, что на схеме рис. 85, все из i < N секции ИН, включенные в процесс импульсной передачи, параллельны. Поэтому при каждом очередном шаге срабатывания коммутатора K_i токи в них убывают на одну и ту же величину. Положим с некоторой долей оптимизма, что и убыль энергии ΔW_i в них одинакова. Тогда, если левая на рис. 85 секция L_i вместе с коммутатором, прерывающим ток I_0 , является генератором напряжения, диссипирующим часть энергии секции, то комплекс из *i*-1 секции в правой части передает энергию непосредственно в нагрузку $L_{\rm H}$ бездиссипативным образом. В этом можно убедиться непосредственно, вычисляя ток в секции L_i после коммутации. Результат не зависит от наличия и величины токов в секциях с n < I, которые замыкаются через индуктивную нагрузку $L_{\rm H}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика и техника мощных импульсных систем. Сборник статей под редакцией академика Е.П.Велихова. ИАЭ им.И.В.Курчатова. Энергоатомирдат, 1987.

2. Савичев В.В. Основные злементы знергосиловых комплексов. Изд-во МГТУ, 1991.

3. Электротехническое оборудование для злектрофизических и термоядерных установок. ВЭИ, Внешторгиздат, 1992.

4. Coradeschi T., Colombo G., Davis A. et al. 52 Megajoule Electric Gun Test Facility. IEEE Trans. Magn, 1993, v.1, p.923–928.

5. Мезонье Ч., Линхарт Дж., Гурлан К. Быстрая передача энергии с помощью взрывающихся фольг // ПНИ.1966. Т.36. С. 96–98.

6. Бурцев В.А., Литуновский В.П., Прокопенко В.Ф. Исследование электрического взрыва фольг // ЖТФ.1977. Т.47. Вып. 8. С. 1642–1661.

7. Азизов Э.А., Алексеев Ю.А., Бревнов Н.Н., Велихов Е.П. и др. Основные физические и инженерные проблемы создания токамака с сильным полем и адиабатическим сжатием плазмы // Атомная энергия. 1982. Т.52. Вып.2. С. 108–112.

8. Азизов Э.А., Иванов И.А., Лотоцкий А.П. Каскадные системы с индуктивными накопителями // Электричество. 1990. № 4. С. 25–31.

9. Rech B.M., Zowarka R.C. Design and construction of a two-stage opening switch. IEEE Trans. Magn., 1986, v.22., N 6, p.1706–1710.

10. Мощный трехступенчатый выключатель для электроразрядного устройства с индуктивным накопителем знергии / Иванов И.А., Лотоцкий А.П., Трухин В.А. // Приборы и техника зксперимента. 1982. № 4. С. 104–108.

11. McCormick T., Barber J. A 500 kA repetitive opening switch. IEEE Trans. Magn., 1986, v.22, No 6, p.1613–1618.

12. Ford R.D., Johnson N.E., Christopher F. et al. Evolutionary Development of Multi-function "RAP" Explosive Operated Switching Cartridge. IEEE Trans. Magn. 1993, v.29, No 1, p.943–948.

13. Parsons W.M., Parker J.V., Thullen P. Railgun power supply system utilizing traction motor and vacuum interrupters. "5-th IEEE Pulsed Power Conf., Arlington, 10-12 June,1985. Dig. techn. pap." New York, N.Y., 1985, p.542–544.

14. Гальчук Ф.З., Дружинин А.С., Крылов В.А. и др. Некоторые вопросы создания индуктивных накопителей энегии трансформаторного типа с высоким козффициентом связи и большими постоянными времени обмоток // Доклады 3 всесоюзн. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов (Ленинград, май, 1984), ЦНИИатоминформ, 1984. Т.3. С. 142–148.

15. Лотоцкий А.П. Генерация сильных магнитных полей в камере термоядерной установки с адиабатическим сжатием плазмы // Доклады 3 всесоюзн. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов (Ленинград, май, 1984), ЦНИИатоминформ, 1984. Т.3. С. 127–133. 16. Palmer M.R. Motivation for Near Term Gun Launch to Space Demonstration and Variable Inductance Power Supply Concept to Minimize Initial Demonstration Costs. IEEE Trans. Magn., 1993,v.29, No 1, p.478–483.

17. Лотоцкий А.П. Индуктивные накопители энергии. Учебное пособие для студентов МИФИ. МИФИ, 1992.

18. Грабчак Н.Н., Крылов М.К., Лебедев А.Д., Лотоцкий А.П. Исследование ускорителя с металлическим снарядом при распределенном вводе энергии по длине канала Материалы 2 всесоюзного семинара по динамике сильноточных дуг в магн. поле. Новосибирск, 4–6 декабря, 1991. Новосибирск, ин-т теплофизики. 1992. С. 104.

19. Сахаров А.Д. ДАН, 1962.

20. Морохов И.Д., Велихов Е.П., Волков Ю.М. Импульсные МГДгенераторы и глубинное электромагнитное зондирование земной коры // Атомная знергия. 1978. Т.44. № 3. С. 213–219.

21. Cnare E.C., Brooks W.P., Cowan M. Pulsar: an Inductive Pulse Power Sourse. 2-nd IEEE Int. Pulse Power Conf. Lubbock, Texas, 1979. Dig. Technical Papers. IEE Catalog Number 79 CHI 505-7.

22. Титов В.М., Швецов Г.А. Генерация электрических импульсов высокой мощности с помощью кумулятивного взрыва // Физика горения и взрыва. 1980. Т.5. С. 47–56.

23. Marshall R.A. Railguns. Proc.9-th US nat. Conf. \ Appl.Techn., Ithaca, N 4, 21–25 June, 1982, p.361–366.

24. Powell J.D., Keith J. Analysis of an inverse railgun power source. IEEE Trans. Magn., 1986, v.22, No 6, p.1669–1674.

25. Summerfield M. Development of a Linear Piston-Type Pulse power Electric Generator for Powering Electric Guns. IEEE Trans. Magn., 1993, v.29, p.1066–1069.

26. Капица П.Л. Экспериментальные исследования в магнитных полях // Успехи физических наук. 1931. Т.11. Вып. 4. С.533–553.

27. Joseph J.P., Skvarenina. L.T. An Evaluation of Battery Power Supplies for Electric Railguns. 4-th IEEE Pulsed Power Conf., Albuquerque, 6-8 June,1983. Dig.Techn. Pap. New-York,N.Y.,1983, p.15–18.

28. Лотоцкий А.П. Об эффективности передачи магнитной энергии из индуктивных накопителей // Электричество. 1985. № 6. С. 64.

29. Лотоцкий А.П. О перспективах использования индуктивных накопителей энергии для питания мощных магнитных систем. Препринт ИАЭ-3714, ИАЭ. – М., 1982.

30. Мазулин А.В., Панков И.И., Рябцев Г.В. и др. Питание индуктивной нагрузки от индуктивного накопителя по схеме удвоения тока. Препринт ИАЭ-4543/8, М.: ЦНИИатоминформ, 1987.