

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

М.Т. ПИЧУГИНА

МОЩНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2013

УДК 621.374.(075.8)
ББК 32.847.я73
ПЗ64

Пичугина М.Т.

ПЗ64 Мощная импульсная техника/М.Т.Пичугина – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 104 с.

Учебное пособие написано в соответствии с ООП направления 140400 – Электроэнергетика и электротехника. Пособие включает в себя следующие разделы: емкостные накопители энергии, индуктивные накопители, взрывомагнитные генераторы, ударные и униполярные генераторы; генераторы импульсных напряжений по схеме Аркадьева-Маркса. Пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Высоковольтные электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.374.(075.8)
ББК 32.847.я73

Рецензенты

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ИСЭ СО РАН
Э.Н. Абдуллин

Кандидат технических наук, научный сотрудник ИФПМ СО РАН
В.П. Черненко

Доктор технических наук, профессор НИ ТПУ
В.И. Курец

© Пичугина М.Т. 2013
©Томский политехнический университет, 2013
© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2013

Глава 1

ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

1.1 Емкостные накопители энергии

1.1.1 Общие сведения об емкостных накопителях

Емкостные накопители энергии (ЕНЭ) широко используются в физических экспериментах благодаря ряду достоинств:

- малому внутреннему сопротивлению ($< 10^{-3}$ Ом);
- малой индуктивности (до 10^{-9} Гн).

Это позволяет обеспечить малое время разряда ($10^{-4} - 10^{-8}$ с), высокую эффективную передачу энергии в нагрузку, возможность достижения рекордных значений мощности (до 10^{13} Вт) и скорости нарастания тока (10^{13} А/с) [1].

Кроме того, ЕНЭ обладают рядом эксплуатационных удобств: отсутствием движущихся элементов, простотой обслуживания, модульным принципом исполнения, позволяющим отключать и легко заменять элементы при случайных повреждениях.

Недостатком ЕНЭ является низкая плотность энергии по сравнению с другими типами накопителей ($0,1 \div 0,5$ МДж/м³), при этом у крупных емкостных накопителей среднее значение плотности энергии (в расчете на весь объем) в 2 – 2,5 раза меньше. Поэтому ЕН с энергией

$10^6 - 10^7$ Дж представляют собой крупные сооружения, занимающие залы и здания (рис. 1.1).

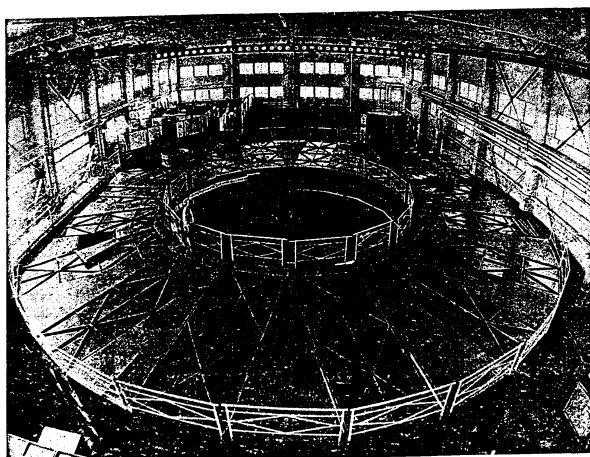


Рис. 1.1 Общий вид комплекса ГИТ16 [2]

ЕН классифицируются по следующим признакам:

- по зарядному напряжению: низкого напряжения (10 кВ), среднего напряжения (10 – 100кВ), высокого напряжения (> 100 кВ);
- по запасаемой энергии: малой (до 100 кДж), средней (до 1000 кДж), большой (> 1000 кДж);
- по длительности импульса тока: миллисе-

кундного диапазона, микросекундного диапазона и наносекундного диапазона.

Кроме того, ЕНЭ следует различать по типу конструкции и способов соединения элементов.

Традиционной является конструкция ЕНЭ в виде однотипных конденсаторов, соединенных в разряде параллельно (генератор импульсных токов) или последовательно (генератор импульсных напряжений). В таких генераторах конденсаторы состоят из отрезков полосковых линий, которые соединены между собой и с выводом через индуктивности. При этом даже в режиме короткого замыкания выполняется следующее условие

$$\omega_0 \cdot \tau_0 \ll 1, \quad (1.1)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{L_c C}$ – частота собственных колебаний конденсатора с индуктивностью L_c и емкостью C ; $\tau_0 = 1/\sqrt{\varepsilon \cdot \mu_0}$ – время пробега электромагнитной волны в диэлектрике с постоянной ε вдоль фольги секций (обкладок) конденсатора.

Условие (1) означает, что режим разряда квазистационарный. Это позволяет считать конденсатор сосредоточенным элементом цепи с индуктивностью L_c , емкостью C и сопротивлением R_c .

В последние годы все большее развитие получают накопители в виде формирующих линий. Это, как правило, многокаскадные емкостные накопители высокого напряжения ($10^5 - 10^6$ В), работающие в наносекундном диапазоне времени, главная особенность которых состоит в том, что энергия в последних каскадах запасается в электрическом поле полосковых или коаксиальных линиях.

В режиме короткого замыкания разряд линии происходит в волновом режиме, если выполнено условие, обратное (1):

$$\omega_0 \cdot \tau_0 > 1, \quad (1.2)$$

или для однородной линии

$$l_0 \frac{L'}{L_a} > 1, \quad (1.3)$$

где l_0 – длина линии; L' – ее индуктивность на единицу длины; L_a – индуктивность вывода линии.

В рабочем режиме кроме L_b следует учитывать индуктивность L_n . Поэтому в цепи с малым сопротивлением линия может разряжаться либо как обычный конденсатор (если не выполнено условие (1.2) и (1.3),

где вместо L_B фигурирует $(L_B + L_H)$, либо в волновом режиме, если при замене L_B на $L_B + L_H$ выполнены условия (1.2) и (1.3). Активное сопротивление, включенное последовательно с L_H , приближает разряд к волновому [1].

Хотя различие конденсаторных батарей и формирующих линий принципиально, между ними имеются существенные конструктивные различия.

Рассмотрим ЕНЭ конденсаторного типа, выполненные по схеме параллельного соединения конденсаторов (генераторы импульсных токов). Структурная схема генераторов импульсных токов (ГИТ) представлена на рисунке (1.2). Энергия запасается в конденсаторной батарее КБ, которая заряжается до заданного напряжения с помощью зарядного устройства ЗУ и разряжается на нагрузку через систему коммутации СК, состоящую из коммутаторов и устройств управления ими. Ток от конденсаторов к разряднику и далее к нагрузке подводится с помощью соединительных элементов СЭ (кабелей или листовых шин).

Как правило, накопители с энергией 10^5 Дж и выше создают в виде однотипных модулей, состоящих из отдельных конденсаторов или групп конденсаторов с общим коммутатором. Энергия, запасаемая в одном модуле, ограничена значением, не приводящим к взрыву при пробое одного из конденсаторов и разряда на него всех конденсаторов модуля. Обычно она не превышает $10 \div 50$ кДж и лишь при использовании специальных мер защиты может быть увеличена до $100 - 200$ кДж.

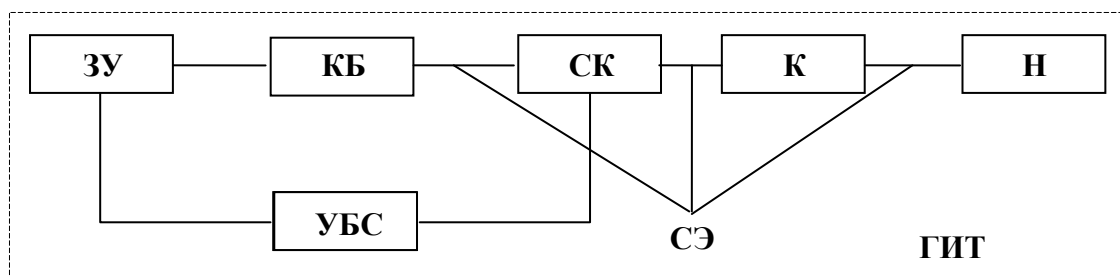


Рис. 1.2. Структурная схема ГИТ:

*ЗУ – зарядное устройство; КБ – конденсаторная батарея;
СК – система коммутации; К – коллектор; УБС – устройство управления,
блокировки и синхронизации; Н – нагрузка, СЭ – соединительные элементы*

Каждый модуль может быть независимо подключен к нагрузке. Если цепи разряда отдельных модулей электрически не связаны (например, при питании устройств для накачки лазеров), то ГИТ представляет собой совокупность независимых элементов, включенных одновременно или со сдвигом во времени. Более типичны накопители, в которых ток от всех модулей должен быть передан в общую нагрузку, при этом

используется дополнительная сборная шина К, к которой подводится ток от модулей и присоединяется к нагрузке Н. Обязательным элементом накопителей являются УБС, обеспечивающие нормальную и безопасную работу. В таблице 1.1 приведены характеристики генераторов импульсных токов большой энергии среднего уровня напряжения [1].

Таблица 1.1

Характеристики ГИТ большой энергии среднего уровня напряжения

Установка	W_0 , МДж	U_0 , кВ	L_0 , нГн	I_0 , МА	τ_0 , мкс	$L_0 \cdot W_0$ нГн·М Дж	L_H , нГн	η_0	N_C , шт	$L_C/N_C \cdot L_0$
Фарос	2	20	4	32	10	8	6	0,6	1170	0,026
Изар-1	2,67	40	4,1	36	5,7	10,9	7,5	0,65	1300	0,022
Тэатрон	1,07	40	5,7	19	2,1	6,1	5,0	0,48	1334	-
Спиллак	10	60	0,21	310	1,7	2,1	0,9	0,8	3024	0,1
Шива	1,1	100	2,2	32	1,1	2,4	-	-	120	0,15
МКБ	2,7	30	6	30	9,4	16,2	-	-	2000	0,05
Утро	0,7	50	6,2	16	3,1	4,4	-	-	192	0,25

Примечания: I_0 , τ_0 – расчетные значения амплитуды тока и времени нарастания при коротком замыкании.

Из таблицы видно, что для ГИТ, предназначенных для получения большого тока с малым временем нарастания в малоиндуктивной нагрузке, характерно существенное различие в параметрах. Другие ГИТ служат лишь как источники энергии, и к ним эти требования не предъявляются. Сюда относятся накопители с рекордно большим энергозапасом для питания лазеров, а также ЕНЭ низкого напряжения, предназначенные для создания магнитного поля в больших многовитковых соленоидах установок ТОКАМАК, в магнитных системах, используемых для транспортировки плазменных сгустков и электронных пучков.

Основные требования, предъявляемые к таким установкам: надежность работы накопителя; отсутствие пробоев конденсаторов и изоляции; отсутствие самопроизвольного срабатывания конденсаторов; синхронность работы модулей.

Такие же требования предъявляются к ГИТ, предназначенным для получения больших токов в малоиндуктивной нагрузке. Кроме того, выдвигаются дополнительные требования, связанные с обеспечением высокой эффективности передачи энергии в нагрузку и высокой скоро-

сти нарастания тока. Такие требования могут быть выполнены в ГИТ, собственная индуктивность которых мала.

Это следует из известного выражения для энергии, переданной в индуктивную нагрузку в момент максимума тока, и для начальной скорости нарастания тока [1]

$$W_m = W_0 \cdot k_0 \cdot L_H / (L_0 + L_H) = W_0 \cdot k_0 \cdot \eta_0, \quad (1.4)$$

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_0 = \frac{U_0}{(L_0 + L_H)}, \quad (1.5)$$

где W_0 – начальная энергия накопителя; L_H – индуктивность нагрузки; U_0 – начальное напряжение батареи; k_0 – коэффициент, учитывающий уменьшение энергии к моменту максимума тока вследствие потерь в активных сопротивлениях цепи разряда.

В ГИТ, питающих малоиндуктивную нагрузку, собственную индуктивность можно снизить путем уменьшения индуктивности ее составляющих: конденсаторов (L_c), соединительных элементов (L'_m), коммутаторов (L_p), проводников, соединяющих модули с нагрузкой (L_T) и коллектора (L_K). Собственная индуктивность ГИТ

$$L_0 = \left(\frac{L_c}{N_{cm}} + L'_m + L_p \right) \frac{1}{N_m} + L_T + L_K, \quad (1.6)$$

где N_{cm} – число коллекторов в модуле; N_m – число модулей;
 $N_{cm} \cdot N_m = N_c$ – полное число конденсаторов.

Индуктивность L_0 сама по себе мало характеризует качество конструкции ГИТ, т.к. этот показатель не является «удельным» показателем. Более удобно сравнивать ГИТ разной энергии по параметру $L_0 W_0$: чем он меньше, тем совершеннее конструкция ГИТ по обеспечению малой индуктивности. Для оценки того, насколько хорошо согласованы между собой элементы цепи и каковы резервы уменьшения полной индуктивности ГИТ при заданных параметрах конденсаторов, целесообразно ввести удельный параметр $L_c / (L_0 N_c)$ (табл. 1.1), характеризующий относительный вклад конденсаторов в полную индуктивность ГИТ. Из формулы (1.6) видно, что основной вклад в L_0 в малоиндуктивных ГИТ вносят два последних члена выражения, тогда как индуктивность модулей $L_m = \left(\frac{L_c}{N_{cm}} + L'_m + L_p \right) \frac{1}{N_m}$ относительно мала, потому что N_m велико. При этом параметр $L_c / (L_0 N_c)$ много меньше единицы.

Очевидно, что в крупных ГИТ существует возможность снижения собственной индуктивности главным образом благодаря применению более совершенных соединительных элементов, а при существующей их конструкции можно использовать конденсаторы с большей индуктивностью, мало изменив L_0 .

У генераторов с малой энергией, состоящих из небольшого числа конденсаторов, вклад их индуктивности, а также индуктивности коммутаторов в L_0 существенен. В таких ГИТ небольшое значение индуктивности можно получить лишь снижением индуктивности всех элементов, в том числе и конденсаторов.

Например: ГИТ с энергией 50 кДж ($U_0 = 50$ кВ) состоит из 6 модулей, включающих 1 конденсатор и 1 твердотельный разрядник. Полная индуктивность короткого замыкания $L_0 = 4$ нГн, $L_C = 8$ нГн, $L_P \cong 6$ нГн, $L_K = 1,4$ нГн (конденсаторы подключены непосредственно к сборной шине). При этом $L_0 W_0 = 0,2$ МДж·нГн; $L_C / (L_0 N_C) = 0,3$, что намного выше, чем у ГИТ большой энергии [1].

Задача минимизации собственной индуктивности ГИТ – комплексная. Разумный уровень требований к L_0 определяется параметрами нагрузки (нет смысла добиваться значения L_0 , меньших, чем $(0,1 - 0,2) L_H$). А требования к индуктивности элементов цепи должны диктоваться вкладом этих элементов в общую индуктивность. Вместе с тем важны конструктивные и экономические соображения, в частности простота конструкции элементов ГИТ, удобство их монтажа и обслуживания, а также стоимость ГИТ, включая стоимость монтажных работ.

При разработке ГИТ возникают следующие основные проблемы: создание конденсаторов с повышенной удельной энергией; разработка системы коммутации с требуемой пропускной способностью; разработка соединительных элементов.

1.1.2 Зарядные устройства емкостных накопителей

Назначением зарядных устройств (ЗУ) емкостных накопителей является зарядка накопительных конденсаторов до напряжения U_0 , значение которого должно регулироваться в широких пределах. Необходимая энергия обычно потребляется от сети, поэтому ЗУ, как правило, состоит из повышающего трансформатора, выпрямителя с токоограничивающими элементами, устройств регулирования и автоматизации зарядки, измерительных устройств (рис. 1.3).

В режиме зарядки емкостный накопитель представляет собой батарею параллельно соединенных конденсаторов с суммарной емкостью C

и сопротивлением утечки R_y , влиянием которых обычно при расчетах пренебрегают. Целью расчетов является разработка экономичного и надежного ЗУ, обеспечивающего заданные параметры режима зарядки: U_0 , t_3 , точность стабилизации напряжения и тока на заданных уровнях, время цикла $t_{ц}$ «зарядка-разряд», время непрерывной работы.

Определению подлежат следующие параметры: способ зарядки, энергетические характеристики выпрямителя, регулятора и токоограничивающих элементов [3].

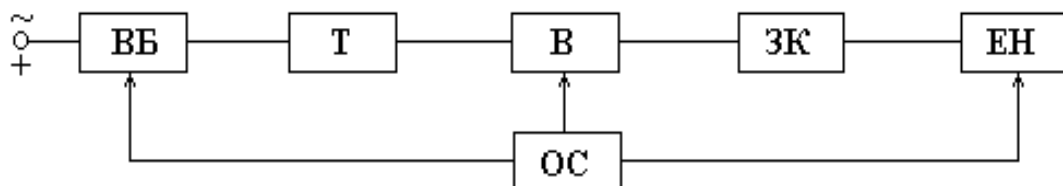


Рис. 1.3. Структурная схема зарядного устройства:

$В$ – выпрямитель управляемый или неуправляемый; $Т$ – повышающий трансформатор; $ЗК$ – зарядный контур (дроссель, резистор или дозаторы); $ВБ$ – входной блок (для постоянного тока – это инвертор, для переменного тока – схемы токоограничения); $ОС$ – система управления, на которую поступают сигналы обратной связи по зарядному току и напряжению на $ЕН$

Коэффициент полезного действия ЗУ

$$\eta_3 = W_0 / (W_0 + W_a), \quad (1.7)$$

где W_a – энергия активных потерь в зарядных цепях.

Для определения расчетных мощностей трансформаторов и токоограничивающих элементов необходимо найти среднеквадратичные значения фазных токов

$$I_{1,2} = \sqrt{\frac{1}{t_y} \int_0^{t_3} i_{1,2}^2(t) dt} \quad (1.8)$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S = (S_1 + S_2) / 2, \quad (1.9)$$

где $S_1 = m_1 U_1 I_1$, $S_2 = m_2 U_2 I_2$ – расчетные мощности первичной и вторичной обмоток; m_1 и m_2 – соответствующее число фаз; U_1 и U_2 – действующие значения фазных напряжений.

В качестве базисных величин используют средние значения зарядного тока I_{cp} и полной мощности P_{cp} :

$$I_{cp} = C \cdot U_0 / t_3; \quad (1.10)$$

$$P_{cp} = C \cdot U_0^2 / t_3. \quad (1.11)$$

Наиболее распространенным и простым способом является зарядка от источника неизменного напряжения через токоограничивающий резистор R_0 .

$$U_0 = i_c \cdot R_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt. \quad (1.12)$$

Помножив выражение (1.12) на i_c и проинтегрировав от 0 до t_3 , получим необходимую для зарядки энергию

$$W = C \cdot U_0^2 = (1 - e^{-t_3/R_0C}). \quad (1.13)$$

Отсюда максимальный КПД зарядки (при $t_3 \rightarrow \infty$) равен

$$\eta_3 = W_0 / (W_0 + W_a) = W_0 / W = 0,5 \quad (1.14)$$

и не зависит от величины сопротивления R_0 .

В зависимости от величины емкости C ток зарядки и мощность P_0 , потребляемая от источника питания, изменяются от максимальных значений в начале процесса зарядки до минимальных, когда по достижении заданного напряжения U_0 зарядка прекращается. Источник питания в этом случае работает с низким и переменным КПД.

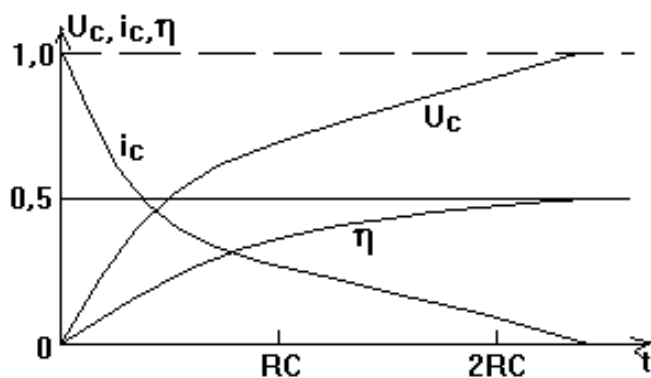


Рис. 1.4. Энергетические характеристики процесса зарядки в режиме неизменного напряжения [3]

На рисунке (1.4) показано изменение энергетических характеристик во времени в процессе зарядки в относительных единицах.

Более эффективным способом является зарядка неизменным током, что достигается применением целого класса индуктивно-емкостных схем (ИЕП), преобразующих источник неизменного напряжения в источник неизменного тока (рис.1.5, а-г). Выход ИЕП подключается к повышающему трансформатору.

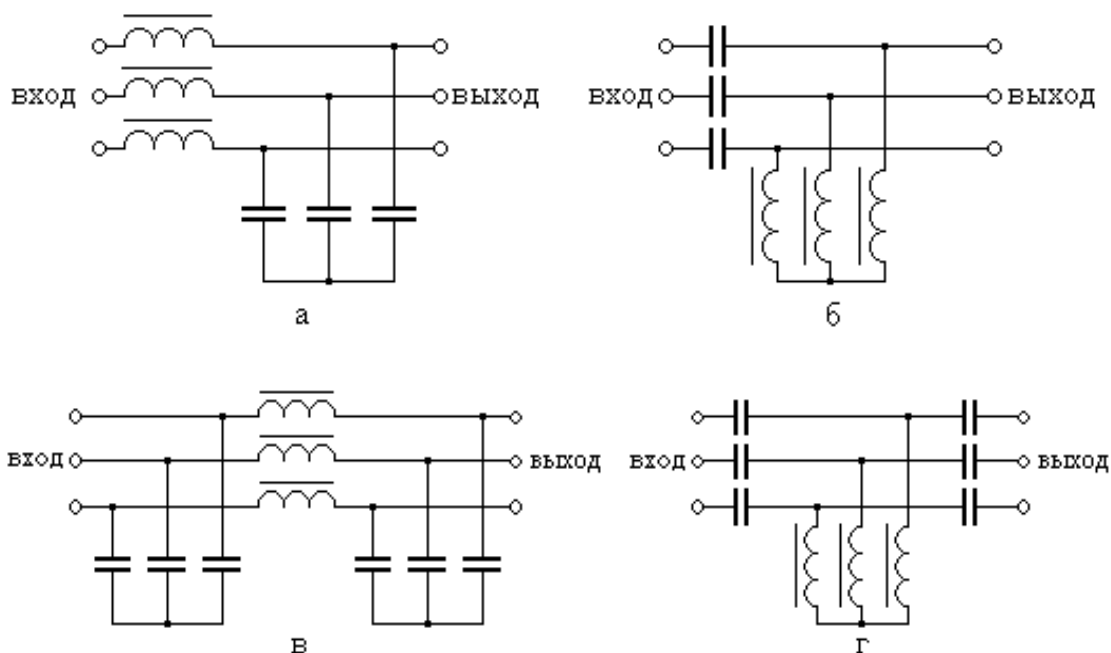


Рис. 1.5. Схемы простейших ИЕП [3]

Помимо функций токоограничения ИЕП выполняют функцию формирования зависимостей $U_{сн}(t)$ и $i_{сн}(t)$ (режим неизменной мгновенной мощности $U_{сн}(t) \cdot i_{сн}(t) = \text{const}$, режим заряда с максимальным КПД при $i_{сн} = \text{const}$ и т.д.).

В идеальном случае необходимо обеспечить линейное нарастание напряжения на емкости. При этом установленная мощность уменьшается почти в 3 раза по сравнению с зарядкой от источника постоянного напряжения, а КПД увеличивается на 30-50 %.

На рисунке (1.6) приведены энергетические характеристики процесса зарядки в режиме постоянного тока в относительных единицах.

Рассмотрим принцип действия простейших ИЕП в однофазном варианте. К схеме (рис. 1.7) подводится синусоидальное напряжение $U = \sqrt{2} \cdot U \cdot \text{Sin}\omega t$. Значение L и C подбирается так, чтобы $X_L = X_C$

или $\omega L = 1/\omega C$. При $Z_H = \infty$ (х.х) в цепи RLC наступает резонанс токов на частоте ω и напряжение х.х на выходных зажимах равно

$$U_H = U_{XX} = \frac{U}{R} X_C. \quad (1.15)$$

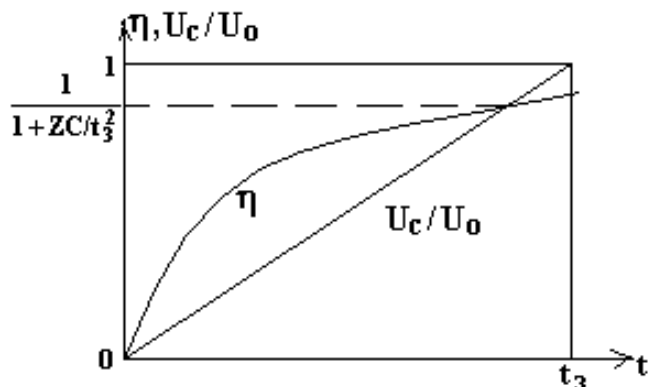


Рис. 1.6. Энергетические характеристики процесса зарядки в режиме постоянного тока [3]

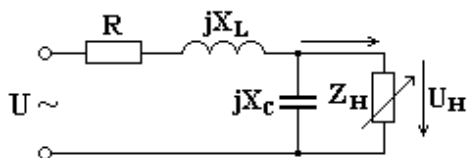


Рис. 1.7. Принципиальная схема однофазных ИЕП [3]

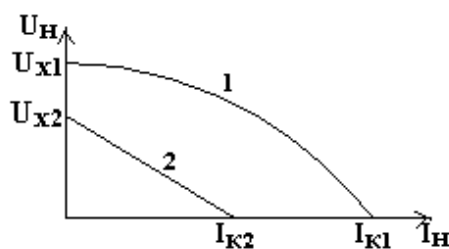


Рис. 1.8. Вольт – амперные характеристики [3]

При $Z_H = 0$ (к.з.) ток

$$I_{кз} = U / \sqrt{R^2 + X_L^2}. \quad (1.16)$$

Варьируя параметры R , L и C , можно изменять вид внешних (вольт – амперных) характеристик $U_H = \varphi(I_H)$. Реально сопротивлением Z_H является входное сопротивление трансформатора, которое изменяется в процессе заряда ЕН. Вид внешних характеристик ИЕН влияет на зависимости $U_{сн}(t)$ и $i_{сн}(t)$.

Внешние вольт – амперные характеристики приведены на рисунке (1.8), где U_{X1} и U_{X2} – напряжение х.х при R_1 и R_2 , соответственно токи к.з. – I_{K1} I_{K2} . Кривая 1 – при $R = R_1$ и кривая 2 – при $R = R_2$, $R_2 > R_1$.

Если одновременно менять R , L и C ИЕП, то можно в очень широких пределах изменять вид внешних характеристик и зависимости $U_{CH}(t)$ и $i_{CH}(t)$. Трехфазные ИЕП различного схемного исполнения действуют аналогично, т.е. изменяют вид внешних вольт – амперных характеристик.

Если входной блок ВБ (рис.1.3) представляет собой последовательно включенные нерегулируемые параметры R , L или R , C , то для управления зарядными процессами выпрямитель В выполняют управляемым, как правило, на тиристорах с фазовым регулированием посредством регулирования угла управления.

Если ВБ представляет собой нерегулируемые токоограничивающие дроссели, а выпрямитель В неуправляемый, то в зарядном контуре ЗК после выпрямителя часто применяют дозаторы энергии – емкостные или индуктивные.

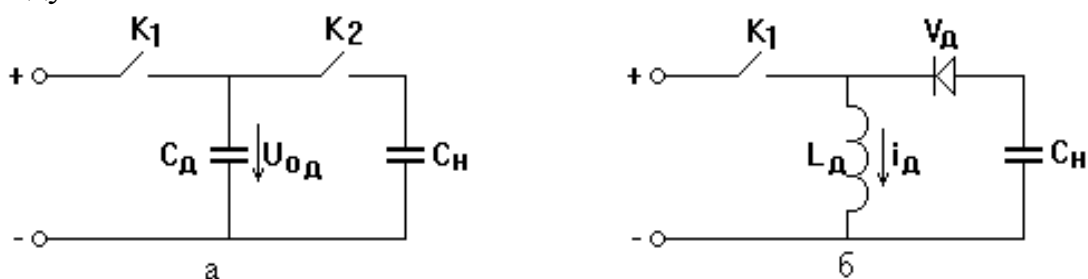


Рис. 1.9. Принцип действия емкостного (а) и индуктивного (б) дозирования[3]

При замкнутом K_1 и разомкнутом K_2 (рис. 1.9 (а)) в C_d запасается доза $W_d = 0,5 C_d \cdot U_a^2$. При замыкании K_2 и размыкании K_1 энергия W_d передается накопителю C_n . Аналогично работает и индуктивный дозатор L_d , а роль K_2 выполняет диод V_d , через который передается доза энергии $0,5 L_d \cdot i^2$ в C_n [3].

1.1.3 Разрядные процессы в емкостных накопителях энергии

Различные схемы разрядных контуров можно представить в виде последовательных соединенных C_n , L_p , R_p (рис 1.10).

Параметры L_p и R_p включают в себя индуктивности и активные сопротивления нагрузки L_n , R_n , проводов разрядного контура $L_{пр}$, $R_{пр}$, и дуги разрядного устройства L_d , R_d . В общем случае параметры $L_p(i_p)$ и $R_p(i_p)$ являются переменными, зависящими от i_p , причем зависимости

могут быть нелинейными. Нелинейность определяется электромагнитными процессами в разрядных устройствах и нагрузке.

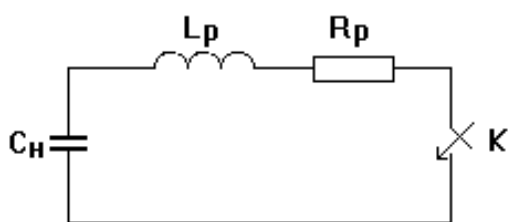


Рис. 1.10. Разрядная схема ГИТ:
 C_H – емкость накопителя;
 L_p – индуктивность разрядного контура; K – коммутатор;
 R_p – активное сопротивление разрядного контура.

При постоянных L_p и R_p можно записать [3]

$$U_{C_H} = i_p \cdot R_p + \frac{di_p}{dt} + \left(\frac{1}{C_H} \right) \int i_p dt \quad (1.17)$$

При начальных условиях $i_p(0) = 0$, $U_{C_H}(0) = U_p$, $R < 2\sqrt{L_p/C_H}$.

Решение этого уравнения имеет вид:

$$i_p = \frac{U_p}{L_p} \cdot t \cdot e^{-\left(\frac{R_p}{2L_p}\right)t}; \quad (1.18)$$

$$i_p = \frac{U_p}{\omega_o \cdot L_p} \cdot e^{-\left(\frac{R_p}{2L_p}\right)t} \cdot \text{Sin}(\omega_o t + \pi); \quad (1.19)$$

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{L_p \cdot C_H} - \frac{R_p^2}{4L_p^2}}. \quad (1.20)$$

Считаем, что разрядные сопротивления и индуктивности

$$\begin{aligned} R_p &= R_{np} + R_H \gg R_d \\ L_p &= L_{np} + L_H \gg L_d \end{aligned}$$

R_H и $L_H = \text{const}$.

КПД разрядного контура определяется выражением

$$\eta_p = \frac{W_{p,H}}{W_H}, \quad (1.21)$$

где $W_{p.n} = R_n \cdot \int_0^{t_p} i_p^2(t) dt$ – энергия, выделенная в нагрузке;

$$W_n = \frac{C_n \cdot U_p^2}{2}$$
 – энергия, запасенная в накопителе.

Для анализа колебательных разрядов в разрядных контурах с искровыми разрядниками и с постоянной индуктивностью используют следующий приближенный метод [3].

На первом этапе анализа полагают $R_n = 0$, $R_{np} = 0$. Считают, что затухание колебательного разряда определяется только потерями в дуге искрового промежутка. На втором этапе считают, что $R_p = R_n + R_{np}$.

При идеализации процесса в дуге принимают, что на протяжении одного периода колебаний разрядного тока температура дуги и электродов мало изменяется. Поэтому напряжение U_d между электродами, зависящее в основном от t^0 , в случае принятой идеализации почти не будет зависеть от мгновенного значения тока, но меняет знак при изменении направления тока.

Вольт – амперная характеристика описывается выражением

$$U_d = e_d \cdot \text{Sign } i_p. \quad (1.22)$$

Осциллограмма $U_d(t)$, снятая с искрового промежутка разрядника, приведена на рисунке (1.11).

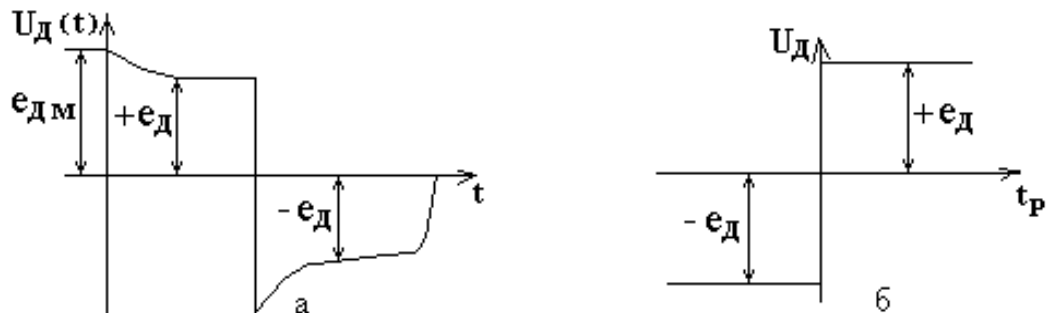


Рис. 1.11. Вольт – амперные характеристики дуги:
а – реальная (осциллограмма); б – идеализированная

Отсюда видно, что на большей части полупериода $U_d \approx \text{const}$ и не зависит от мгновенного значения $i_p(t)$, меняющегося на том же интервале времени.

Уравнение баланса напряжений разрядного контура будет

$$U_L + U_d + U_{C_n} = 0. \quad (1.23)$$

Дифференциальное уравнение относительно разрядного тока

$$L_p \cdot \frac{di_p}{dt} + e_D \cdot \text{Sign } i_p + \left(\frac{1}{C_H} \right) \cdot \int i_p dt = 0. \quad (1.24)$$

Уравнение не имеет решения в замкнутой форме из-за наличия сигнатуры. Поэтому рассматриваем решение на каждом полупериоде с постоянным знаком тока i_p и напряжением U_D . Из формулы (1.22) получаем уравнение колебательного контура без затухания

$$\frac{d^2 i_p}{dt^2} + \frac{i_p}{L_p C_H} = 0. \quad (1.25)$$

Решением этого уравнения будет выражение

$$I_p(t) = I_M \cdot \text{Sin } \omega_0 t, \quad (1.26)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{L_p C_H}$.

Затухание же реального разрядного тока в данной упрощенной методике учитывается следующим образом.

Для того чтобы удовлетворялось выражение (1.21), при интегрировании $U_{C_H} = \left(\frac{1}{C_H} \right) \int i_p dt$ постоянная интегрирования должна быть принята в виде $\pm e_D$, т.е.

$$U_{C_H}(t) = -\frac{I_m}{\omega C_H} \cos \omega_0 t \pm e_D. \quad (1.27)$$

Амплитуды токов и напряжений определяются из начальных условий.

Примем $U_{C_H}(0) = U_p$ (ток на первом полупериоде принимаем положительным). Получаем

$$-U_p = -\frac{I_m}{\omega_o \cdot C_H} - e_D. \quad (1.28)$$

Амплитуда тока на первом полупериоде

$$I_{m_1} = \omega_o C_H (U_p - U_D) = (U_p - e_D) \cdot \sqrt{C_H / L_p}. \quad (1.29)$$

В следующем полупериоде меняют знаки ток и e_D , а условие непрерывности тока в конце первого полупериода при $\omega_0 t = \pi$ можно записать

$$\frac{I_{m_1}}{\omega_o C_H} - e_D = \frac{I_m^2}{\omega_o C_H} + e_D, \quad (1.30)$$

откуда

$$I_{m_2} = I_{m_1} - 2e_D \cdot \sqrt{C_H/L_P}. \quad (1.31)$$

Соответственно

$$U_{c_2} = U_{c_1} - 2e_D = U_P - 2e_D. \quad (1.32)$$

Для n – го полупериода получим

$$I_{m_n} = I_{m_1} - 2(n-1) \cdot e_D \cdot \sqrt{C_H/L_P}, \quad (1.33)$$

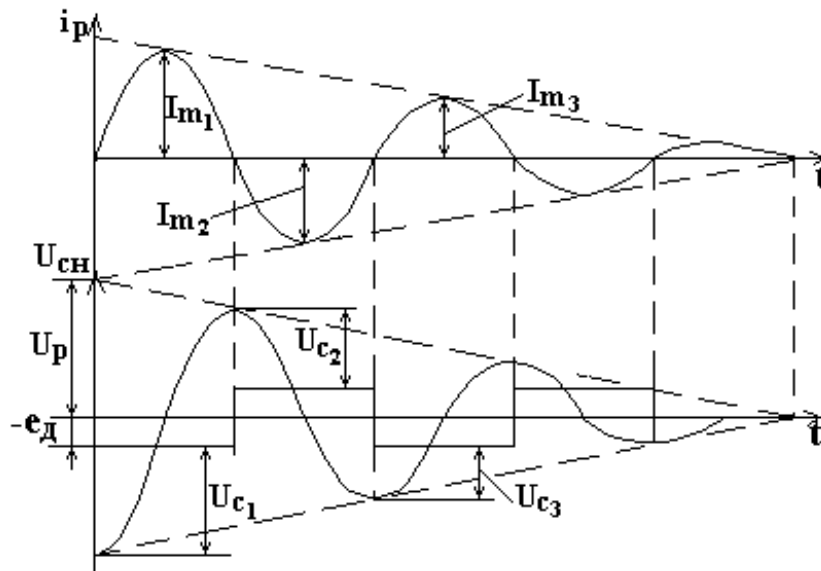


Рис. 1.12. Разрядные токи и напряжения в разрядном процессе ЕН [3]

$$U_{c_n} = U_P - 2(n-1) \cdot e_D. \quad (1.34)$$

На рисунке (1.12) показаны зависимости тока и напряжения на ЕН в разрядном процессе в соответствии с выражениями (1.31) и (1.32). В отличие от линейной колебательной цепи с резистивными сопротивлениями, в цепях с затуханием, определяемым потерями в дуге, амплитуда колебаний убывает не по экспоненциальному, а по линейному закону и процесс во времени затухает много быстрее. Колебания состоят из N

полупериодов и продолжаются до тех пор, пока напряжение на ЕНЭ не уменьшится до значения e_D . Отсюда следует условие

$$U_P - 2N \cdot e_D = e_D, \quad (1.35)$$

из которого получаем выражение для числа полупериодов колебаний

$$N = (U_P - e_D) / 2e_D = 0,5(U_P/e_D - 1). \quad (1.36)$$

Остаточное напряжение на ЕН $U_{c_0} < e_D$.

Время разряда

$$t_P = T_O N = 0,5 \cdot \pi \sqrt{L_P C_H} (U_P/e_D - 1). \quad (1.37)$$

Если в контуре помимо дуги, определяющей затухание процесса, включено резистивное линейное сопротивление R_P , то ток в течение полупериода определяется тем же выражением, что и без дуги

$$i_P \approx I_m e^{-\delta t} \cdot \text{Sin}(\omega_o t + \pi), \quad (1.38)$$

где $\delta = R_P / 2L,$ $\omega_o = \sqrt{\frac{1}{L_P C_H} - \frac{R_P^2}{4L_P^2}}.$

Если δ невелико, то для 1-й амплитуды тока, которая определяется из начальных условий при первом пробое искрового промежутка соотношение (1.29) сохраняет силу, а для следующих полупериодов изменяются граничные условия (1.30) и (1.31) с учетом снижения напряжения из-за влияния R_P . В конце первого полупериода напряжение на ЕН будет не $U_P - 2e_D$, а определяется при $t = \pi/\omega_0$ соотношением

$$U_{C_2} = (U_P - e_D) \cdot e^{-\pi\delta/2\omega_o} - e_D. \quad (1.39)$$

Амплитуда на втором и последующих полупериодах дополнительно снижается вследствие экспоненциального затухания. При совместном действии дуги и сопротивления затухание происходит быстрее, чем при действии одного из этих параметров порознь.

Если напряжение на ЕН снижается в течение первого полупериода до напряжения повторного зажигания дуги или еще ниже, то в цепи получается лишь аperiodический всплеск тока.

Анализ показывает, что, в отличие от линейного контура без дуги, когда $R_{P_{кр}} > 2\sqrt{\frac{L_P}{C_H}}$, критическое сопротивление может оказаться существенно меньше $2\sqrt{\frac{L_P}{C_H}}$. Зная $i_P(t)$ и время разряда t_P , можно определить потребляемую энергию и КПД разрядного процесса [3].

1.1.4 Импульсные конденсаторы

Конденсаторы, используемые в ГИТ, чаще всего работают в режиме, близком к короткому замыканию: колебательный разряд на малую индуктивность при частоте колебаний $10^4 - 10^7$ Гц.

Основное требование, предъявляемое к конденсатору – запастись максимально возможную энергию в единице объема. Она определяется рабочей напряженностью E_P , при которой работает изоляция и диэлектрической проницаемостью ε изоляции.

К основным факторам, ограничивающим E_P , относятся: кратковременная прочность изоляции секций конденсатора, разрушение диэлектрика частичными разрядами (ЧР), тепловой режим конденсатора.

Если конденсатор работает в частотном режиме, то E_P определяется тепловым пробоем конденсатора. Если тепловой режим не является определяющим, то ЧР в толще диэлектрика и на закраинах секций являются определяющими.

Внутренняя индуктивность конденсатора должна быть уменьшена в разумных пределах, не меньше 10 % от общей индуктивности ГИТ L_0 . При разработке и создании импульсных конденсаторов для емкостных накопителей энергии стремятся обеспечить следующие требования: возможно больший запас энергии в единице объема, малую внутреннюю индуктивность L_C , малые потери энергии в разрядном режиме, высокую динамическую устойчивость внутренних соединений секций, групп секций и выводов конденсаторов, достаточный срок службы в режиме многократных разрядов на нагрузку [1].

Удельная энергия активного объема конденсатора определяется диэлектрической проницаемостью ε диэлектрика и рабочей напряженностью электрического поля E_P

$$W_{об} = \varepsilon \cdot E^2 / 2. \quad (1.40)$$

Для изготовления импульсных конденсаторов применяются диэлектрики на основе конденсаторной бумаги, синтетических пленок,

пропитанных жидким диэлектриком с $\epsilon = (2-7) \epsilon_0$. Допустимая рабочая напряженность $E_{\text{доп раб}}$ определяется кратковременной прочностью изоляции и длительной прочностью или процессами старения диэлектрика в импульсном режиме. Основное значение при этом имеют тип применяемого диэлектрика и режим работы конденсатора.

На значение $E_{\text{доп раб}}$ оказывают основное влияние следующие факторы: гарантированный ресурс конденсатора, надежность, форма импульса в разрядном режиме, частота повторения импульсов.

Перечисленные характеристики режима работы определяют условия старения изоляции, которое происходит, в основном, из-за частичных разрядов (ЧР). Развитие ЧР во включениях при импульсном напряжении принципиально не отличается от того, что происходит на переменном напряжении [4].

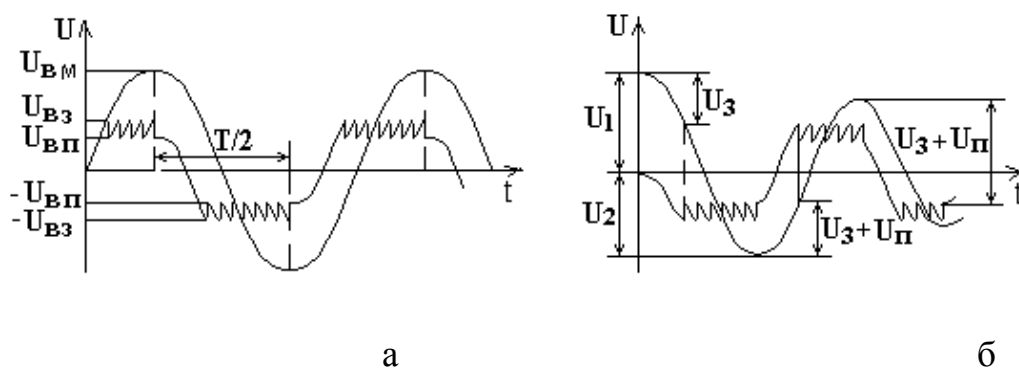


Рис. 1.13. Развитие частичных разрядов в изоляции
 а – при синусоидальном напряжении; б – при импульсном напряжении [4]

U_{BM} - амплитуда напряжения, которая была бы достигнута на включении без ЧР;

U_{B3} - напряжение зажигания разряда во включении (рис.1.13);

U_{BP} - напряжение погасания разряда во включении.

Число ЧР за один полупериод $T/2$ определяется из следующих соотношений

$$m_M = \frac{2U_{BM} - (U_{B3} + U_{BP})}{U_{B3} - U_{BP}}. \quad (1.41)$$

Если амплитуда напряжения, приложенного к диэлектрику, U_M , то из рисунка 1.14

$$U_{BM} = U_M \cdot \eta, \quad (1.42)$$

где $\eta = C_D / (C_D + C_B)$, $U_3 = U_{B3} / \eta$, $U_{PI} = U_{BP} / \eta$,

тогда выражение (1.41) примет вид

$$m_M = \frac{2U_M - (U_3 + U_{II})}{U_3 - U_{II}}. \quad (1.43)$$

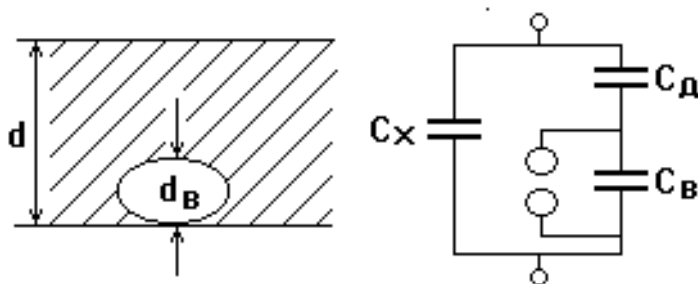


Рис. 1.14. Схема замещения при наличии частичного разряда в диэлектрике: C_B – емкость включения; C_D – емкость диэлектрика, расположенного над включением; C_X – емкость образца

При работе конденсаторов в ГИТ изоляция конденсаторов находится под воздействием затухающих колебательных импульсов напряжения. Число частичных разрядов за один импульс можно определить аналогичным образом. При этом число разрядов m за первый полупериод приложенного напряжения будет равно

$$m_1 = \frac{U_m \cdot \eta + U_2 \cdot \eta - U_{вз}}{U_{вз} - U_{вн}} = \frac{U_m + U_2 - U_3}{U_3 - U_n}. \quad (1.44)$$

За k -й полупериод

$$m_k = \frac{U_k \cdot \eta + U_{k+1} \cdot \eta - (U_{вз} + U_{вн})}{U_{вз} - U_{вн}} = \frac{U_k + U_{k+1} - (U_3 + U_n)}{U_3 - U_n}, \quad (1.45)$$

где $U_m = U_1$ – величина зарядного напряжения; U_k – амплитуда k -го импульса.

$$U_k = U_{k+1} \cdot e^{-\frac{T}{2} \cdot \alpha}, \quad (1.46)$$

где α – коэффициент затухания разрядного контура.

Частичные разряды будут происходить до тех пор, пока амплитуда напряжения на включении не станет ниже напряжения зажигания частичных разрядов $U_{вз}$.

Число таких полупериодов n будет определяться из соотношения

$$U_m \cdot e^{-\frac{T}{2}\alpha h} = U_3 \quad \text{или} \quad n = \frac{2}{T\alpha} \ln \frac{U_m}{U_3}. \quad (1.47)$$

Общее число разрядов за один импульс воздействующего напряжения

$$m_u = \sum_{k=1}^n m_k. \quad (1.48)$$

Энергия, рассеиваемая при единичном ЧР,

$$W_{\epsilon} = \frac{C}{2} (U_{вз}^2 - U_{вн}^2). \quad (1.49)$$

Энергия, затраченная на ЧР за один импульс,

$$W_{И} = W_{\epsilon} \cdot m_{И} \quad (1.50)$$

Объем газа, выделившегося за каждый импульс в результате разложения пропитывающего состава частичными разрядами,

$$V_{Г} = W_{И} \chi, \quad (1.51)$$

где χ - коэффициент, показывающий, сколько кубических сантиметров газа выделяется в жидком диэлектрике под воздействием ЧР с энергией 1 Дж.

Для минерального масла $\chi = 3 \cdot 10^{-4} \div 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{Дж}$.

Надежную работу изоляции конденсаторов можно получить, если интенсивность газовыделения не будет превышать газопоглощающей способности жидкого диэлектрика.

Если Z_1 – число разрядов конденсатора, то условие равновесия между газовыделением в результате ЧР и газопоглощающей способности жидкого диэлектрика

$$W_{и} \cdot \chi \cdot Z_1 = V_t, \quad (1.52)$$

где V_t – количество газов, поглощенных к моменту времени t .

Общий объем выделившегося газа не должен превышать максимального количества газа, которое может быть поглощено данным объемом жидкого диэлектрика. Этот объем равен

$$\int_0^{\infty} V_t dt = V_0, \quad (1.53)$$

и тогда

$$W_u = \frac{V_0}{Z \cdot \chi}. \quad (1.54)$$

Интенсивность газовыделения резко возрастает после достижения некоторой $E_{кр}$, связанной с переходом процессов на краю электродов от короны к интенсивным скользящим разрядам (рис. 1.15).

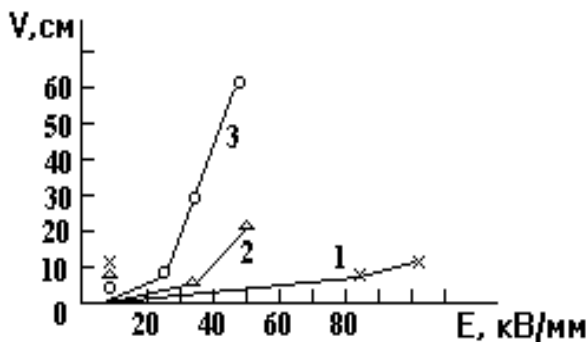


Рис. 1.15 Зависимость объема выделившегося газа от напряженности электрического поля при работе в импульсном режиме: пропитка конденсаторным маслом, число импульсов 1000, декремент 1,1; 1 – КОН-II, $h = 0,08$ мм; 2 – К-080, $h = 0,48$ мм; 3 – К-080, $h = 0,64$ мм; [4].

Интересно отметить, что напряженности появления интенсивных скользящих разрядов (критических ЧР) совпадают на переменном напряжении и импульсном. Эти напряженности являются предельными для работы изоляции конденсаторов в импульсном режиме. Для КОН-II $E_{кр} = 80$ кВ/мм для $N = 10000$ импульсов и $E_{кр} = 100$ кВ/мм для 1000 импульсов. Зависимость срока службы конденсаторов от напряженности E_{m-t} приведена на рисунке (1.16).

Условие (1.52) позволяет определить также предельное количество разрядов конденсатора за весь срок службы при заданной напряженности или допустимую напряженность при заданном сроке службы.

На интенсивность ЧР влияет не только E , но и декремент колебаний контура. При увеличении декремента происходит уменьшение числа ЧР за каждый импульс, например, при увеличении декремента колебаний с 1,25 до 3 газовыделение уменьшается в 5-6 раз и $E_{раб}$ тогда можно увеличить на 20 – 30 % [4].

Таким образом, при работе конденсаторов по возможности следует увеличить декремент колебаний Δ , применяя для этой цели нелинейные сопротивления или замыкатели, шунтирующие индуктивность нагрузки контура непосредственно после прохождения тока через максимум. Реализация этих мер позволяет существенно повысить рабочее напря-

жение конденсаторной батареи и увеличить амплитуду генерируемого разрядного тока.

Для большинства типов отечественных и зарубежных импульсных конденсаторов удельная энергия составляет 0,1 МДж/м³ при рабочей напряженности 70-100 кВ/мм.

Основной путь увеличения объемной энергии – это использование либо новых полимерных пленок, обладающих повышенной электрической прочностью и большой ϵ (например, полиэтилентерфталат), либо пленочно-бумажной изоляции с пропиткой касторовым маслом.

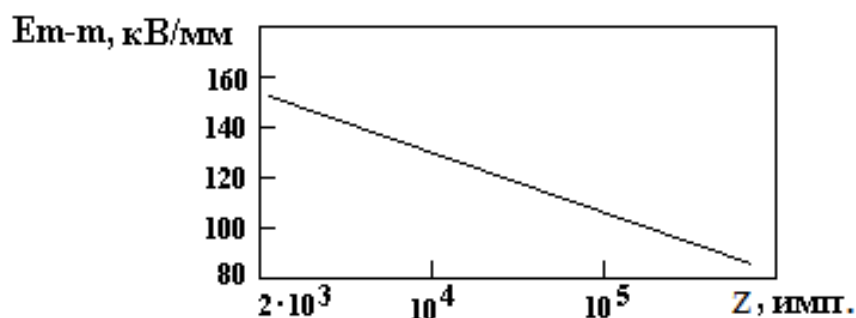


Рис. 1.16. Зависимость числа импульсов Z от E_{m-m} для конденсаторной бумаги, пропитанной трихлордифенилом [5]

$$E_{КОМ} = E_{\delta} [1 + \chi(\epsilon_{\delta}/\epsilon_{П} - 1)], \quad (1.55)$$

где E_{δ} – рабочая напряженность бумаги;
 $E_{КОМ}$ – рабочая напряженность комбинированного диэлектрика;
 ϵ_{δ} и $\epsilon_{П}$ – диэлектрические проницаемости бумаги и пленки соответственно;
 λ – относительное объемное содержание пленки в комбинированном диэлектрике.

$$\epsilon_{КОМ} = \epsilon_{\delta} [1 + \chi(\epsilon_{\delta}/\epsilon_{П} - 1)]. \quad (1.56)$$

Удельная энергия конденсатора с комбинированным диэлектриком в единице активного объема диэлектрика

$$W_{об.ком} = \epsilon_{КОМ} \cdot E_{КОМ}^2 / 2 = W_{об.б} [1 + \chi(\epsilon_{\delta}/\epsilon_{П} - 1)], \quad (1.57)$$

где $W_{об.б} = \epsilon_{\delta} \cdot E_{\delta}^2 / 2$ – объемная энергия конденсатора с бумажным диэлектриком.

Как следует из выражения (1.57), если $\varepsilon_6 > \varepsilon_{II}$, $E_{КОМ} > E_6$, $W_{ОБ.КОМ}$ увеличивается с ростом содержания пленки χ тем больше, чем больше $\varepsilon_6/\varepsilon_{II}$ [1].

Это справедливо, пока допустимая рабочая напряженность $E_{КОМ}$ не ограничивается кратковременной электрической прочностью пленки.

Так, для лавсана толщиной 10 мкм это ограничение наступает при $\chi = 0,5$, выше которого удельная энергия конденсатора начинает падать.

Применение бумажно-пленочной и пленочной изоляции позволяет создавать отдельные конденсаторы, работающие в аperiodическом разряде при пониженной надежности с запаасаемой объемной энергией до 0,5 МДж/м³.

Индуктивность импульсных конденсаторов. В ГИТ больших энергий индуктивность конденсаторов не играет большой роли, а в генераторах малых энергий – имеет определяющую роль. Индуктивность конденсатора L_c включает индуктивность пакета секции $L_{n.c}$, индуктивность соединительных шин L_{III} и индуктивность выводов $L_{в.к}$.

$$L_c = L_{n.c} + L_{III} + L_{в.к} \quad (1.58)$$

Индуктивность пакета секции $L_{II.C}$ зависит от индуктивности секции L'_c и схемы соединения секций. Если n_c – число последовательно соединенных секций, m_c – число параллельно соединенных секций в группе, то

$$L_{n.c} = \frac{L'_c \cdot n_c}{m_c} \quad (1.59)$$

Конденсаторные секции по способу выполнения обкладок можно разбить на 2 основные группы: рулонные и пластинчатые.

Для уменьшения индуктивности секции выводы секции должны быть расположены таким образом, чтобы обеспечить бифилярное протекание тока по выводам и по фольге секции.

Индуктивность фольги секции L_ϕ и выводов $L_{в.с}$ можно уменьшить, если увеличить количество пар выводов m_ϕ и обеспечить равномерное распределение тока между выводами (одинаковую индуктивность каждой пары выводов $L_{в.с}$). При этом

$$L'_c = L_\phi / m_\phi + L_{в.с} / m_\phi, \quad (1.60)$$

где L_ϕ - индуктивность фольги секции при одной паре выводов, расположенных посередине (по длине фольги).

Для уменьшения индуктивности соединительных шин и выводов конденсатора применяют конструкцию с бифилярным протеканием токов.

Особенности конденсаторов, работающих при большой частоте повторяемости импульсов. В этих конденсаторах E_p ограничена тепловым режимом. Энергия, выделяемая в конденсаторе $W_{\text{выд.с}}$ в разрядном режиме, зависит от параметров нагрузки. Если R_c – эквивалентное активное сопротивление конденсатора с энергией W_c , R_n – активное сопротивление нагрузки, $R_{\text{конт.}}$ – эквивалентное активное сопротивление разрядного контура (разрядников, соединительных элементов), то

$$W_{\text{выд.с}} = W_o \frac{R_c/N_c}{R_c/N_c + R_{\text{конт.}} + R_n}, \quad (1.61)$$

где $W_o = W_c \cdot N_c$ – энергия, запасенная в батарее конденсаторов накопителя; N_c – количество параллельно включенных конденсаторов в накопителе.

Таким образом, если R_n и $R_{\text{конт.}}$ достаточно малы, даже при малом R_c в конденсаторах будет выделяться значительная доля запасенной энергии.

Характеристики некоторых отечественных импульсных конденсаторов приведены в таблице 1.2 [1].

Таблица 1.2

Характеристики некоторых типов отечественных высоковольтных импульсных конденсаторов

Тип конденсатора	Напряжение, кВ	Емкость, мкФ	Энергия, кДж	Индуктивность, нГн	Ресурс шин	Надежность	$W_{\text{об.}}$ Дж/дм ³	Макс. ток, кА
ИК – 6 – 150	6	150	1,7	60	10^4	0,95	98,3	50
ИК-100-0,4	100	0,4	2,0	150	$2 \cdot 10^3$	0,9	90	50
КМ – 30 – 10	30	10	4,5	10	10^4	0,9	65	400
КМК – 100-0,5	100	0,5	2,5	20	10^3	0,9	110	150

Для уменьшения потерь в конденсаторе целесообразно использовать диэлектрик секций с малым $\text{tg } \delta$ при частоте колебаний разрядного контура. Таким диэлектриком является пленочный или бумажно-пленочный диэлектрик с применением неполярных полимерных пленок (полипропилена, полиэтилена и др.) и неполярных пропитывающих со-

ставов (конденсаторного масла и др.). При этом может быть обеспечена добротность 100 при частоте 0,5–1 МГц [1].

При использовании в качестве пропитывающего состава жидкого азота достигается охлаждение и уменьшение потерь в токоведущих частях и диэлектрике и добротность более 1000 при $f = 0,5 - 1$ МГц.

1.1.5 Изоляция ГИТ

В генераторах импульсных токов используется 2 типа соединительных элементов: плоские шины и кабели. Изоляция всех типов соединительных элементов выполняется так, чтобы обеспечить минимальное значение их индуктивности. Обычно она составляет 30÷40 % L_0 ГИТ в схеме короткого замыкания. Для того, чтобы уменьшить индуктивность, необходимо максимально сблизить токоведущие части со встречно направленными токами. При этом изоляцию рассчитывают на работу при E_{max} .

Опыт эксплуатации показывает, что наиболее опасны для перекрытия по поверхности колебательные импульсы, наименее опасно – постоянное напряжение. Для полиэтиленовой изоляции кабеля

$E_{раб.каб.} = 10 - 20$ кВ/мм, для изоляции шин, выполненной из пленочных диэлектриков (лавсана, фторопласта, полиэтилена в виде пленок толщиной 0,1 – 0,2 мм) $E_{раб.шин} = 20 - 30$ кВ/мм [1].

Дальнейшего повышения E_p можно добиться, используя комбинированные диэлектрики и помещая их в жидкий диэлектрик (трансформаторное или конденсаторное масло). Тогда $E_{раб.комб.} = 40 - 50$ кВ/мм.

Твердая изоляция соединительных элементов ГИТ работает при высоких рабочих напряжениях, близких к тем, когда начинается скользящий разряд в воздухе по поверхности. В ГИТ на напряжение

50 кВ с изоляцией не возникает проблем, в ГИТ на напряжение 300 кВ изоляция соединительных шин выполнена из 70 слоев майлара суммарной толщиной 12,5 мм. Края шин цилиндрической формы загнуты с радиусом 5 см и вместе с закраинами изоляции длиной 150 мм помещены в элегаз при давлении 20 атм [1].

Высоковольтные кабели значительно облегчают компоновку ЕНЭ, обеспечивая синхронную работу разрядников (рис. 1.17).

Важное качество кабелей – удобство концевых разделок. Обычно это твердая изоляция (полиэтилен) до 100 кВ. На более высокое напряжение используются кабели с бумажной изоляцией и вязкой масложированной пропиткой. Жилы кабеля выполнены в виде оплетки, наложенной на центральный полиэтиленовый стержень. Внешний токоведущий слой также сделан в виде оплетки или слоя лент. Диэлектрик по-

крывается полупроводящим покрытием с целью улучшения ионизационных характеристик. Конструкции коаксиальных кабелей приведены на рисунке 1.18.

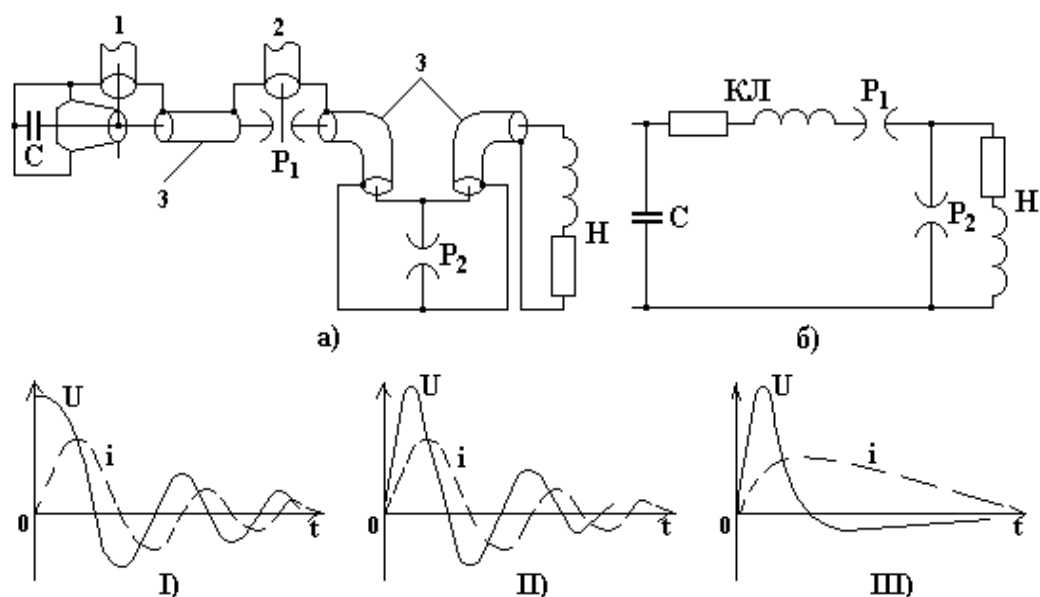


Рис. 1.17. Принципиальная а) и электрическая б) схемы ГИТ с соединительными элементами в виде кабелей:

I) –напряжение и ток на выходах конденсаторов; II) -напряжение и ток на нагрузке при разомкнутом разряднике P_2 ; III)- напряжение и ток на нагрузке при замкнутом в максимуме тока разряднике P_2 ; 1 и 2 – кабели для зарядки и поджига; 3 – соединительные кабели разрядного контура [4]

Для повышения ресурса изоляции необходимо подавлять процессы зарождения и развития дендритов. Наибольшее влияние на процессы зарождения дендритов оказывают микронеоднородности на поверхности жилы, наличие у жилы воздушных включений, а также инжектированный с поверхности жилы объемный заряд. Для того, чтобы задержать зарождение дендрита, применяют полупроводящий экран, исключая воздушные включения. Для увеличения времени развития дендритов наиболее эффективно применение короностойких барьеров в толще изоляции (полимерных пленок с промазкой жидким диэлектриком).

В зависимости от конструкции E у жилы кабеля находится в пределах 20 – 40 кВ/мм.

Требование минимальной индуктивности кабеля можно выполнить за счет уменьшения толщины изоляции и соответственно E_p . Индуктивность коаксиального кабеля [1]

$$L = 2 \cdot l \cdot \ln \frac{D}{d_{ж}} \cdot 10^{-7}, \text{Гн}, \quad (1.62)$$

где l – длина кабеля, м, $d_{ж}$ и D – диаметры жилы и изоляции кабеля, м.

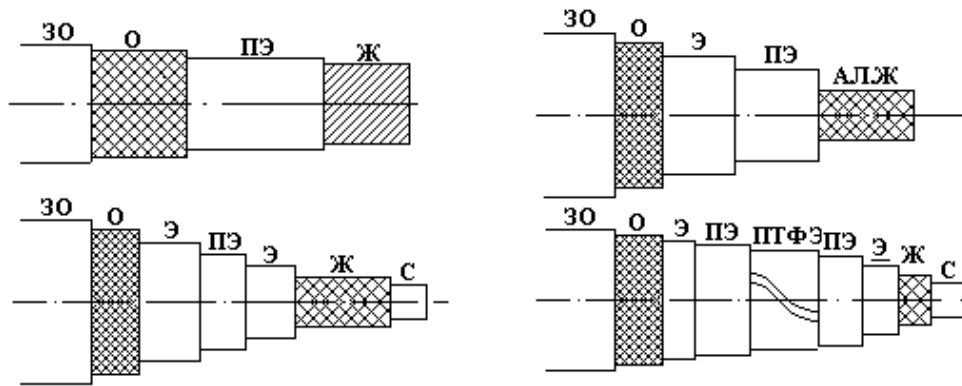


Рис. 1.18. Типы малоиндуктивных импульсных кабелей

С – сердечник; Ж – жила; АЛ. Ж. – алюминиевая жила; Э – полупроводящий экран; ПЭ – полиэтилен; ПТФЭ – ленты политетрафторэтилена; О – внешний проводник; ЗО – защитная оболочка [1]:

$$U_{раб} = \frac{E_{доп} \cdot d_{ж}}{2k_2} \ln \frac{D}{k_1 \cdot d_{ж}}, \text{кВ}, \quad (1.63)$$

где $E_{доп}$ – допустимая напряженность поля у жилы, кВ/мм; $d_{ж}$ – мм; k_1 и k_2 – коэффициенты, учитывающие отличие многопроволочной жилы от предельного цилиндра, $k_1 = 1 - 0,96$; $k_2 = 1,1 - 1,2$.

Для кабелей с диаметром жилы > 4 мм оптимальным соотношением диаметров внешнего и внутреннего проводов кабеля является

$$m_{opt} = \frac{D}{d_{ж}} = e = 2,7. \quad (1.64)$$

Оно выбирается из условия максимального $U_{РАБ}$ при заданном $E_{доп}$. Длина кабеля существенно влияет на выбор рабочего напряжения. Обычно $l = (2 - 20)$ м.

Электрическая прочность коротких кусков больше, чем электрическая прочность длинных кусков. Связь между ними устанавливается путем пересчета вероятности пробоя или непробоя при увеличении его длины (рис.1.19).

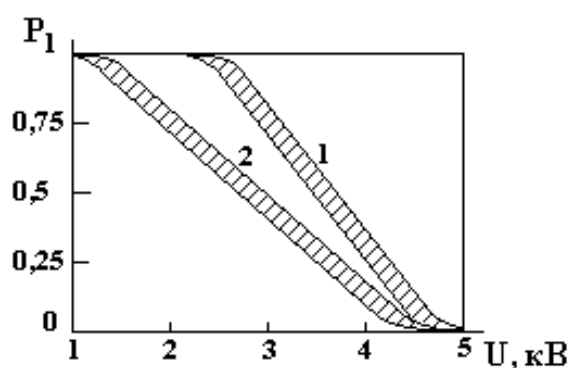


Рис. 1.19. Экспериментальная вероятность распределения непробоев кабеля с резиновой изоляцией при разных длинах: 1 - 1,2 м; 2 - 12 м [4]

В крупных ГИТ число отрезков кабелей равно $10^2 - 10^4$ штук, причем пробой одного из кабелей приводит к выходу из строя на некоторое время установки в целом. Поэтому окончательный вывод $U_{\text{раб}}$ кабеля может быть сделан на основании большего числа образцов (десятков – сотен). В таблице 1.3 приведены некоторые характеристики импульсных кабелей [1].

Таблица 1.3

Основные характеристики кабелей

Тип кабеля	Толщина изоляции d , мм	Диаметр жилы, мм	Наружный диаметр с защитной оболочкой, мм	Индуктивность на 1 м, нГн	Средняя рабочая напряженность $E_{CP} = U_P/d$, кВ/мм	Срок жизни при E_{CP}	Рабочее напряжение U_P , кВ
КВП 1/75	8,0	15,0	40,0	160	15	10^4	120
КВП 1/75	6,5	17,2	40,0	140	11,5	10^5	75
КВП 1/50	2,5	4,1	15,8	220	20	10^3	50
КВП 1/35	7,2	22,2	42,2	11	4,9	10^7	35

Надежность импульсных конденсаторов и кабелей. К определению надежности отдельных элементов возможны два подхода [1]:

Пробой одного из элементов накопителя приводит к автоматическому отключению части накопителя, и работа всей установки не прерывается. В этом случае задается предельное снижение запасаемой энергии накопителя за весь срок службы, при которой еще обеспечиваются необходимые параметры тока в нагрузке. Однако при этом выдвигаются очень жесткие требования к системе защиты, автоматическому отключению ячейки.

Каждый пробой любого из элементов накопителя приводит к отказу и прекращению работы всего накопителя. В этом случае к надежности

работы отдельных элементов накопителя предъявляются более жесткие требования.

Надежность отдельных элементов должна быть на уровне 0,99 и выше. Прогнозирование требуемой надежности вызывает значительные трудности, связанные с длительными испытаниями большого количества элементов на срок службы. Повысить надежность работы ГИТ возможно путем использования ряда мероприятий.

- Применяют более совершенные изоляционные материалы: в конденсаторах - бумажно-пленочную и пленочную изоляцию; в кабелях - комбинированную изоляцию из полиэтилена и политетрафторэтилена.

- Используют переход от колебательного разряда к апериодическому разряду, что увеличивает срок службы конденсаторов \sim в 100 раз.

- Проводят усовершенствованные приемо-сдаточные испытания. Для этого испытывают повышенным постоянным напряжением на уровне $1,5 U_{ном}$ в течение 3-5 минут и многократным (около 100) воздействием колебательных затухающих импульсов напряжения при амплитуде $(1,1 - 1,3) U_{ном}$.

- Ограничивают перенапряжения в элементах накопителя. В кабелях развиваются перенапряжения, вызванные распространением и отражением волн от ячеек и нагрузки. Они могут достигать значений, равных $(1,7 - 2,4) U_{ном}$. В секциях конденсаторов эти перенапряжения не возникают. Если несинхронно срабатывают разрядники, то кратность бывает 3,5 и выше. Основной мерой, уменьшающей эти перенапряжения, является подключение резисторов к разрядникам или к нагрузке. Их выбирают из условия согласованной нагрузки для волн, распространяющихся по кабелям. Кратность перенапряжений снижается до $(1,1-1,2) U_{ном}$.

- Снижают рабочую напряженность электрического поля в конденсаторах и кабелях, если вышеперечисленные меры не позволяют получить требуемую надежность. Недостаток этого способа заключается в том, что при этом уменьшается удельная энергоемкость накопителя, увеличиваются его размеры и собственная индуктивность.

Для конденсаторов и кабелей может быть принята степенная зависимость срока службы N от напряженности E

$$N = A \cdot E^{-n}, \quad (1.65)$$

где $n = 6$ для кабелей, $n = 10$ для конденсаторов. A – коэффициент, который зависит от типа конденсатора: $A = K \cdot \Delta^{n/2} \cdot f^{-1}$.

Необходимо также учитывать, что уменьшение гарантированного ресурса приводит к увеличению надежности. Например, для конденсатора ИК-50-3 снижение до 10^3 импульсов приводит к увеличению надежности с 0,9 до 0,99 [1].

1.1.6 Системы коммутации ГИТ

Система коммутации является одним из ответственных элементов ГИТ, от которой зависит надежная работа генератора и его основные характеристики. Известно, что в малоиндуктивных ГИТ большой энергии используется значительное число параллельно включенных коммутаторов.

В связи с высоким рабочим напряжением, большим током и малым временем срабатывания в ГИТ используются специально разработанные управляемые разрядники:

- разрядники газовые (атмосферного и повышенного давления);
- разрядники низкого давления или вакуумные;
- твердотельные разрядники;
- полупроводниковые коммутаторы (тиристоры).

Жидкие диэлектрики не нашли применения в управляемых разрядниках ГИТ из-за нестабильной и низкой электрической прочности при постоянном напряжении, хотя они широко используются для коммутации формирующих линий.

К управляемым разрядникам предъявляются следующие требования [1]:

1. Разрядники должны обладать электрической прочностью, т.е. статическое пробивное напряжение больше максимального рабочего напряжения. При этом вероятность ψ неуправляемого пробоя разрядника должна быть настолько мала, чтобы обеспечивалась малая вероятность срабатывания всего ГИТ, содержащего n разрядников.

$$\psi_c = 1 - (1 - \psi)^n \ll 1, \text{ обычно } \psi < 0,1 \div 0,01.$$

2. Время запаздывания срабатывания управляемого разрядника t_3 , а также разброс его должны быть достаточно малыми.
3. Разрядники должны иметь малую индуктивность с тем, чтобы индуктивность коммутирующего устройства была $< 0,2 L_0$;
4. Активное сопротивление разрядников R в процессе коммутации должно быть малым по сравнению полным сопротивлением разрядного контура ГИТ, чтобы не приводить к значительным потерям энергии и не оказывать заметного влияния на форму кривой тока. Проблема обеспечения малого R возникает в 2-х случаях: в

начальной стадии протекания тока ($t < 1$ мкс) и при использовании разрядников в режиме кроубара, когда сопротивление разрядника должно быть меньше активного сопротивления контура.

5. Разрядники должны многократно коммутировать большие импульсные токи. Эрозия электродов разрядника определяется протекающим при коммутации зарядом

$$Q = \int_0^{\infty} |i| dt. \quad (1.66)$$

Разрядники характеризуются многократно коммутируемым максимальным зарядом Q ;

6. Разрядники должны быть простыми по устройству, удобными и надежными в эксплуатации.

Нет универсального разрядника, который бы удовлетворял всему набору требований. Поэтому для каждой конкретной установки используют соответствующие типы разрядников, причем опыт разработчиков играет немаловажное значение.

Разрядники атмосферного и повышенного давления газа. Широкое распространение получили газовые разрядники, работающие в воздухе или под давлением газа. Наиболее известные способы управления приведены на рисунке 1.20.

Способ управления в тригатроне – усиление электрического поля у кончика управляющего электрода при подаче поджигающего напряжения U_n . Если полярность U_n противоположна полярности основного напряжения U_o , то электрическое поле становится резко неравномерным, и разряд развивается так же, как и при импульсном пробое стержень - плоскость. Наиболее благоприятна комбинация $U_o^{(-)}, U_n^{(+)}$, затем $U_o^{(+)}, U_n^{(-)}$; $U_o^{(-)}, U_n^{(-)}$. Наименее благоприятна комбинация $U_o^{(+)}, U_n^{(+)}$.

Влияние искажения электрического поля инициирующим разрядом осуществлено успешно в тригатронах с выступающей в зазор диэлектрической втулкой [6]. Такие тригатроны имеют значительно больший диапазон рабочего напряжения с малым t_3 . Однако прочность диэлектрической втулки сдерживает использование ее в ГИТ.

Для тригатронов без втулки оптимальные времена запаздывания t_3 бывают, когда осуществляется одновременный пробой основного и поджигающего промежутков. Для этого длина поджигающего промежутка должна быть соизмерима с основным зазором. Амплитуда поджигающего импульса U_n должна быть примерно равна рабочему напряжению U_p с фронтом $\tau_f \cong 0,01$ мкс, но в несколько раз должна превышать разрядное напряжение поджигающего промежутка. Для уменьше-

ния самопроизвольного срабатывания разрядники помещаются в чехлы (полиэтиленовую пленку толщиной 150 мкм) [4].

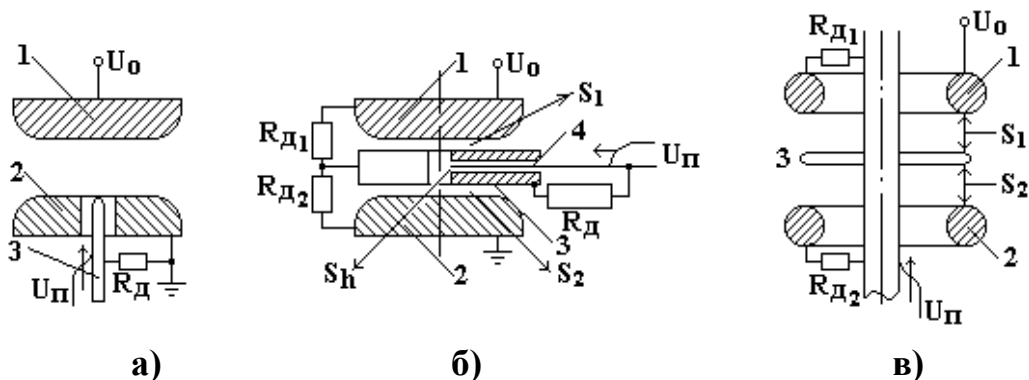


Рис. 1.20. Управляемые газовые разрядники:

а) – триггер; б) – каскадный разрядник с автоматическим управлением; в) – каскадный разрядник с искажением электрического поля; 1,2 – основные электроды; 3,4 – вспомогательные электроды; U_n – поджигающий импульс напряжения с τ_f и I_n ; $R_{д1}$, $R_{д2}$ – делитель напряжения; S_1 и S_2 – разрядные промежутки; S_n – подсвечивающий промежуток [1].

Каскадный разрядник имеет промежуточный электрод 3, на котором напряжение задается с помощью делителя $R_{д1} / R_{д2}$ так, чтобы напряженности электрического поля в промежутках S_1 и S_2 были одинаковы. При подаче U_n на электрод 3 возникает перенапряжение на S_1 и происходит его пробой, после чего U_o оказывается приложенным к промежутку S_2 , и он пробивается, если U_o больше его разрядного напряжения.

Для уменьшения статистического разброса срабатывания разрядника используют автоматическую подсветку, которая осуществляется при пробое подсвечивающего промежутка S_n между электродами 3 и 4. Для расширения диапазона рабочего напряжения изменяется давление газа в разряднике.

У разрядников с искажением поля управляющий электрод выполнен в виде пластины с острой кромкой, совмещенной с эквипотенциальной поверхностью электрического поля, образованного основными электродами. U_n вызывает искажение электрического поля и приводит к последовательному во времени пробоем S_1 и S_2 . Высокая напряженность электрического поля у острой кромки управляющего электрода обеспечивает возбуждение ионизационных процессов без t_{cm} , поэтому t_3 и σ очень малы. Некоторые характеристики искровых разрядников приведены в таблице 1.4[1].

Таблица 1.4

Характеристики искровых разрядников

Тип разрядника	$U_{O \max} - U_{O \min}$, кВ	I_{\max} , кА	Q, Кл/им	Ресурс N	t_3 , нс	L_P , нГн	σ , нс
Тригатрон (воздух)	150 - 140	200	5	10^4	200	20	100
Разрядник каскадный с автоматической подсветкой	60 - 40	30	7	-	50	5	40
Разрядник каскадный (воздух)	50 - 20	100	10	-	50	10 - 50	30
Разрядник каскадный с искажением поля	100 - 70	75	5	10^3	50	5	35 - 50

Разрядники, основанные на скользящем разряде по поверхности диэлектрика, разработаны в СПбГТУ (рис. 1.21). Формирующийся многоканальный скользящий разряд обеспечивает малую индуктивность разрядника (нГн) и коммутируемый ток до 2 МА. Время запаздывания срабатывания разрядника $t_3 \cong 100$ нс, σ - мало в широком диапазоне напряжений. Такие разрядники используются в системе кроубар.

Кроме того, использовались иные способы управления – лазерный поджиг, прямое перенапряжение и др. Они не нашли широкого применение в технике коммутации больших импульсных токов, т.к. сложны в управлении, а преимуществ по индуктивности и току нет.

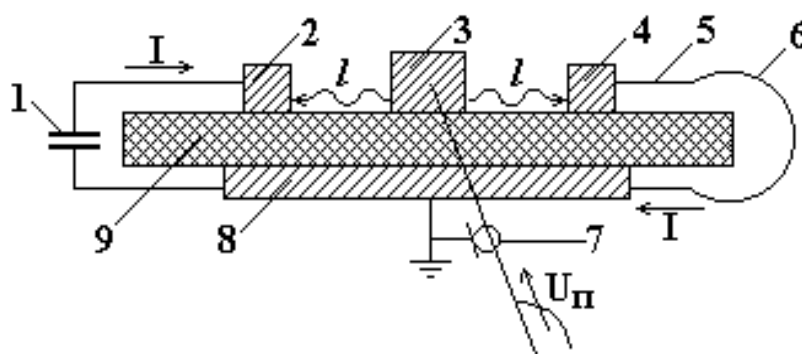


Рис. 1.21. ГИТ с разрядником на скользящем разряде:

1 – конденсаторная батарея; 2,4 – основные электроды (0,2 – 1 м); 3 – управляющий электрод; 5 – широкие плоские шины (кабели); 6 – индуктивная нагрузка; 7 – кабель поджига, $\tau_{ФП} \leq 10^{-7}$ с; 8 – обратный токопровод; 9 – тонкослойный диэлектрик (4 мм на $U_P = 50$ кВ) [1]

Разрядники с твердым диэлектриком. Такие разрядники используются для получения в нагрузке токов с амплитудой ~ 1 МА и начальной скоростью нарастания $> 10^{12}$ А/с. Конструкции твердотельного разрядника показаны на рисунках 1.22 [4] и 1.23 [1].

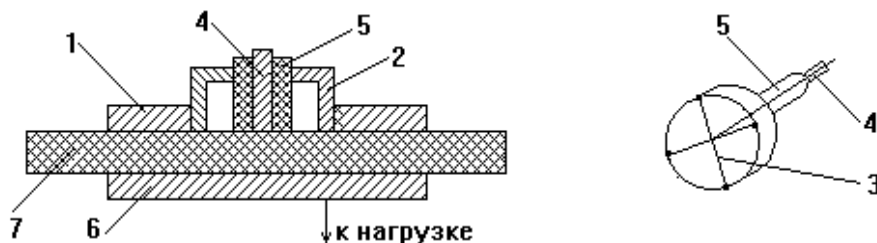


Рис. 1.22. Разрядник с твердым диэлектриком:
 1 - высоковольтная шина; 2 - металлическая обойма для вставки капсуля-детонатора (КД); 3 - перекрестие из проволочек; 4 - электрод поджига; 5 - изолирующая втулка; 6 - шина к нагрузке; 7 - диэлектрик

Толщина изоляции $h = 1 - 3$ мм, $U_p = 100$ кВ и выше. В металлическую обойму 2 вставлен либо КД, либо перекрестие из проволочек 3. На проволочки разряжается конденсаторная батарея $W = 20$ кДж, и они взрываются, разрушая диэлектрик, затем развивается пробой по трещинам.

Для уменьшения индуктивности используется несколько детонаторов, чтобы зажечь несколько параллельных искр. Недостатком является требование по технике безопасности из-за использования КД.

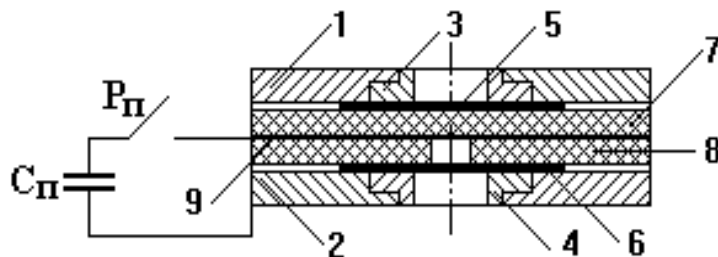


Рис. 1.23. Сечение твердотельного разрядника:
 1, 2 - плиты разрядника; 3, 4 - съемные фланцы; 5, 6 - защитные алюминиевые фольги; 7 - основная сменная изоляция; 8 - сменная изоляция поджигающего промежутка; 9 - сменный фольговый электрод; C_n и P_n - цепь поджига

Разряд, возникающий в отверстии пленки 8 (рис. 1.23), при подключении заряженного конденсатора с помощью управляющего разрядника P_n вызывает испарение участка фольги и прорыв основной изоляции 7. Для уменьшения эрозии электроды снабжаются съемными фланцами с отверстиями для выброса газов 3, 4, а поверхности фланцев

после серии разрядов зачищают. Чтобы исключить самопроизвольный пробой основной изоляции в результате появления неровностей на поверхности фланцев, на последние перед каждым разрядом накладываются защитные алюминиевые фольги $h = 20$ мкм (5,6 на рис. 1.23).

Для получения расчетных характеристик твердотельного разрядника развита электродинамическая модель, согласно которой магнитное поле разрядного тока, воздействуя на электроразрядную плазму, заставляет расширяться ее в сторону основной изоляции и ускорять полиэтиленовый столбик диаметром, равным диаметру отверстия в пленке d , и высотой, соответствующей толщине основной изоляции h [1]

$$\left[2(\omega_{II} \cdot t_3)^2 + \text{Cos}(2\omega_{II}t_3) - 1\right]^{1/2} = 3 \cdot 10^{12} \cdot \omega_{II} \cdot d \cdot h^{1,75} / (I_{II} \cdot U_O). \quad (1.67)$$

Это выражение описывает зависимость времени запаздывания срабатывания t_3 от параметров пробоя с погрешностью порядка погрешности измерения в диапазоне 10–100 кВ. Расчетные и экспериментальные значения t_3 для разрядника с твердой изоляцией приведены в таблице 1.5.

Вакуумные разрядники. Простейший вакуумный разрядник – это цилиндрическая камера из изолирующего материала, закрытая с торцов металлическими дисковыми электродами. Откачка разрядника осуществляется через отверстие в одном из цилиндров. Различают секционированные и несекционированные разрядники. Секционированный разрядный промежуток разделен металлическими перегородками на несколько небольших последовательно включенных промежутков. Давление в разряднике порядка (0,1–1)Па. Материал изоляционного корпуса – оргстекло, так как оно способно самоочищаться. Поэтому разрядник сохраняет высокое значение статического разрядного напряжения.

Таблица 1.5

Расчетные и экспериментальные значения t_3 для разрядника с твердой изоляцией

U_O , кВ	h , мм	I_{II} , кА	i_{II} , МА/мкс	t_3 , мкс	
				Расчет	Эксперимент
20	0,4	110	0,1	1,6	1,5
40	0,9	260	0,46	1,0	0,8
80	1,5	520	0,9	0,8	0,6

В СПбГТУ разработано несколько разрядников, у которых разрядные промежутки несекционированные, корпус выполнен из оргстекла, разряд инициируется в нескольких местах на поверхности изоляционного корпуса. Это способствует быстрому развитию разряда вдоль поверхности корпуса и обеспечивает малое t_3 и равномерное формирование разряда вдоль корпуса разрядника.

Вакуумные разрядники имеют:

- широкий диапазон работы по напряжению ($U_{O\ min} \approx 1$ кВ) при относительно малых t_3 и σ . Поэтому их можно использовать при параллельном включении в основном режиме и режиме кроубар;
- малую индуктивность из-за объемного характера разряда в процессе коммутации;
- возможность многократной коммутации больших разрядных токов (около 1 МА), так как при имеющей место плотности тока на электродах их эрозия невелика.

В таблице 1.6 приведены характеристики некоторых вакуумных разрядников [1].

Игнитронные разрядники. Коммутация тока в ГИТ миллисекундного диапазона низкого давления и среднего уровня напряжения может осуществляться игнитронными разрядниками, которые серийно выпускаются промышленностью. Игнитронные разрядники допускают колебательный разряд.

Таблица 1.6

Характеристики вакуумных разрядников

Тип разрядника	$U_{O\ max} - U_{O\ min}$, кВ	I_{max} , кА	Q , Кл/им	Ресурс N	t_3 , нс	L_p , нГн
Секционированный	30 - 1	2000	20	10^3	200	5
Несекционированный	30 - 1	2000	4	10^3	200	5
С секционированным корпусом	100 - 1	1500	700	10^4	2000	10

Катодом в них служит ртуть на дне колбы прибора и разряд происходит в парах ртути ($p \approx 0,1$ Па). Для управления на поджигающий электрод подается высоковольтный импульс напряжения 2–3 кВ, при токе 200–300 А, который вызывает начальную эмиссию электронов с катода и обеспечивает формирование дугового разряда в парах ртути. Падение напряжения на нем ~ 100 В.

Игнитронные разрядники имеют следующие достоинства:

- Коммутируемые импульсные токи – 100÷300 кА; диапазон рабочих напряжений от 100 В до (10–50) кВ; имеют большую пропускную способность по заряду ($Q = 100$ Кл);
- большой срок службы; частотный режим; герметичность, бесшумность, малую стоимость.

В установках Шива-Лазер использовано 60 таких разрядников для коммутации батареи 10 кВ с запасом энергии 20 МДж [1]. Однако у них есть и некоторые недостатки: небольшая скорость нарастания тока $2 \cdot 10^{10}$ А/с; при протекании тока и большого заряда из-за понижения электрической прочности увеличивается разброс в срабатывании.

Таблица 1.7

Основные характеристики игнитронных разрядников

Наименование	$U_{O \max} - U_{O \min}$, кВ	I_{\max} , кА	L_P , нГн	Ресурс N	ν , имп/мин
ИРТ - 1	0,1 - 10	100	40	10^4	5
ИРТ - 6	0,1 - 25	100	40	$5 \cdot 10^4$	10

Полупроводниковые коммутаторы (тиристоры) пока используют лишь для коммутации низковольтных ГИТ миллисекундного диапазона, работающих при небольшом токе. Однако перспективы использования полупроводниковых приборов по мере роста их параметров трудно переоценить.

Псевдоискровые разрядники. Псевдоискровые разрядники разработаны в Институте сильноточной электроники СО РАН совместно с научно-производственным предприятием "Импульсные технологии" (г. Рязань) на основе фундаментальных исследований в области физики газового разряда.

Приборы предназначены для коммутации сильноточных высоковольтных импульсов в нано- и микросекундном диапазоне времен и могут использоваться в качестве ключевых элементов в источниках питания лазеров, установках для получения плазменного фокуса, установках по очистке воды и газов, медицинской аппаратуре, геологии, нефтедобыче и т.д.

Приборы изготавливаются в отпаянном виде и имеют керамический корпус, что обуславливает их высокую механическую прочность. Рабочее давление газа в коммутаторе обеспечивается встроенным генератором водорода. Принцип действия приборов основан на разряде низкого давления, возбуждаемом в системе с полыми электродами.



Рис. 1.24 Семейство псевдоискровых разрядников

Использование данной формы разряда наряду с оригинальными конструкциями электродов и узлов поджига позволило получить следующие уникальные характеристики приборов:

- крутизна нарастания коммутируемого тока до 1012 А/с
- стабильность срабатывания ~ 1 нс
- полный заряд до 106 Кл

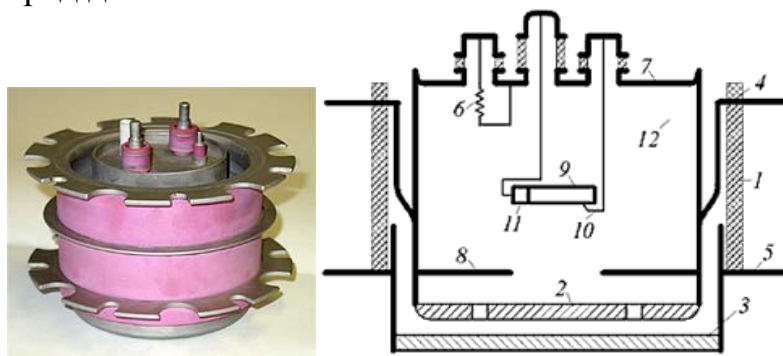


Рис.1.25 Схема псевдоискрового разрядника ТДИ1-150к/25.

1 - керамический корпус, 2 - катод, 3 - анод, 4 - катодный фланец, 5 - анодный фланец, 6 - генератор водорода, 7 - верхний фланец, 8 - экран, 9-11 - узел поджига, 12 - катодная полость.

В настоящее время выпускается около 10 типов псевдоискровых разрядников, позволяющих коммутировать токи от 100 А до 150 кА. при напряжении до 100 кВ.

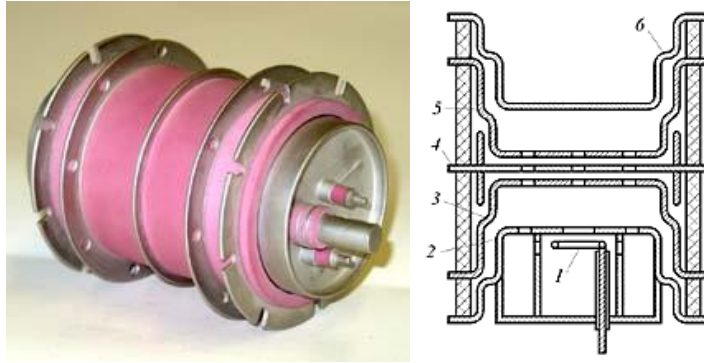


Рис.1.26 Схема псевдоискрового разрядника ТПИ1-10к/50.

1 - анод вспомогательного тлеющего разряда, 2 - полый катод вспомогательного тлеющего разряда, 3 - основной катод, 4 - промежуточный (заземленный) электрод, 5 - основной анод, 6 - потенциальный анод

Основные преимущества псевдоискровых разрядников:

- В отличие от искровых и вакуумных коммутаторов, а также мощных водородных тиратронов псевдоискровые разрядники обладают следующей совокупностью свойств:
- возможность коммутировать импульсы тока положительной и отрицательной полярности
- возможность работы как при положительном, так и при отрицательном напряжении, подаваемом на анод
- высокая стабильность срабатывания
- продолжительный срок службы
- относительно невысокая цена
- простота конструкции

По своим параметрам наиболее близко к псевдоискровым разрядникам расположены мощные водородные тиратроны и тиратроны с заземленной сеткой, выпускаемые фирмами EEV (Великобритания) и EG&G (США). Однако, данные приборы обладают существенно более высокой ценой.

Параллельная работа разрядников. Коммутация токов $10^7 - 10^8$ А осуществляется несколькими параллельно работающими разрядниками. Синхронность работы важна как для эффективного использования энергии, так и безаварийной работы ГИТ. Надежная параллельная работа разрядников обеспечивается в ГИТ их развязкой во времени с помощью кабелей. Параллельная работа может быть обеспечена при условии $2l/v > 2t_\alpha\sigma$, где

l – длина кабеля задержки;

v - скорость распространения электромагнитной волны в кабеле;

$2t_\alpha$ - двухсторонний доверительный интервал нормального распре-

деления, соответствующий надежности срабатывания разрядника α в интервале задержки $2l/v$.

Значение α определяется из соображений о допустимой вероятности несрабатывания какого-либо из разрядников ГИТ. $P = 1 - \alpha^n$, где n – число параллельно включенных разрядников.

Таким образом, необходимая развязка во времени определяется статической характеристикой разрядников σ , их числом и требуемой надежностью их параллельной работы.

Как показывают оценки, для обеспечения параллельной работы 100 разрядников с $\sigma = 20$ нс требуется задержка около 150 нс (15 м кабеля) при допустимой вероятности несрабатывания разрядников 0,05[1].

В случае, если t_3 и σ примерно постоянны в некотором интервале напряжений от $U_{O \max}$ до $U_{O \min}$, то необходимо учесть допустимость снижения U на несработавшем разряднике до $U_{O \min}$ за счет изменения напряжения по мере срабатывания остальных разрядников. Тогда надо использовать меньшую длину кабеля.

Для разрядников со слабой зависимостью σ от U вплоть до 1 кВ, как у вакуумных разрядников, соображения о выборе длины кабеля весьма грубые.

В ГИТ предельно малой, небольшой и средней энергии возникает проблема уменьшения индуктивности всех элементов, в том числе и разрядников. Удобно в качестве соединительных элементов использовать широкие шины с малоиндуктивными твердотельными или многоканальными разрядниками. Твердотельные разовые разрядники используются в ГИТ небольших энергий. Значительно удобнее эксплуатировать многоканальные разрядники.

Физически образование и развитие параллельных каналов возможно из-за конечной скорости роста проводимости каналов и, следовательно, конечного времени (~ 10 нс) уменьшения на них напряжения. Если разброс во времени формирования каналов много меньше этого времени (~ 1 нс), то все каналы могут развиваться. Однако из-за трудности обеспечения таких малых разбросов важное значение приобретает дополнительная небольшая (\sim несколько нс) задержка изменения напряжения. Это можно сделать с помощью небольшого конденсатора, включая его параллельно нагрузке. Роль конденсатора может выполнить емкость сборных шин ГИТ или емкость плоских соединительных шин. Аналогичный эффект дает шунтирование разрядников малоиндуктивными конденсаторами малой емкости.

Для многоканальной коммутации чаще всего используют каскадные разрядники с искажением поля. Каскадный разрядник рельсового

типа показан на рисунке (1.27). Электроды цилиндрического или полукруглого вида имеют длину 1 – 2 м.

Для обеспечения малых σ необходимо использовать амплитуду поджигающих импульсов в 2 – 3 раза больше U_0 при возможно большей скорости нарастания напряжения ($> 10^{13}$ В/с). Для этого используется разрядник – обостритель 5 (рис.1.24).

Разрядники различных типов позволяют создавать системы коммутации ГИТ предельно малой индуктивности. Основными проблемами остаются следующие: обеспечение надежной работы большого числа включенных разрядников; увеличение срока службы разрядников; обеспечение многоканальной коммутации в газовых управляемых разрядниках [1].

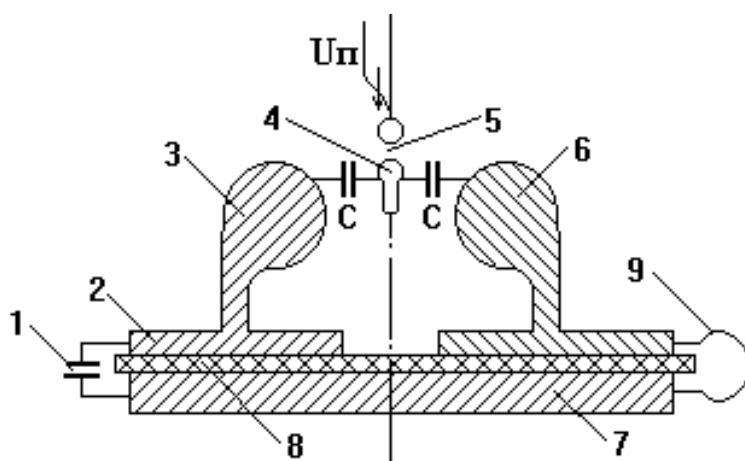


Рис. 1.27 Многоканальный разрядник рельсового типа:
 1 – конденсаторная батарея; 2,7 – плоские шины; 3,6 – основные электроды;
 4 – управляющий электрод; 5 – обостряющий разрядник; 8 – изоляция шин;
 9 – нагрузка; С – дополнительная шунтирующая емкость (25 пФ) для
 подпитки начальных каналов [1]

Выводы.

ГИТ позволяют запастись энергией до 10^8 Дж при совместной работе модулей и до 10^7 Дж при совместной работе на общую нагрузку. В последнем случае время нарастания тока достигает 10^{-6} с.

Основной проблемой, возникающей при создании ГИТ большой энергии, является обеспечение надежности всех его элементов и генератора в целом.

Задачу создания ГИТ с предельно малой индуктивностью следует решать комплексно путем снижения индуктивности всех элементов с учетом их взаимного влияния.

Среди достижений последних лет в области создания малоиндуктивных ГИТ среднего уровня напряжения следует отметить создание бумажно-пленочной и пленочной изоляции, применение многоканальных коммутаторов и объемных шин.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные характеристики генераторов импульсных токов на основе емкостных накопителей энергии.
2. Какие требования предъявляются к генераторам импульсных токов, питающим индуктивную нагрузку?
3. Какой способ зарядки является более эффективным для максимального КПД?
4. Назовите условия получения на нагрузке импульса тока колебательной и апериодической формы?
5. Какие типы соединительных элементов используются в ГИТ?
6. Какие меры применяются для увеличения ресурса изоляции ГИТ?
7. Как можно повысить надежность работы ГИТ?
8. Какие типы разрядников используются в системе коммутации ГИТ?
9. Какие требования предъявляются к управляемым разрядникам, которые используются в ГИТ?
10. Какой принцип управления используется в разрядниках тригatronного типа?
11. Как повысить стабильность разрядника каскадного типа?
12. Какие разрядники могут работать в режиме с шунтированием на грузки и почему?
13. Какие разрядники используются для многоканальной коммутации?
14. Какие предельные параметры ГИТ по запасаемой энергии, времени нарастания тока в нагрузке?

1.2 Генераторы импульсных токов на основе индуктивных накопителей энергии

1.2.1 Общие сведения

Генераторы импульсных токов на основе индуктивных накопителей представляют собой индуктивные накопители энергии с размыкателями тока. Накопление энергии происходит при зарядке катушки индуктивности от источника постоянного тока. Схема простейшего индуктивного накопителя энергии и изменение тока и абсолютного значения напряжения на индуктивности во времени показаны на рисунке (1.28) [5]. При зарядке до момента t_1 коммутатор K_1 замкнут, от источника питания ИП течет нарастающий ток. Напряжение на индуктивности не превышает напряжения источника питания. При достижении

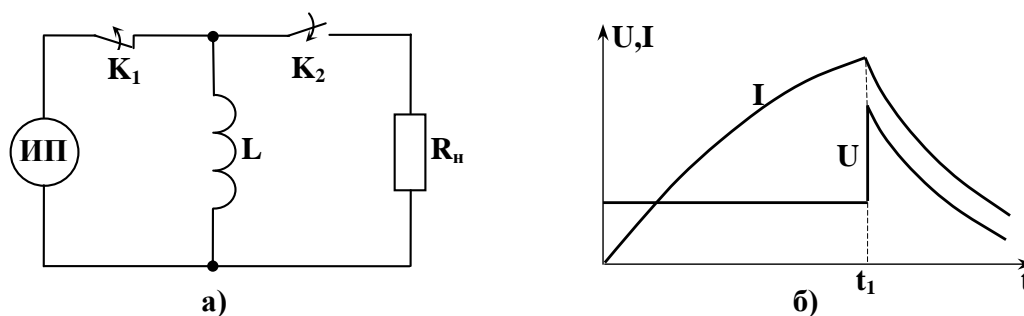


Рис. 1.28. Схема индуктивного накопителя (а) и изменение тока и напряжения на его индуктивности во времени (б) [5]

необходимого тока (накопления энергии) зарядная цепь размыкается коммутатором K_1 , а коммутатором K_2 подсоединяется нагрузка. Накопитель разряжается на нагрузку. При активной постоянной нагрузке ток в ней падает по экспоненте с постоянной времени, определяемой значениями L и R_n . Напряжение на нагрузке, равное напряжению на индуктивности L , в момент коммутации скачком возрастает. При этом мощность, развиваемая в нагрузке, увеличивается по сравнению с мощностью источника питания. Плотность энергии магнитного поля, запасаемой в индуктивных накопителях, на 2 порядка выше, чем плотность энергии электрического поля, запасаемая в конденсаторах или длинных линиях [7]. Это обстоятельство является решающим при создании накопителей с большими энергиями. При энергиях выше 10^6 Дж индуктивные накопители становятся экономически более выгодными, чем емкостные (например, для термоядерных установок). Разработанные в настоящее время индуктивные накопители с обычными катушками имеют

энергию порядка 10^7 Дж и используются в качестве источников импульсных токов для питания мощных ускорителей, импульсной зарядке конденсаторов и формирующих линий. В отличие от емкостного накопителя, индуктивный в заряженном состоянии потребляет от источника энергию, компенсирующую потери на активном сопротивлении катушки при протекании тока. Поэтому накопители с предельными энергиями могут быть реализованы только со сверхпроводящей катушкой.

Создание катушки обычного накопителя, источника питания и коммутатора K_2 не представляет технических трудностей. Однако создание коммутатора K_1 , отключающего зарядный ток, является сложной задачей.

1.2.2 Коммутирующие устройства

Развитие исследований в области управляемого термоядерного синтеза привело к значительному росту масштабов установок и увеличению запасаемой энергии и мощности их систем питания. Необходимость в импульсных источниках, способных генерировать импульсы с энергозапасами $10^7 - 10^9$ Дж при мощности $10^{10} - 10^{12}$ Вт потребовала развития мощной импульсной энергетики, в частности, импульсных источников с индуктивными накопителями энергии. Время накопления энергии $1 - 10$ с, поэтому для коммутируемых токов в десятки и сотни кА требуется высокая термическая устойчивость контактных элементов, а следовательно, их больших масс и сечений. Время коммутации при этом должно быть $10^{-5} - 10^{-3}$ с, что может быть достигнуто только при минимизации масс контактных элементов коммутатора. Таким образом, требования к высокой термической устойчивости аппарата в процессе накопления энергии и высокому быстродействию при ее выводе противоречат друг другу, и практически их реализация в одном аппарате в большинстве случаев является исключительно сложной инженерной задачей. Поэтому широко используются двух- и многоступенчатые системы коммутации, в которых функции термостойкости и быстродействия выполняют отдельные ступени коммутаторов [8]. Графики токов и напряжений, иллюстрирующих работу двухступенчатого размыкателя при чисто активной нагрузке, приведены на рисунке (1.29): $I_{K_1}, I_{K_2}, U_{K_1}, U_{K_2}$ - токи и напряжения первой и второй ступени соответственно; t_1 - время накопления; $t_2 - t_1$ - время коммутации первой ступени; $t_3 - t_2$ - время восстановления электрической прочности первой ступени; $t_4 - t_3$ - время коммутации второй ступени.

Разнообразие требований, предъявляемых к коммутационной аппаратуре в зависимости от параметров, режима работы, назначения

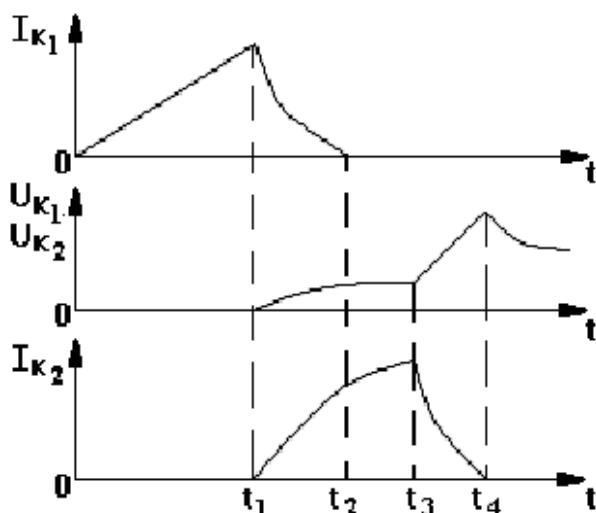


Рис. 1.29. Графики токов и напряжений при двухступенчатой коммутации на активную нагрузку [8]

импульсного источника энергии, определяет необходимость исследования и применения различных методов коммутации и принципов построения коммутирующих устройств. Все методы коммутации можно условно разделить на 2 основных направления: дуговая коммутация, сопровождающаяся возникновением дуги в контактной промежуток с последующим ее гашением, и бездуговая коммутация, когда в процессе коммутации созданы

условия, исключающие возможность возникновения дугового разряда.

Коммутирующие устройства с бездуговой коммутацией.

На рисунке (1.30) приведена схема размыкателя с бездуговой коммутацией [8]. Индуктивный накопитель $L_{ин}$ заряжается через дроссель D_p – размыкатель P , при этом дроссель насыщен, и индуктивность его мала. При замыкании K предварительно заряженная емкость C создает в цепи размыкателя ток, противоположно направленный току накопителя. При достижении разности

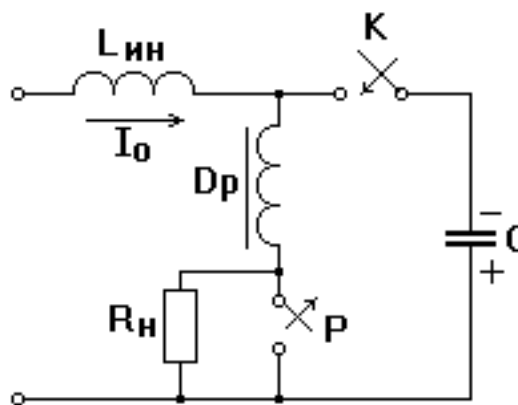


Рис. 1.30. Схема размыкателя, синхронизированного с паузой тока [8]

значением, соответствующего излому кривой намагничивания, дроссель переходит в ненасыщенное состояние, и его L возрастает. В цепи дроссель – размыкатель создается интервал «нулевого» тока, во время которого происходит размыкание цепи и восстановление электрической прочности контактной промежуток. Ток в цепи размыкателя уменьшается в 1000 раз, осуществляется бездуговая коммутация, и нет

потерь на контактах размыкателя. Дополнительную емкость можно выбрать из условия

$$C \geq \frac{I_0 \cdot t_n}{2U_{c_0}}, \quad (1.68)$$

где $U_{c_0} = I_0 \cdot R_n$ - напряжение заряда батареи; I_0 - коммутируемый ток. Запас энергии батареи, необходимый для формирования паузы тока t_n , в этом случае равен $W_c = 1/4 \cdot P_P \cdot t_n$, где P_P - разрывная мощность размыкателя.

Для увеличения быстродействия размыкателя, а следовательно, и сокращения паузы тока, необходимо повышение скорости образования межконтактного промежутка и применение сред с высокой электрической прочностью. Средняя скорость образования межконтактного промежутка в атмосфере азота под давлением 1,5 – 2,0 МПа для восстановления электрической прочности 20 кВ за $\sim 10^{-4}$ с должна быть

50 – 60 м/с. Получение таких скоростей требует применения очень быстродействующих систем привода и, учитывая большие массы контактных элементов, сложных устройств для гашения скорости.

Метод реостатной коммутации основан на перетекании тока из одной параллельной ветви в другую при изменении сопротивления одной из ветвей. Наиболее известные устройства, реализующие реостатную коммутацию, это взрывающиеся проводники и фольги. В этом случае изменение сопротивления происходит с разрушением проводников и возникновением дугового разряда.

Бездуговая реостатная коммутация может быть осуществлена при применении неразрушаемых термических нелинейных резисторов, изготавливаемых из стальной ленты. Кратность сопротивления достигает 70 при изменении сопротивления от температуры жидкого азота до 700° С. Удельная энергоемкость ~ 400 кДж/кг. При накоплении энергии $R_{ок} \ll R_n$, а при выводе $R_{кк} \gg R_n$ [8].

Коммутирующие устройства с дуговой коммутацией.

Известные способы гашения разряда делятся на два основных направления:

- гашение разряда противотоком;
- создание условий неустойчивости дугового разряда, шунтируемого сопротивлением.

В аппаратах при гашении разряда противотоком при размыкании полного тока образуется дуга, длительность горения которой определяется интервалом времени, необходимым для образования межконтакт-

ного промежутка, обеспечивающего необходимую электрическую прочность в условиях отсутствия дуги (рис. 1.31). После этого с помощью внешнего импульсного источника в коммутируемой цепи создается противоток, который и гасит дугу.

Во время (t_1-0) ток через размыкатель P_0 равен I_0 , ключи K_1 и K_2 разомкнуты. В момент времени t_1 ключ K_1 замыкается, емкость C_1 раз-

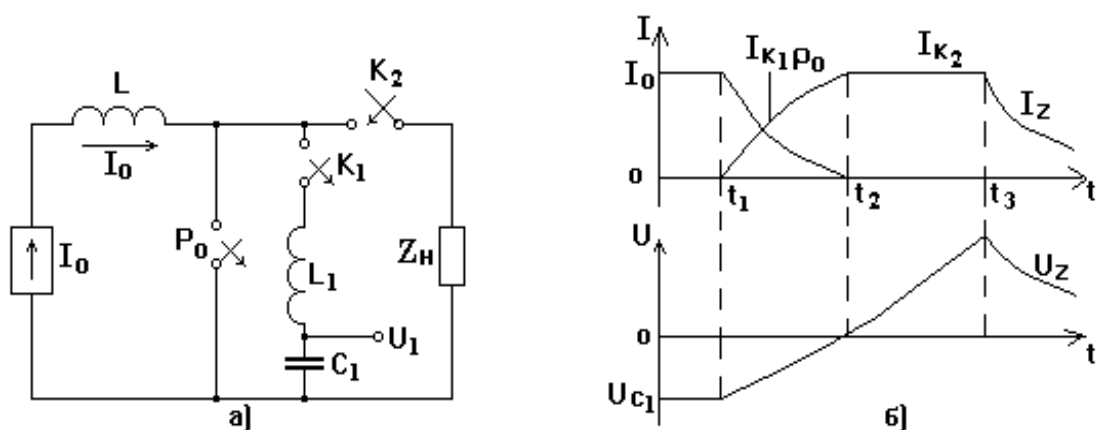


Рис. 1.31. Схема гашения разряда противотоком (а), стилизованная картина тока и напряжения (б) [9]

ряжается в контуре через P_0 и K_1 , формируя ток I_{K_1} . Скорость нарастания подавляющего тока I_{K_1} определяют параметры контура L_1 , C_1 . В момент времени t_2 ток через размыкатель $I_{P_0} = 0$; ток через коммутатор $I_{K_1} = I_0$. В это время контакты P_0 разомкнуты и C_1 заряжается но уже напряжением обратной полярности. При замыкании ключа K_2 в момент времени t_3 ток протекает через нагрузку.

В системе гашения противотоком может быть использовано любое выключающее устройство, однако наибольший интерес представляют вакуумные выключатели и выключатели, работающие в атмосфере элегаза (SF_6). Схематическое изображение вакуумного выключателя приведено на рисунке (1.32). Сопротивление контактов равно 10–35 Ом, время коммутации $t_{ком.} - 3-15$ мкс, время деионизации плазмы $t_{разм} - 1000$ мкс.

При втором способе гашения дуги размыкатели, как и большинство размыкателей с дуговой коммутацией, имеют механические контакты, обеспечивающие минимальные потери в процессе накопления. Для перевода тока в нагрузку или шунтирующий элемент контакты разводятся или разрушаются (для взрывных размыкателей), в образовавшемся межконтактном промежутке возникает дуга, которая гасится за счет

создания условий неустойчивости горения дуги, шунтированной сопротивлением.

Необходимым условием коммутации является превышение напряжения на дуговом разряде над падением напряжения на нагрузке, что возможно из-за удлинения ее или охлаждения (или то и другое). Такое изменение в области дуги приводит к ее неустойчивости и в результате к переключению тока в нагрузку. На практике для токов $I \approx 100$ кА и напряжений $U = 50$ кВ требуется удлинение дуги $l \approx 3 \div 5$ м, что невозможно осуществить реально [8]. При использовании взрывных размыкателей, где дугогашение осуществляется диэлектрической средой (парафином, маслом), коммутируемые токи равны 10^5 А при напряжении несколько

кВ. В этом случае необходимы только многозазорные взрывные размыкатели с интенсивным гашением дуги промежуточной диэлектрической средой. Тогда напряжение можно поднять до 50 кВ при токе $I = 10^5$ А. Условия гашения дуги значительно улучшаются при двухступенчатой коммутации (рис 1.32). Например: на I ступени – механический контактный выключатель с дуговой коммутацией. Весь ток на стадии накопления протекает через него. После разрыва контактов возникает дуга. Одновременно приводится в движение диэлектрическая среда (газ, жидкость) с высокой дугогасящей способностью. Дуга удлиняется и охлаждается, это приводит к росту напряжения на дуге и непрерывному перетеканию тока в параллельную цепь, начальное сопротивление которой $R_{20} \ll R_n$, но $R_{20} \ll R_{\text{конт.0}}$. Именно это обстоятельство позволяет переключать ток их I ступени во II при малом падении напряжения. Далее полный рабочий ток протекает некоторое время по цепи размыкателя II ступени. Это время определяется скоростью восстановления необходимой электрической прочности контактного промежутка I ступени.

Основным фактором, определяющим быстродействие размыкателя с дуговой коммутацией, является скорость роста напряжения на дуге (автообдув, удаление заряженных частиц с помощью магнитного поля, обдув газом или жидкостью и др.). Для килоамперных токов наиболее эффективным способом удлинения дуги является интенсивный обдув в поперечном направлении. Эксперименты показали, что рост напряже-

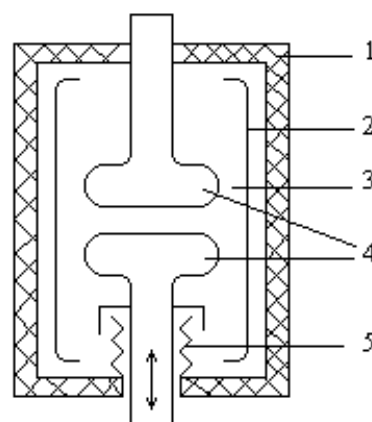


Рис.1.32. Схематическое изображение вакуумного выключателя:
1 – керамический корпус;
2 – экран; 3 – вакуум;
4 – электроды; 5 – мембрана [9]

ния на дуге происходит, в основном, из-за удлинения дуги, процессы теплообмена играют тем меньшую роль, чем выше плотность тока в разряде.

Независимо от характера процесса размыкания все размыкатели должны иметь следующие характеристики:

- длительное время пребывания в проводящем состоянии;
- большой ток (малые потери) в проводящем состоянии;
- быстрое возрастание импеданса после размыкания;
- большое значение импеданса после размыкания;
- высокое допустимое напряжения в разомкнутом состоянии;
- быстрое восстановление (большая частота повторных срабатываний).

Наиболее важным представляются два параметра – ток через размыкатель I_0 (способность размыкателя выдержать большой ток) и скорость нарастания сопротивления размыкателя dR_p/dt . Чем больше эти величины, тем более эффективно происходит передача энергии к нагрузке в мощной индуктивной разрядной цепи.

В работе [9] были вычислены значения скорости нарастания сопротивления. График их зависимости от максимального тока через размыкатель приведен на рисунке (1.33). Мощным размыкателям соответствует правая верхняя часть графика. Однако наиболее мощные размыкатели – плавкие и взрывные – представляют собой типичные устройства однократного действия, тогда как на практике часто требуются размыкатели многократного действия с частотой срабатывания порядка нескольких тысяч импульсов в секунду. Этим требованиям удовлетворяют плазменные [10] и полупроводниковые [11] прерыватели.

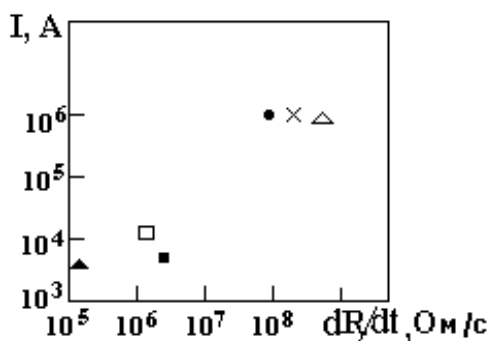


Рис.1.33. Скорость возрастания сопротивления от тока:

- – плавкие предохранители;
- х – плазменные прерыватели;
- Δ – взрывные размыкатели;
- – вакуумные размыкатели с паузой тока;
- – вакуумные размыкатели;
- ▲ – тиристорные выпрямители

получать напряжение более 1 МВ и в то же время облегчают условия изо-

ляции при кратковременных ($< 10^{-6}$ с) воздействиях высоких напряжений.

Некоторую неопределенность при использовании прерывателей представляет сильная зависимость коэффициента умножения напряжения на нагрузке от физических процессов, остаточного сопротивления и скорости роста сопротивления в прерывателе [7]. Длинная линия при временах переключения схемы $t_{\text{п}} \geq 2t_3$ (t_3 – время распространения электромагнитной волны в отрезке линии) ведет себя как индуктивность и для анализа применима двухконтурная схема рисунке (1.34).

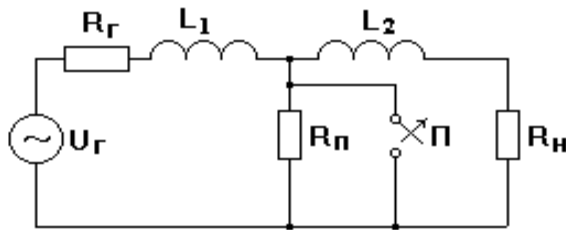


Рис.1.34. Принципиальная схема генератора с индуктивным накопителем и прерывателем

В момент времени $t = 0$ ток через накопительную индуктивность L_1 равен I_0 . При этом напряжение на питающем генераторе (это может быть накопительная емкость, ГИН и др.) равно 0. Для эффективной зарядки индуктивности должно выполняться условие $L_1/R_G \sim \tau_p$, где τ_p – длительность импульса,

R_G – внутреннее сопротивление генератора. Предположим, что в момент $t = 0$, сопротивление ключа мгновенно нарастает от 0 до $R_{\text{п}}$.

L_2 – индуктивность подвода энергии от ключа к нагрузке. Первоначально ток $I_2(0) = 0$. В работе [7] проведен анализ схемы (рис. 1.34) с точки зрения оптимизации потерь энергии при переключении тока в нагрузку. Найденные выражения для токов I_1 и I_2 в контурах соответственно будут иметь вид

$$I_1(t) \approx \frac{L_1 \cdot I_0}{L_1 + L_2} \left[e^{-t/\tau_-} + \frac{L_2}{L_1} \cdot e^{-t/\tau_+} \right], \quad (1.69)$$

$$I_2(t) \approx \frac{L_1 \cdot I_0}{L_1 + L_2} \left[e^{-t/\tau_-} - e^{-t/\tau_+} \right], \quad (1.70)$$

где $\tau_+ = L_2/R_{\text{п}}$, $\tau_- = L_1/(R_G + R_{\text{н}})$ оценены в предположении, что $R_{\text{п}} \gg R_{\text{н}}$, $R_{\text{н}} \gg R_G$ и $L_1 \gg L_2$. Для получения больших значений коэффициента передачи энергии от накопителя к нагрузке сопротивление $R_{\text{п}}$ должно быть больше всех других сопротивлений цепи. Индуктивности выбираются так, чтобы в L_1 накапливалась значительная энергия, а малая L_2 обеспечивала быстрое нарастание тока в цепи нагрузки [7]. Из

уравнений (1.69) и (1.70) следует, что ток переключения $I_{\Pi} = I_1 - I_2$ определяется как

$$I_{\Pi}(t) \approx I_0 \cdot \exp(-t/\tau_+), \quad (1.71)$$

т.е. время переключения $\tau_{\Pi} = \tau_+$. Поскольку $\tau_+ \ll \tau_-$, то ширина импульса тока в нагрузке (1.70) определяется временем разряда накопительной индуктивности через нагрузку и генератор. Отношение характеристического времени τ_p (ширины) импульса генератора к ширине выходного импульса τ_- составляет $\tau_p/\tau_- \approx (R_{\Gamma} + R_H)/R_{\Gamma}$. Это означает, что ширина выходного импульса уменьшается с ростом R_H , но не может быть меньше времени распространения электромагнитных волн в системе с распределенными параметрами.

Выделяемая на нагрузке мощность $P = I_2^2 \cdot R_H$ имеет максимальное значение

$$P_M \approx \frac{R_H \cdot L_1^2 \cdot I_0^2}{(L_1 + L_2)^2} \cdot \left[1 - \frac{2}{x} (\ln x + 1) \right], \quad (1.72)$$

где $x = R_H \cdot L_1 / [L_2(R_{\Gamma} + R_H)] \gg 1$. Из (1.72), полагая напряжение на нагрузке $U_H = \sqrt{PR_H}$, а напряжение генератора при разряде длинной линии $U_{\Gamma} = I_0 \sqrt{L_1/C_1}$, получим коэффициент умножения напряжения

$$\frac{U_H}{U_{\Gamma}} = \frac{R_H}{\rho} \left(\frac{L_1}{L_1 + L_2} \right) \left[1 - \frac{2}{x} (\ln x + 1) \right]^{0.5}, \quad (1.73)$$

где $\rho = \sqrt{L_1/C_1}$, $I_0 = U_0/R_{\Gamma}$. Из (1.73) видно, что при $L_1 + L_2 \approx L_1$ коэффициент умножения напряжения пропорционален R_H/ρ и выражению в квадратных скобках в степени 0,5, которое может использоваться только при $x \geq 10$ и при этом его значение близко к 1 [7]. Процесс спада тока и роста напряжения для различных прерывателей рассмотрен в [12-13].

1.2.3 Размыкатели, основанные на использовании электрического взрыва проводников

Одним из распространенных типов размыкателей тока для индуктивных накопителей энергии являются коммутаторы, основанные на использовании электрического взрыва проводников (ЭВП) [14]. Явление, известное в физике как электрический взрыв проводника, представляет собой резкое изменение его физического состояния под действием импульсного электрического тока большой плотности, приводя-

щее к исчезновению металлической электропроводности и сопровождающееся характерными для взрывов эффектами – излучением и образованием ударных волн. Схема генератора с LC -контуром и ЭВП приведена на рисунке (1.35). При замыкании ключа K_1 ток от накопителя с емкостью C , заряженной до напряжения U_0 , течет через индуктивность L и ЭВП. Нагрузка отделена ключом K_2 . По мере протекания тока проводник нагревается и плавится.

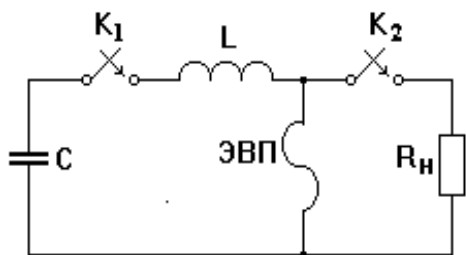


Рис.1.35. Схема источника с ЭВП тока и прерывателем

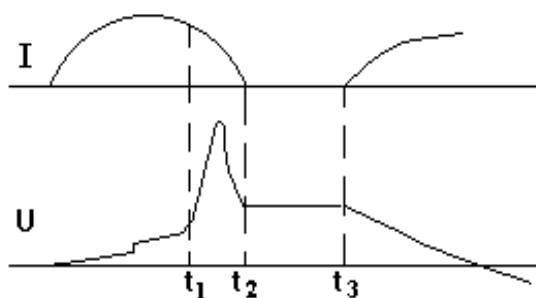


Рис.1.36. Осциллограмма напряжения на ЭВП

На осциллограмме (рис.1.36) напряжения до времени t_1 , проводник переходит в жидкое состояние, и в момент t_1 начинается собственно взрыв проводника. При этом сопротивление ЭВП возрастает на несколько порядков, что приводит к резкому снижению тока и генерированию импульса напряжения на индуктивности L . Если электрическая прочность продуктов ЭВП выше амплитуды генерируемого напряжения, то ток отключается полностью (момент t_2), и наблюдается пауза тока ($t_3 - t_2$), длительность которой определяется оставшимся на батарее напряжением и скоростью расширения продуктов ЭВП. Если разрядник K_2 (рис. 1.35) настроить так, чтобы он пробивался генерируемым при взрыве напряжением, ток переключится на нагрузку, и напряжение на ней может в несколько раз превысить зарядное напряжение конденсаторной батареи.

Авторами [14-18] был развит метод подобия, позволяющий с достаточной для инженерных расчетов точностью оптимизировать схему по выбранному параметру и рассчитать основные ее характеристики, такие как амплитуда и длительность импульсов тока и напряжения, энергия, передаваемая в нагрузку и др. LC -контур со взрывающимся проводником (ВП) характеризуется рядом величин: индуктивностью L , емкостью C , зарядным напряжением U_0 , диаметром проволочек d , их

длиной l , количеством n , общим сечением S . В набор также входят величины, характеризующие материал проволоки: удельное сопротивление ρ , удельная энергия сублимации (или связи) на единицу объема e_s , удельное действие взрыва h (это величина $\frac{1}{S^2} \int_0^{t_g} I^2 dt$, где t_g – момент взрыва, I – ток через ВП). V – характерная скорость разлета вещества при взрыве. Из этих величин можно составить три безразмерных комплекса подобия:

$$\Pi_1 = \frac{\rho \cdot l}{S \cdot Z}; \quad \Pi_2 = \frac{C \cdot U^2}{S^2 \cdot Z \cdot h}; \quad \Pi_3 = \frac{V \sqrt{L \cdot C}}{d},$$

где $Z = \sqrt{L/C}$ – характеристическое сопротивление LC -контура;
 $S = \pi \cdot n \cdot d^2/4$ – сечение проводников, n – число параллельных проводников.

Безразмерные величины, определяющие поведение ВП в ходе взрыва, на стадии нагрева (до начала собственно взрыва или начала напряжения) зависят от первых двух критериев, а на стадии собственно взрыва – от всех трех. Эти безразмерные величины можно записать в следующем виде:

$y = \frac{I \cdot Z}{U_0}$ – ток, $\tau = t / \sqrt{L \cdot C}$ – время, $\frac{U}{U_0}$ – напряжение, $\frac{W}{W_0}$ – энергия (по отношению к запасенной в контуре $W_0 = \frac{C \cdot U_0^2}{2}$) или $\frac{W}{S \cdot l \cdot e_s}$ – энергия (по отношению к энергии сублимации) и ряд других. Таким образом можно записать, например:

$$y_m = f_1(\Pi_1, \Pi_2), \quad \frac{U_m}{U_0} = f_2(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) \quad \text{и т.д.}$$

Здесь y_m – максимум тока, U_m – максимум напряжения.

Если исследовать один металл, то в комплексах постоянные ρ_0 , e_0 , v_0 , характеризующие металл, можно опустить, тогда получится три размерных параметра:

$$\lambda = \frac{l}{n \cdot d^2 \cdot Z}, \quad [\text{Ом}^{-1}, \text{мм}^{-1}], \quad \varepsilon = \frac{C \cdot U_0^2}{(n \cdot d^2)^2 \cdot Z}, \quad \left[\frac{\text{Дж}}{\text{мм}^4 \cdot \text{Ом}} \right],$$

$$v = \frac{\sqrt{L \cdot C}}{d}, \quad \left[\frac{\text{мкс}}{\text{мм}} \right] \quad (1.74)$$

Начальные факторы имеют размерность: l и d – мм, C – мкФ, L – мкГн, $\sqrt{L \cdot C}$ – мкс.

Проведенные исследования [14] показали, что все характеристики контура LC с ЭВП моделируются параметрами (1.73) с погрешностью 20 % в широкой области изменения начальных факторов: $U_0 = 1 \div 500$ кВ, $C = 0,1 \div 2000$ мкФ, $L = 0,4 \div 50$ мкГн, $n = 1 \div 80$, $d = 0,04 \div 1$ мм, $l = 4 \div 2600$ мм.

До начала взрыва характеристики зависят только от λ и ε . Формулы имеют степенной вид

$$y_m = \frac{I_m \cdot Z}{U_0} = A(\varepsilon \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^{1/3})^\alpha, \quad (1.75)$$

$$\tau_m = \frac{t_m}{\sqrt{L \cdot C}} = B(\varepsilon \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^{1/3})^\beta, \quad (1.76)$$

где I_m - амплитуда тока в контуре; t_m - время до максимума тока.

Коэффициенты A и B и показатели α и β имеют значения, приведенные в таблице 1.8

Таблица 1.8

Значения коэффициентов A и B и показателей α и β для меди

	A	α	B	β
Cu	0,9	- 0,25	1,72	- 0,31
Al	0,78	- 0,31	0,9	- 0,3

Наибольшая скорость роста сопротивления ЭВП и мощности достигаются при длине проводника, близкой к критической. Критическая длина проводника l_k обеспечивает паузу тока нулевой длительности. С изменением длины l в (1.74) изменяется только параметр λ , причем минимальное значение l определяется прочностью перекрытия по поверхности проводника до его взрыва, а максимальное – из условия, что проводник не взрывается, если введенная энергия недостаточна для взрыва. Для медных проводников выражение критической длины имеет вид [14]

$$\lambda_k = \frac{l_{kp}}{n \cdot d^2 \cdot Z} = 1,35 \cdot 10^3 (10^{-6} \cdot \varepsilon \cdot \nu)^{0,36}. \quad (1.77)$$

Поглощенная проводников энергия

$$W_n = 0,5 \cdot W_0 (10^{-6} \cdot \varepsilon)^{-0,5}. \quad (1.78)$$

Ток в момент максимума напряжения при $\lambda = \lambda_k$

$$I_m = 0,75U_0(10^{-6} \cdot \varepsilon)^{0,3/Z} . \quad (1.79)$$

Таким образом, можно рассчитать характеристики LC - контура с ЭВП к моменту максимума тока, максимума напряжения и др. Кроме того, можно выбрать тип взрыва с паузой тока, без нее, с паузой тока нулевой длительности. При переключении контура с ЭВП на активную нагрузку к параметрам (1.74) добавляются еще два: момент подключения нагрузки и ее сопротивление. Методика расчета, включающая и определение длительности импульса, предложена в [14]. Кроме того, анализ полученных зависимостей позволяет определить максимальную мощность, развиваемую в ИН с ЭВП - прерывателем тока на активной нагрузке.

1.2.4 Генераторы с плазменным прерывателем тока

В настоящее время существует три вида прерывателей, скорость нарастания сопротивления которых обеспечивает длительность импульса ~ 100 нс: электрически взрывааемые проводники, полупроводниковые прерыватели и плазменные прерыватели тока. Полупроводниковые прерыватели могут работать в частотном режиме, но имеют ограничения по коммутируемой мощности; недостатком электрически взрывааемых проводников является необходимость замены прерывателя после каждого импульса.

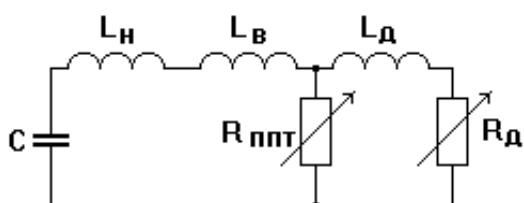


Рис. 1.37. Схема ускорителя на основе ППТ: C – емкость ГИН; L_H и L_B – наружная и вакуумная части накопительной индуктивности; $R_{ППТ}$ – импеданс ППТ; L_D и R_D – индуктивность и импеданс диода

ППТ представляет собой плазменный диод, импеданс которого зависит от времени и определяется величиной как пропускаемого через него тока, так и перенесенного заряда. Генератор на основе ППТ – это LC - контур, замкнутый через ППТ, параллельно которому включена нагрузка R_D , C – емкость ГИН, L – индуктивность всех элементов контура (рис. 1.37) [10]. В большинстве

установок применяют ППТ с коаксиальными электродами. Расположенные в вакуумном объеме электроды ППТ соединены с ГИН через высоковольтный ввод с изолятором. Изолятор отделяет вакуумный объем ППТ от заполненного жидким или газообразным диэлектриком объема ГИН и делит индуктивность L на две части - наружную L_H и вакуумную L_B [10]. Наиболее часто применяемые плазменные пушки представляют

собой два коаксиальных электрода, разделенных диэлектриком и подключенных к импульсному высоковольтному источнику питания (рис. 1.38). При подаче импульса напряжения на электроды пушки происходит электрический пробой по поверхности диэлектрика. Концентрация плазмы регулируется путем изменения напряжения или емкости источника питания и интервала времени между срабатыванием пушек и включением ГИН.

Образовавшаяся при этом плазма заполняет вакуумный ППТ. Затем включается ГИН, и его электрическая энергия преобразуется в энергию магнитного поля – осуществляется режим проводимости. Длительность

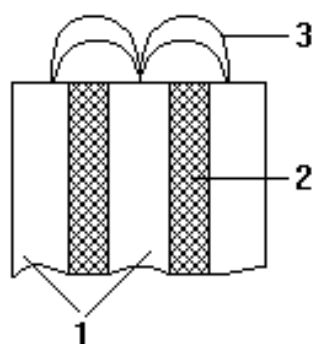


Рис. 1.38. Искровой зазор коаксиальной плазменной пушки:

- 1 – внутренний и внешний коаксиальные электроды;
- 2 – цилиндрическая диэлектрическая вставка;
- 3 – пробой по поверхности диэлектрика

режима проводимости $\tau_{\text{п}} = \sim T/4$ составляет около 1 мкс (T – период контура) [10]. Нижняя граница этого диапазона определяется быстродействием LC -контура, верхняя – влиянием приэлектродной плазмы, которая при $\tau_{\text{п}} > 2$ мкс приводит к увеличению концентрации плазмы в зазоре и его короткому замыканию.

Режим проводимости заканчивается, когда ток через ППТ достигает тока обрыва. После этого сопротивление ППТ резко возрастает – осуществляется режим обрыва тока, генерации напряжения и ускорения заряженных частиц. При этом энергия магнитного поля преобразуется в энергию потоков ускоренных ионов и электронов в зазоре ППТ и шунтирующей его нагрузке за характерное время $\sim 10^{-7}$ с.

В момент обрыва тока возникает скачок напряжения на ППТ $U_{\text{ППТ}} = -LdI/dt = \sim (R/\rho)U_0$, где R – общее сопротивление ППТ и параллельно включенных элементов (диода, вакуумной линии и изолятора), ρ – волновое сопротивление LC –контура.

В настоящее время можно выделить два основных направления развития генераторов с ППТ. Первое – создание генераторов мегаджоульного диапазона для получения тормозного рентгеновского излучения и достижения термоядерных параметров в программах по инерциальному термоядерному синтезу, а также решения задач имитации радиационного воздействия термоядерного взрыва на радиоэлектронную аппаратуру. Второе направление – разработка частотно-импульсных ускорителей для промышленных технологий [10].

1.2.5 Полупроводниковые прерыватели тока

Для генерирования мощных наносекундных импульсов наиболее широко распространены два основных подхода, отличающиеся друг от друга способом накопления.

В генераторах мощных наносекундных импульсов используют два способа накопления энергии: в емкостных и индуктивных накопителях. Первый способ основан на накоплении энергии электрического поля в быстрых емкостных накопителях, в качестве которых используются низкоиндуктивные конденсаторы и формирующие линии с жидким диэлектриком, с последующей передачей энергии в нагрузку через замыкающее устройство – сильноточные наносекундные коммутаторы.

Во втором способе накопление энергии происходит в магнитном поле индуктивного накопителя (контур с током), а для ее передачи в нагрузку применяются прерыватели тока. Последний метод наиболее перспективен для развития мощной импульсной техники, поскольку плотность запасаемой энергии в индуктивных накопителях примерно на два порядка выше, чем в емкостных накопителях. С другой стороны, проблема быстрого обрыва большого импульсного тока в техническом плане является существенно более сложной задачей, чем проблема коммутации. В наибольшей степени эта проблема выражена при формировании мощных импульсов наносекундной длительности, где прерыватель должен выдерживать напряжение МВ и обеспечивать обрыв тока в десятки и сотни кА за время порядка единиц и десятков наносекунд.

Этим требованиям удовлетворяют два основных типа наносекундных прерывателей: плазменные прерыватели тока с наносекундной и микросекундной накачкой и прерыватели тока на основе ЭВП. Однако такие прерыватели либо принципиально не работают в частотном режиме (ЭВП), либо имеют низкую частоту повторения импульсов и ограниченный ресурс из-за эрозии электродов (ПП).

Для создания качественно новой мощной импульсной техники, способной выйти на технологические применения, используются индуктивные накопители с твердотельными прерывателями тока, имеющие высокие удельные характеристики и практически неограниченный срок службы. Основная проблема здесь состоит в разработке мощного частотного твердотельного размыкателя тока, способного в наносекундном диапазоне времени отключать кА токи и выдерживать напряжения порядка 10^6 В.

В 1983 году профессором И.В. Греховым был предложен и реализован сильноточный режим работы $p^+ - n - n^+$ структуры с плотностью об-

рываемого тока 200 А/см^2 и временем обрыва около 2 нс и рабочим напряжением 1 кВ . Такие диоды получили название дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ). Принцип работы ДДРВ состоит в следующем. За счет короткой длительности импульса прямого тока (сотни нс) в базе p - n перехода создает тонкий слой инжектированной плазмы, в котором сосредоточена основная часть накопленного заряда. При протекании тока обратной накачки происходит рассасывание плазменного слоя у p - n -перехода с одновременным дрейфовым выносом дырок из остальной части базы. Подбором параметров структуры (длина базы и уровень легирования) и режима накачки (длительность и плотность тока) достигается условие, когда к моменту удаления из структуры всех неравновесных носителей плотность дрейфового тока достигает максимального значения для данного уровня легирования базы. При выполнении этого условия процесс обрыва обратного тока представляет собой удаление из базы равновесных носителей с максимально возможной скоростью насыщения порядка 10^7 см/с . В связи с этим ДДРВ имеет ограничение по плотности тока через структуру. Для получения обратных напряжений на структуре около $1 - 2 \text{ кВ}$ уровень донорной примеси в базе не может превышать 10^{14} см^{-3} , что на стадии отключения соответствует максимальной плотности тока около $160 - 200 \text{ А/см}^2$. Однако путем увеличения площади структуры и создания сборок из последовательно соединенных структур возможно увеличение рабочих параметров прерывателя по току и напряжению. Рекордными параметрами для последовательно соединенных ДДРВ являются импульсы с амплитудой напряжения 80 кВ , током 800 А и частотой следования 1 кГц [11].

Основное противоречие, препятствующее разработке мощного наносекундного полупроводникового прерывателя на основе метода токовой инжекции заряда, состоит в том, что процесс обрыва тока развивается в низколегированной базе диода. При этом возможно либо получение наносекундного времени отключения тока с низкой плотностью, которая определяется собственной проводимостью базы, свободной от избыточной плазмы (ДДРВ), либо получение высокой плотности отключаемого тока при его последующем медленном спаде через структуру, база которой заполнена плотной плазмой (выпрямительный силовой диод).

Наблюдаемый эффект обрыва тока, названный SOS-эффектом (Semiconductor Opening Switch), отличается от режима работы полупроводниковых прерывателей по первому методу (ДДРВ) следующим:

- на два порядка более высокой плотностью тока, которая не может быть объяснена с позиций дрейфового механизма;

- неравенством заряда, протекающего в прямом и обратном направлении;
- существованием эффекта уменьшения времени обрыва тока в 2 – 3 раза в сборке из нескольких параллельных диодов по сравнению с одиночным.

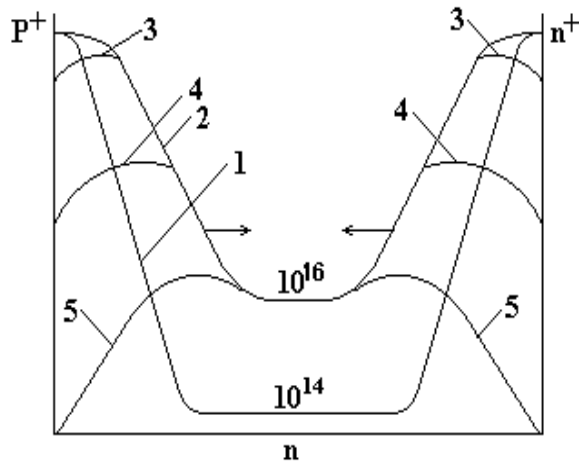


Рис. 1.39 Полупроводниковая структура кремниевого диода типа $p^+ - n - n^+$:

1,2 – кривые накопления и движения носителей в диоде при протекании тока I^+ ; 3,4 – кривые, характеризующие уход основных носителей при протекании тока I^- ; 5 – кривая, характеризующая момент обрыва тока

Физическая картина процессов, проходящих в полупроводниковом размыкателе (ППР) на основе диода, представлена на рис. 1.39 и рис. 1.40.

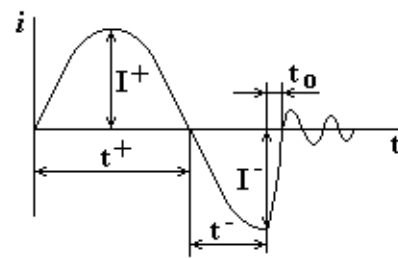


Рис. 1.40 Осциллограмма тока в диоде: I^+ – прямой ток, текущий в течение времени t^+ ; I^- – обратный ток, текущий в течение времени t^- ; t_0 – время обрыва тока

При прохождении через диод типа $p^+ - n - n^+$ прямого тока I^+ происходит инжекция дырок и электронов, которые движутся навстречу друг другу. Подавляющая часть накопленного заряда сосредоточена в высоколегированных областях структуры: электроны – в p^+ - области, дырки – в n^+ -области [11]. Концентрация носителей в базе достигает значений $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Кривая 2 (рис. 1.39) соответствует току $i = 0$ после протекания его в течение времени t^+ (рис. 1.40). После смены полярности тока через диод начинает течь обратный ток I^- , что приводит к уходу основных носителей на p^+ и n^+ переход при этом в течение времени уменьшается концентрация основных носителей (рис. 1.39, кривая 3,4). В результате основные носители в базе оказываются нескомпенсированными, что приводит к образованию объемного нескомпенсированного заряда. За время t^- (рис. 1.40), когда все основные носители ушли в область переходов (рис. 1.39, кривая 5) сопротивление резко возрастает. Скорость роста сопротивления имеет порядок 10^{10} Ом/с . В этот момент

и происходит обрыв тока за время t_0 (рис. 1.40), величина которого зависит от характеристик диода и его конструкции и может составлять единицы наносекунд и больше.

Существование плазмы в базе к моменту обрыва тока может также объяснять уменьшение времени обрыва тока в сборке из нескольких параллельных структур, поскольку естественный разброс момента времени начала отключения тока в отдельных структурах приводит к нарастанию обратного тока в еще не отключенных структурах, заполненных остаточной плазмой. Резкое усиление обратного тока в структурах, отключающихся последними, ускоряет процесс обрыва тока всей сборки. На рисунке 1.41 приведена схема эксперимента по обнаружению эффекта наносекундного обрыва сверхплотных токов [23].

На схеме: C_M , U_M – емкость и выходное напряжение генератора Маркса; L_M – индуктивность контура; SOS – полупроводниковый прерыватель тока из кремниевых высоковольтных выпрямителей КЦ 105, КЦ 108, СДЛ 0,4-800. Эти диоды имеют $p^+ - p - n - n^+$ - типа полупроводниковую структуру, в которой в качестве n - базы используется электронно легированный кремний с концентрацией донорной примеси $N_d \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Длина базы составляет $100 \div 200 \text{ мкм}$, площадь структуры – $0,02 \div 0,2 \text{ см}^2$. Число последовательно соединенных структур зависит от рабочего напряжения диода и может меняться от 14 до 132. Общее число структур при параллельно-последовательном соединении диодов в прерывателе достигало 12000.

Эксперименты показали, что в силовом полупроводниковом диоде подбором параметров по плотности тока Γ^+ и времени накачки t^+ возможна реализация наносекундного обрыва сверхплотных токов. При этом полупроводниковая структура диода на стадии обрыва тока останется заполненной плотной избыточной плазмой с концентрацией $(0,6 \div 4) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что на 2 порядка превышает исходный уровень легирования базы, $t_0 - (10 \div 50) \text{ нс}$, плотность обрываемого тока $10 - 60 \text{ кА/см}^2$.

Анализ процессов динамики электронно-дырочной плазмы в полупроводниковой структуре при плотностях тока и длительностях импульсов накачки, характерных для SOS – эффекта, показал следующее:

- Удаление всей избыточной плазмы из структуры не является необходимым условием для резкого обрыва обратного тока;
- Обрыв тока определяется процессами, происходящими в узких высоколегированных областях $p^+ - p - n - n^+$ -структуры, свободных от избыточной плазмы, носит динамический характер и может быть не связана с образованием протяженного в пространстве объемного заряда из-за процессов интенсивного лавинного размноже-

ния носителей в сильном электрическом поле.

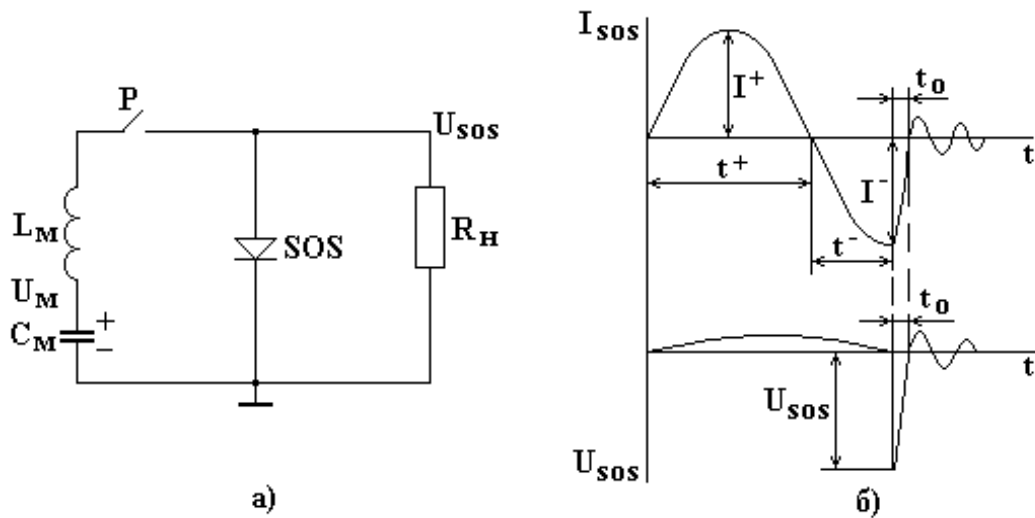


Рис. 1.41. Схема эксперимента (а), стилизованная осциллограмма тока через прерыватель и напряжение на нагрузке (б)

Таким образом, качественное отличие SOS-эффекта от других принципов коммутации в полупроводниковых приборах состоит в том, что развитие процесса обрыва тока происходит в узких высоколегированных областях структуры, база которой заполнена плотной избыточной плазмой. Это обстоятельство и приводит к сочетанию высокой плотности обрываемого тока и наносекундного времени его отключения [23].

Одноконтурная схема накачки прерывателя (рис. 1.41) является наиболее простой. Соотношения, связывающие параметры области существования SOS - эффекта с параметрами генератора Маркса, контура накачки и прерывателя тока, получаемые без учета активных потерь, имеют вид

$$J^+ \cdot t^+ = \pi C_M \cdot U_M / S_D \cdot n_D, \quad (1.80)$$

$$2\pi^2 \cdot k_M \cdot W_M = (U_M t^+)^2. \quad (1.81)$$

На рисунке 1.42 показаны зависимости плотности тока прямой накачки J^+ (кривая 1) и времени обрыва тока t_0 (кривая 2) от длительности прямой накачки t^+ для диодов СДЛ и КЦ 105. После выбора величины J^+ , t^+ на кривой 1 (рис.1.42), лежащей в области SOS – эффекта, и известной площади структуры одного диода S_D по соотношению (1.80) производится согласование параметров генератора Маркса C_M и U_M с числом параллельных диодов n_D в прерывателе тока. Количество последовательно соединенных диодов в одной ветви определяется рабочим напряжением одного диодного столба и амплитудой импульса на нагрузке. Максимальное напряжение на прерывателе тока развивается в режиме холостого хода и составляет около $3U_M$. Соотношение (1.81) используется для оценки требуемой величины индуктивности контура накачки L_M .

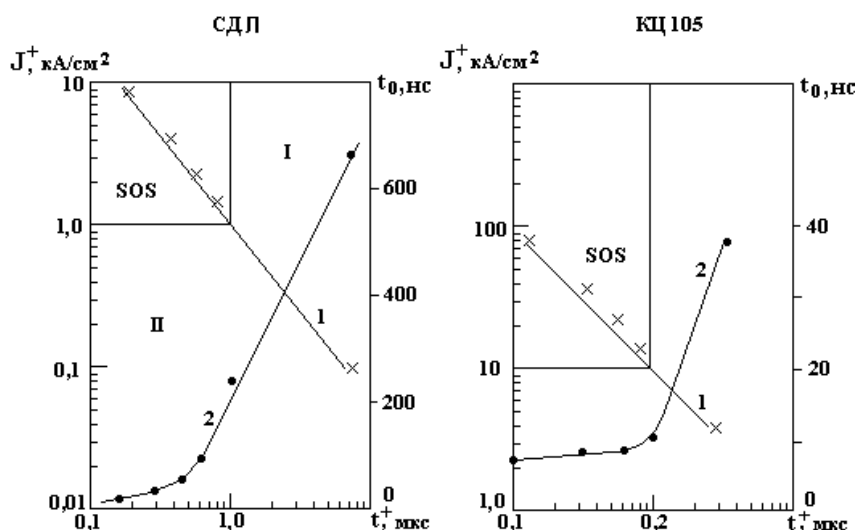


Рис. 1.42. Зависимости плотности тока прямой накачки J^+ (кривая 1) и времени обрыва тока t_0 (кривая 2) от длительности прямой накачки t^+ для диодов СДЛ и КЦ 105

Оно иллюстрирует основное ограничение метода обострения мощности генератора Маркса с сосредоточенными параметрами прерывателем тока на полупроводниковых диодах.

При заданных величинах U_M и t^+ запасаемая энергия W_M ограничена минимальной величиной индуктивности разрядного контура. Увеличение W_M без уменьшения L_M приводит к росту t^+ и раннему отключению тока до достижения им своего максимального значения. Двухконтурная схема, приведенная на рисунке 1.43, содержит отдельные цепи для прямой и обратной накачки прерывателя тока. Схема сложнее, но у нее есть преимущество. C_1 и C_2 одинаковой емкости. Конденсатор

C_1 , предварительно заряженный до U_0 , после замыкания ключа S^+ разряжается на C_2 через L^+ и SOS. Ключ S^- при этом разомкнут, процесс прямой накачки прерывателя заканчивается при переходе прямого тока через нуль. В этот момент времени ключ S^+ размыкается, ключ S^- замыкается и в прерыватель начинает вводиться обратный ток от конденсатора C_2 через индуктивность L^- . Разделение контуров позволяет снизить импульсную мощность генератора прямой накачки за счет уменьшения прямого тока и увеличения его длительности. Отдельный контур обратной накачки позволяет реализовать режим усиления обратного тока и регулировать скорость его ввода в прерыватель независимо от контура прямой накачки, а скорость ввода обратного тока в прерыватель, работающий в условиях SOS – эффекта, определяет его основную характеристику – время обрыва тока.

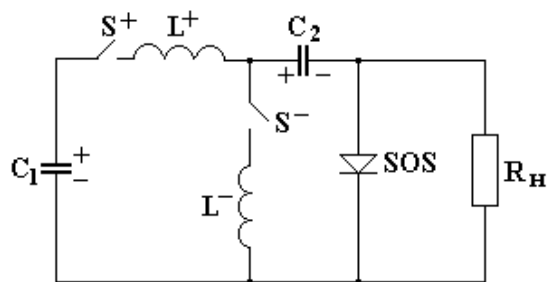


Рис. 1.43. Двухконтурная схема

На основе проведенных исследований SOS – эффекта был разработан ряд наносекундных генераторов и ускорителей с полупроводниковыми прерывателями тока [23]. Генераторы имели выходное напряжение от 150 до 450 кВ и отличались друг от друга по величине запасаемой энергии на 3 порядка. В качестве питающих устройств использовались генераторы на основе схем Маркса (рис.1.44). Генератор, показанный на рисунке 1.44, имеет вес 10 кг, длину 60 см. Четыре ступени напряжением 18 кВ заряжаются в импульсном режиме от тиристорного зарядного устройства. Выходные параметры генератора: $C = 0,85$ нФ, $U = 70$

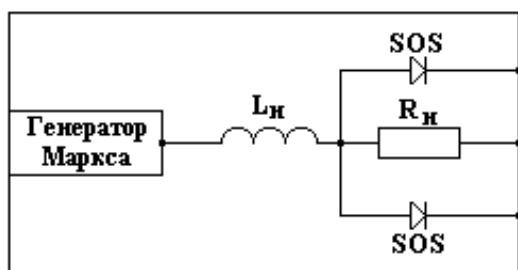


Рис.1.44. Схема малогабаритного генератора со схемой Маркса

кВ, $W = 2$ Дж, обрываемый ток ~ 1 кА за $t = 10$ нс, $U_H = 160$ кВ на 50 Гц, $R_H = 180$ Ом .

На рис. 1.45 приведена схема более мощного сильноточного наносекундного ускорителя электронов с выходным напряжением до 450 кВ. Вначале подключается контур прямой накачки C^+ , спустя время задержки включается генератор Маркса, и происходит ввод обратного тока в прерыватель, величина которого больше прямого тока в 4-5 раз.

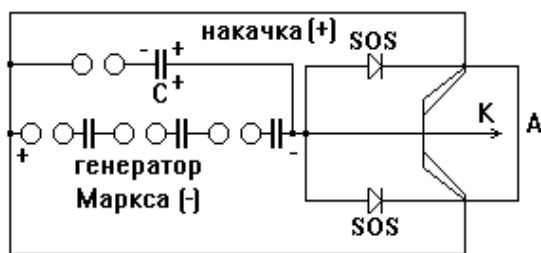


Рис.1.45. Схема ускорителя электронов с двухконтурной накачкой прерывателя тока.

габариты 180x180x80 см. Искровые разрядники выполняют функции разделительных элементов и не участвуют в процессе формирования выходного наносекундного импульса, что снижает требование к величине их индуктивности, времени коммутации t_K и стабильности срабатывания Δt_3 .

Отличием SOS - прерывателей от ЭВП и плазменных является простота, стабильность и возможность работы в частотном режиме. При использовании вместо генератора Маркса систем с магнитным сжатием импульса возможна разработка устройств с полностью твердотельной системой коммутации энергии, в которой полупроводниковый прерыватель тока выполняет функцию оконечного усилителя мощности.

1.2.6. Использование индуктивных накопителей в цепях с емкостными и индуктивными элементами.

Если из первичного емкостного накопителя требуется вывести энергию в нагрузку с малым активным сопротивлением R_n в течение времени Δt (причем Δt существенно больше постоянной времени $\tau_c = R_n C$, так что непосредственное включение конденсатора с емкостью C на R_n не обеспечивает требуемый режим разряда), то можно использовать схему с промежуточным индуктивным элементом L и шунтирующим замыкателем K_2 (рис 1.46) [3].

Вначале K_2 разомкнут, и при замыкании K_1 начинается колебательный разряд в LC -контуре, содержащем сопротивление нагрузки R_n . Если постоянная затухания контура $\xi = R^2 C / (4L) < 1$, где R – полное омическое сопротивление контура, то согласно [3] через интервал времени

$$t_0 = \sqrt{LC} \frac{\arctg \sqrt{\xi^{-1} - 1}}{\sqrt{1 - \xi}} \quad (1.80)$$

Последующий обрыв тока за время t_0 приводит к формированию импульса высокого напряжения на диоде ускорителя и генерации электронного пучка. Принципиальное отличие состоит в использовании двухконтурной накачки прерывателя в режиме усиления обратного тока. Масса ускорителя ~ 300 кг,

ТОК ДОСТИГНЕТ МАКСИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ

$$I_m = \frac{U_0}{\omega L} \sin \omega t_0 \exp \left[-\sqrt{\frac{\xi}{1-\xi}} \operatorname{arctg} \sqrt{\xi^{-1} - 1} \right], \quad (1.81)$$

где U_0 – начальное напряжение на конденсаторе,

$$\omega = \sqrt{(1-\xi)/(LC)}. \quad (1.82)$$

В этот момент замыкается К2, емкостной накопитель шунтируется накоротко, а ИН разряжается на нагрузку с постоянной времени

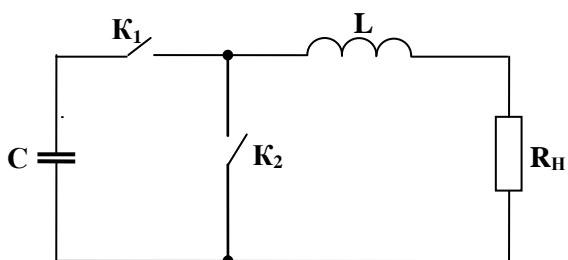


Рис. 1.46. Электрическая схема LC – контура с замыкателем типа «кrouбар» [3]

$\tau_L = L/R_{\text{н}}$, которая достаточно велика ($\tau_L \gg \tau_C$). КПД процесса передачи энергии от ЕН к ИН высокий, так как время заряда ИН, равное t_0 , мало [3].

Другой пример связан с передачей энергии от ИН к индуктивной нагрузке $L_{\text{н}}$ рис. 1.47,а).

Короткозамкнутый контур с ИН, в котором запасена энергия $W_0 = 0,5Li_0^2$, разрывается коммутатором К, и ИН включается на индуктивную нагрузку $L_{\text{н}}$, причем $L_{\text{н}} = L$ (оптимальный режим), а активные сопротивления в контуре пренебрежимо малы. Начальный ток ИН i_0 после коммутации уменьшится вдвое, так как полное потокосцепление должно сохраниться.

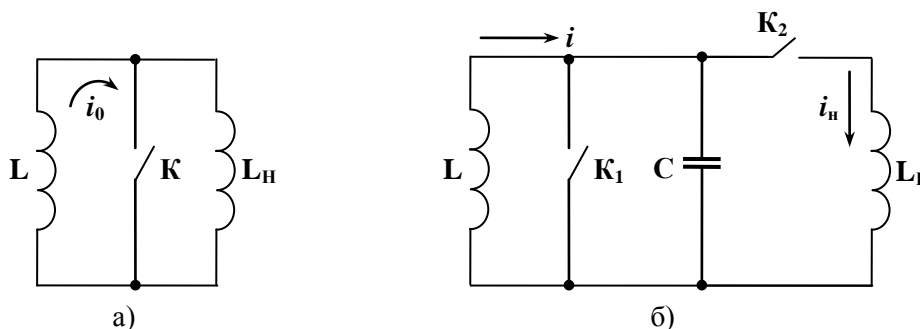


Рис. 1.47. Схема прямого (а) подключения к индуктивной нагрузке и через промежуточный конденсатор (б) [3]

В результате энергия, переданная нагрузке, будет $W_H = 0,25 W_0$. Энергия, оставшаяся в ИН, составит $W_{ИН} = 0,25 W_0$. Следовательно, энергия $0,5 W_0$ будет потеряна в коммутаторе, каким бы идеальным ни стремились его сделать. На коммутаторе при его размыкании за время t_K возникают большие напряжения порядка $U_K \approx 0,5 Li_0 / t_K$.

Очевидно, такая схема передачи энергии не рациональна. Ее эффективность можно повысить за счет включения промежуточного конденсатора с емкостью C (рис.1.37,б). До начала рабочего процесса ключ K_1 замкнут и в индуктивности L течет начальный ток i_0 , при $t=0$ ключ K_1 размыкается, ключ K_2 служит для подключения нагрузки и в течение рабочего процесса замкнут. Уравнение такой цепи при отсутствии активных сопротивлений [3]:

$$\begin{aligned} L d^2 i / dt^2 + (i - i_H) / C &= 0 ; \\ L_H d^2 i_H / dt^2 + (i_H - i) / C &= 0 \end{aligned} \quad (1.83)$$

при начальных условиях для $t=0$: $i=i_0$, $i_H=0$, $L_H di_H/dt = L di/dt = 0$ (так как в начальный момент емкость эквивалентна короткозамкнутой перемычке).

Решением этих уравнений будет

$$\begin{aligned} i &= I_\infty \left(1 + \frac{L_H}{L} \cos \omega t\right), & i_H &= I_\infty (1 - \cos \omega t), \\ I_\infty &= i_0 L / (L + L_H), & \omega &= \sqrt{(L + L_H) / (LL_H C)}. \end{aligned} \quad (1.84)$$

Максимальный ток нагрузки при $\omega t = \pi$

$$I_{\text{max}} = 2I_\infty = 2i_0 L / (L + L_H), \quad (1.85)$$

и энергия, переданная в нагрузку,

$$W_H = 0,5 L_H I_{\text{max}}^2 = 4W_0 L L_H / (L + L_H)^2, \quad (1.86)$$

где $W_0 = 0,5 Li_0^2$ – начальная энергия.

Таким образом, например, при $L_H = L$, благодаря включению конденсатора, имеем $W_H = W_0$, т.е. вся начальная энергия передается в индуктивную нагрузку. Кроме того, конденсатор шунтирует ключ K_1

при размыкании, и напряжение на К1 во время коммутации (t_k) будет много меньше, чем в схеме на рисунке (1.47,а).

Напряжение на конденсаторе

$$U_c = \frac{1}{C} \int (i - i_n) dt = \frac{i_0}{\omega C} \sin \omega t, \quad (1.87)$$

и его максимальная энергия

$$W_c = 0,5CU_c^2 = W_0 L_n / (L + L_n). \quad (1.88)$$

При $L_n = L$ имеем $W_c = 0,5W_0$, т.е. для реализации схемы требуется относительно большая емкость, что является недостатком такого способа передачи энергии в индуктивную нагрузку[3].

1.3 Взрывомагнитные генераторы

Взрывные генераторы, называемые также магнитокумулятивными, основаны на принципе сжатия импульсного магнитного поля с помощью энергии взрывчатых веществ (ВВ). Магнитокумулятивные источники энергии с высокими удельными характеристиками (10–100 МДж/м³) открывают большие возможности для научных исследований и практического применения в импульсной энергетике, физике плазмы, лазерной физике, в ускорительной и СВЧ-технике. Компактность магнитокумулятивных генераторов позволяет создать мощные высокоэнергетические установки, которые при относительно небольшом объеме могут обеспечить предельные параметры, например, при нагреве плазмы до высоких температур, формировании направленных пучков излучения и т.п.. В 1951 г. А.Д. Сахаровым впервые была высказана идея о возможности превращения энергии ВВ в энергию магнитного поля и им же были предложены принципиальные конструкции источников сверхсильных магнитных полей и токов, основанные на быстрой деформации взрывом токонесущих контуров [19].

Взрывной генератор – это система с переменной индуктивностью, уменьшающейся в процессе работы. При этом движущиеся проводники, ускоренные взрывом, совершают работу против пондеромоторных сил магнитного поля, что приводит к увеличению энергии поля.

Магнитное поле может возбуждаться внутри тонкостенного металлического цилиндра (лайнера), помещенного внутри одновитковой или многовитковой катушки, на которую разряжается емкостный накопитель.

В момент достижения максимального тока I (и, соответственно, H) происходит симметричное обжатие лайнера и сжатие магнитного поля

(рис.1.48). Магнитное поле может возбуждаться соленоидом и вы-

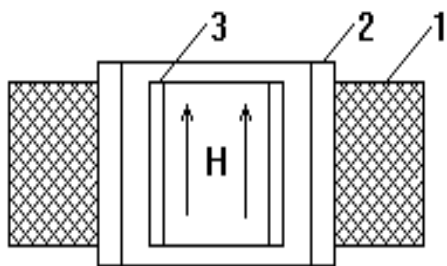


Рис.1.48. Взрывной генератор:
1- взрывчатое вещество;
2- катушка с током; 3- стальная труба

тесняться в цилиндр – нагрузку. В этом случае генератор состоит из ценняться в цилиндр – нагрузку. В этом случае генератор состоит из центральной проводящей трубы и коаксиально расположенной спирали (соленоида, переходящего в цилиндр). Во внутреннюю трубу помещается заряд ВВ, инициируемый с торца со стороны спирали (рис. 1.49). Батарея конденсаторов C разряжается на цепь: внутренний цилиндр – нагрузка – соленоид. Под действием продуктов детонации центральная труба растягивается в виде конуса, и в момент достижения максимального тока I происходит замыкание токовой цепи. При дальнейшем распространении волны детонации точка соприкосновения внутреннего цилиндра движется по спирали к нагрузке. При этом индуктивность L уменьшается, а ток увеличивается до 10^8 А (рис. 1.50).

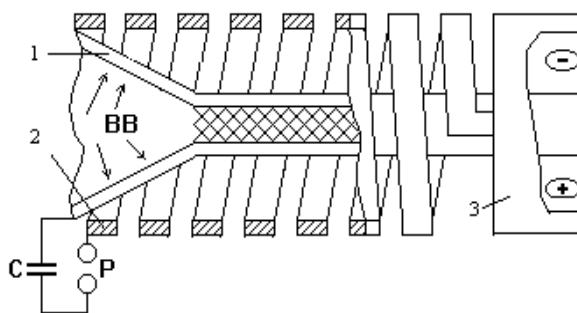


Рис.1.49. Схема взрывомагнитного генератора: 1-стальная трубка; 2- соленоид; 3- нагрузка

Авторами [20] создан источник на основе магнитокумулятивного

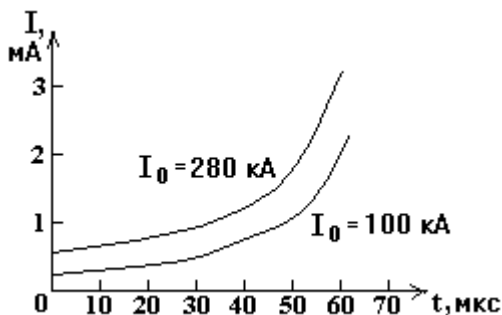


Рис.1.50. Зависимость тока нагрузки от времени взрыва

генератора с трансформаторным выходом ВМГ-160 (магнитокумулятивный источник импульсов с узлом разрыва тока из электрически взрывааемых проводников), позволяющий формировать мощные (>100 ГВт) импульсы со временем нарастания тока ~ 1 мкс на нагрузке ~ 10 Ом. Начальное магнитное поле

в магнитокумулятивных генераторах создается с помощью конденсаторной батареи, заряжаемой до напряжения 20 кВ. Коммутация энергии в заданный момент времени осуществляется с помощью четырех вакуумных разрядников, соединенных параллельно.

Конструктивно (рис. 1.51) генератор выполнен из двух основных элементов: статора и центральной металлической трубы (арматуры). Статор генератора состоит из многосекционного соленоида 2 с внутренним диаметром ~ 160 мм и длиной 846 мм, а также расширяющейся к выходу генератора медной коаксиальной трубы длиной 360 мм. При этом шаг намотки соленоида увеличивается в сторону этого конусного участка статора, заканчивающегося выходным фланцем, к которому крепится трансформатор. Секции соленоида наматываются медным проводом диаметром 5 мм в полихлорвиниловой изоляции толщиной 0,5 мм. При расширении центральной трубы под действием продуктов детонации ВВ до диаметра 104 мм в начале спирали индуктивность генератора уменьшается с 6,6 до 6 мкГн.

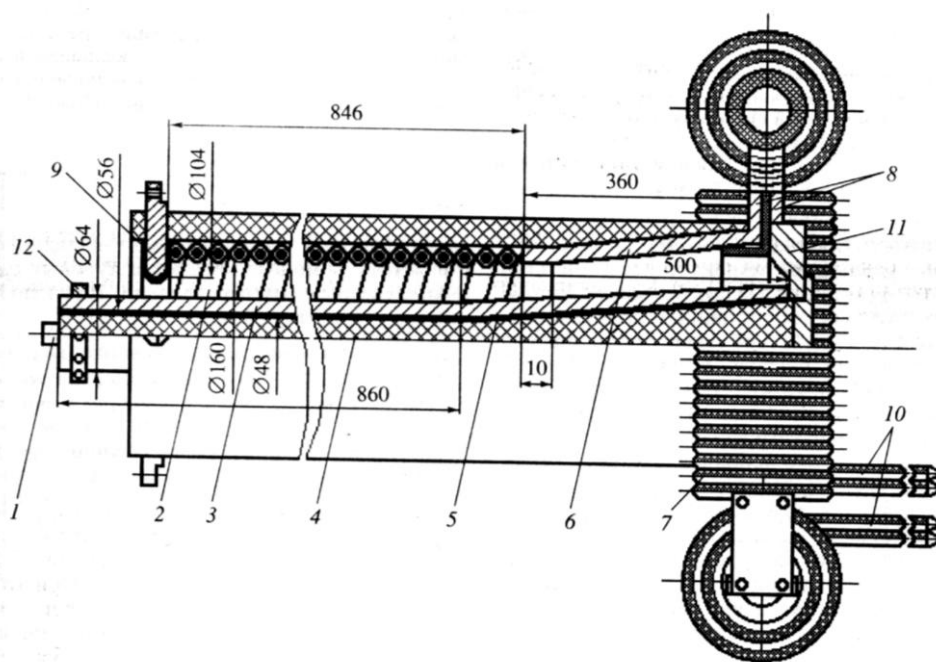


Рис.1.51. Внешний вид генератора: 1–детонатор; 2–соленоид; 3– арматура (металлическая труба); 4– взрывчатое вещество; 5– труба из оргстекла; 6– конусный коаксиальный участок; 7– трансформаторный узел; 8– выходные фланцы; 9– замыкатель; 10– выход трансформаторного узла; 11– конусный фланец; 12– крепежный хомут [20]

Внутри медной трубы дополнительно расположена труба из оргстекла с толщиной стенки 4 мм. Это приводит к выравниванию давления на фронте ударной волны (более однородному профилю) при выходе ее на свободную поверхность арматуры, что позволяет обеспечить более симметричное растяжение трубы. Внутри диэлектрической трубы располагаются два цилиндрических и один конусный заряды ВВ, отлитые из сплава тротил-гексоген (ТГ50/50). Для согласования генератора с высокоимпедансной нагрузкой используется повышающий трансформатор.

Максимальная величина начального тока, созданного конденсаторной батареей в контуре генератора, составила ~ 220 кА. Усредненное значение максимальной величины тока во вторичной цепи трансформаторного узла было 535 кА, а усредненное значение максимальной величины

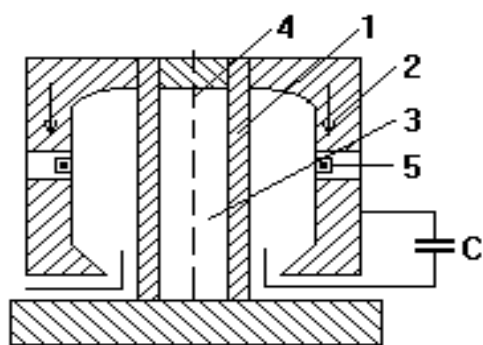


Рис.1.5 2. Схема взрывного генератора: 1 – лайнер; 2 – стальной корпус; 3 – газообразная смесь, $P = 6$ МПа; 4 – ВВ проводник; 5 – датчик

производной данного тока – $1,2 \cdot 10^{10}$ А/с. На нагрузке с активным сопротивлением 13 Ом, получен импульс тока амплитудой 90 кА. При этом напряжение достигало 1,3 МВ, что соответствует максимальной мощности 120 ГВт. Время нарастания тока составляло 100 нс. Помимо твердых ВВ во взрывных генераторах могут применяться и газообразные взрывчатые смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$. Они обладают меньшей разрушительной силой, т.к. при взрыве развивается меньшее давление, чем в твердых

ВВ (рис. 1.42). Коммутация осуществляется самим лайнером, который на начальной стадии расширения входит в соприкосновение с 12 радиальными контактами, соединенными с накопителем. Положение контактов выбирается таким, чтобы в момент замыкания всего коаксиала на коротко движущимся лайнером ток разряда был максимальным.

Реализованный коаксиальный генератор имеет следующие характеристики: химическая энергия 925 кДж, $I_0 = 0,8$ МА; начальная магнитная энергия 10 кДж; максимальный ток 4,75 МА; максимальная энергия 30 кДж. Магнитное поле измеряется датчиком 5 [5]. Основным недостатком этого генератора состоит в том, что лайнер выбирается толстостенным, чтобы выдержать начальное давление ВВ, и поэтому перемещается недостаточно быстро. В результате велики потери вследствие

диффузии магнитного поля в проводники за время перемещения лайнера.

Взрывные МГД - генераторы. Для решения проблем современной физики и техники необходимо, чтобы электрический ток поступал в нагрузку в виде серии импульсов. В связи с этим в последние годы большое внимание уделяется взрывным МГД-генераторам (МГДВ), использующим в качестве электропроводного рабочего газа плазму, образующуюся за фронтом сильной ударной волны, создаваемой при расширении продуктов детонации ВВ. МГД - генераторы с газообразным рабочим телом имеют ряд преимуществ. Они обладают высокой плотностью энергии и, следовательно, могут обеспечить необходимую энергию в указанном диапазоне в значительно меньшем объеме, чем любая конкурирующая система. Взрывные МГД-системы обладают малой массой на единицу выходной мощности, высокой надежностью, готовностью к быстрому старту. Схема линейного взрывного МГД-генератора изображена на рисунке (1.43).

Генератор состоит из заряда ВВ-источника высокоскоростного потока ионизированного газа (плазмы), МГД- канала, через который течет

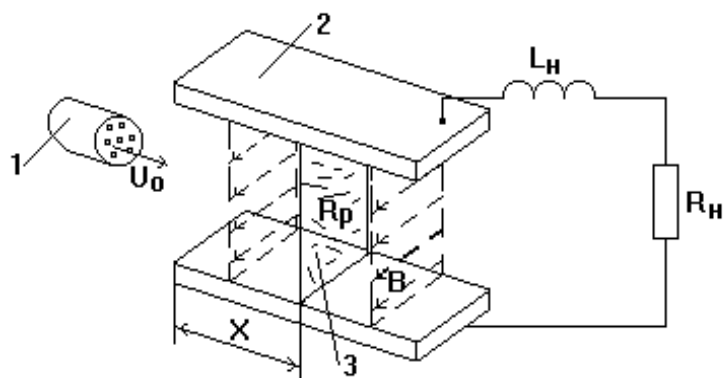


Рис.1.43. Схема взрывного МГД – генератора: 1 – заряд ВВ; 2 – электроды; 3 – сгусток плазмы [21]

ионизированный газ, устройства, создающего магнитное поле B , индуктивно - омической нагрузки L_H и R_H . При движении газа между электродами индуцируется э.д.с. и в цепи начинает протекать электрический ток. Вследствие действия пондеромоторных сил плазма тормозится,

при этом часть ее кинетической энергии преобразуется в электромагнитную. Максимальные энергетические характеристики генератора: ток 920 кА, мощность $\sim 6 \cdot 10^8$ Вт, энергия 37 кДж ($w_0 = 21$ кДж). КПД преобразования энергии ВВ в электрическую около 5% [21].

1.4 Ударные генераторы

Ударные генераторы – это электрические машины, работающие в импульсном режиме. Наряду с установками для научных исследований

(устройствами для получения сверхсильных магнитных полей, ускорителями заряженных частиц, устройствами для исследования плазмы и питания индуктивных катушек термоядерных установок) импульсная энергетика находит применение для испытания высоковольтной коммутирующей аппаратуры, в технике и технологии промышленного производства и др. Для многих потребителей генераторы ударной мощности оказываются самыми целесообразными источниками энергии, т.к. накопление энергии во вращающихся маховых массах является наиболее эффективным и экономичным. В современном турбогенераторе с номинальной мощностью 100 МВт при частоте вращения 3000 об/мин кинетическая энергия, запасаемая в роторе, достигает значений $2 \cdot 10^8$ Дж [22]. Если нагрузке передается 10÷20 % запасаемой ротором кинетической энергии, то и тогда энергия, полученная нагрузкой, может достигать 100 МДж и более. Накопление энергии в маховых массах производится при сравнительно небольшой мощности приводного двигателя. Так, ударный генератор, имеющий в импульсе мощность около 10^6 кВт·А, разгоняется двигателем мощностью около 10^3 кВт. Затем включается возбуждение генератора, и к нагрузке поступает электрическая энергия, вырабатываемая при торможении ротора электродинамическими силами. Для повторения цикла нужно вновь довести скорость вращения до требуемой, т.к. за время импульса ротор несколько затормаживается. Накапливаемые энергии в ударных генераторах приближаются к 10^9 Дж, максимальные токи достигают нескольких сотен килоампер при длительности ($10^{-1} \div 1$)с.

Наибольшее распространение получили ударные генераторы для испытания выключателей высокого напряжения на способность отключать токи короткого замыкания в сети. Обычно генераторы имеют напряжение 10 – 20 кВ, а для повышения напряжения до 220 кВ используются трансформаторы.

Для питания крупных электрофизических установок используются агрегаты переменного тока, которые могут иметь горизонтальный или вертикальный вал [22]. На рисунке (1.44) приведена схема агрегата, со-

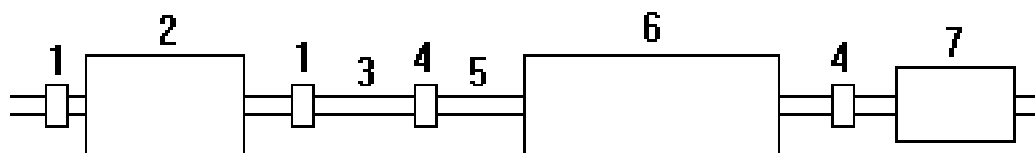


Рис. 1.44. Блок-схема агрегата объединения «Электросила»:

1 – подшипник; 2 – статор; 3 – ротор генератора; 4 – подшипник;
5 – вал; 6 – кожух маховика; 7 – асинхронный двигатель

стоящего из трехфазного генератора переменного тока, маховика и разгонного асинхронного электродвигателя.

Генератор выполнен в виде синхронного двухполюсного двигателя турбогенератора с цельнокованным ротором с косвенным воздушным охлаждением обмоток ротора и статора. Ротор опирается на два радиальных подшипника с принудительной масляной смазкой. Ротор генератора имеет достаточно большой диаметр и запасает энергию около $0,1 \cdot 10^9$ Дж при номинальной частоте вращения 3000 об/мин. Удельная его энергоемкость 5 Дж/г.

Маховик выполнен в виде цельнокованого цилиндра из стальной поковки с высокими механическими свойствами, он сопрягается непосредственно с ротором через полумуфты. Запасаемая энергия его при номинальной частоте вращения $0,8 \cdot 10^9$ Дж, а удельная энергоемкость 10 Дж/г. С другой стороны маховика размещен разгонный асинхронный двигатель номинальной мощностью 4 МВт.

Агрегат имеет следующие технические характеристики: пиковая мощность – 242 МВ·А, номинальное напряжение 10,5 кВ, длительность импульса – 5 с [22]. Повышение энергоемкости единичного маховика в диапазоне $5 \cdot 10^9$ Дж – 10^{10} Дж связано с вертикальным исполнением конструкции и использованием неметаллических маховиков.

Механические накопители с генератором постоянного тока получили название униполярных. Перспективной областью применения таких генераторов является техника получения сильных магнитных полей. Наиболее крупный из существующих униполярных генераторов построен для питания обмотка возбуждения протонного синхротрона на 10 ГЭВ (Австралия). Ротор генератора состоит из четырех дисков диаметром 3,55 м и массой 20 т каждый. Диски изолированы от вала и соединены последовательно, что позволяет получить результирующее напряжение 720 В. Накапливаемая дисками кинетическая энергия составляет 600 МДж, ток в импульсе при замыкании генератора на обмотку электромагнита синхротрона равен $1,7 \cdot 10^6$ А. Для коммутации были использованы медные щетки площадью $S = 10^{-4}$ м² каждая. На наружной стороне каждого диска было установлено по 863 щетки и на внутренней – по 576 щеток. Масса машины 1500 т.

Импульсные униполярные генераторы большой мощности могут обеспечить высокую удельную энергию около $97,5 \cdot 10^6$ Дж/м³. Однако низкое напряжение и сложность токосъема ограничивают их применение.

Контрольные вопросы

1. Где используются генераторы импульсных токов на основе индуктивных накопителей энергии?
2. Какие требования предъявляются к коммутаторам - размыкателям, используемым в индуктивных накопителях энергии?
3. Каков принцип работы размыкателя, синхронизированного с паузой тока?
4. Объясните схему гашения разряда противотоком.
5. Какие типы размыкателей имеют максимальные значения I и dR/dt ?
6. Каковы основные характеристики размыкателей, основанных на использовании электрического взрыва проводников?
7. В чем заключается преимущество плазменных прерывателей тока?
8. Назовите проблему вывода энергии от индуктивного накопителя в индуктивную нагрузку.
9. Где находят применение взрывные генераторы?
10. Объяснить принцип работы взрывомагнитного генератора.
11. Какие предельные параметры можно достичь во взрывомагнитных генераторах?
12. Какие максимальные энергетические характеристики можно достичь с помощью взрывных МГД-генераторов?
13. Где используются ударные генераторы?
14. Где накапливается энергия в ударных и униполярных генераторах?

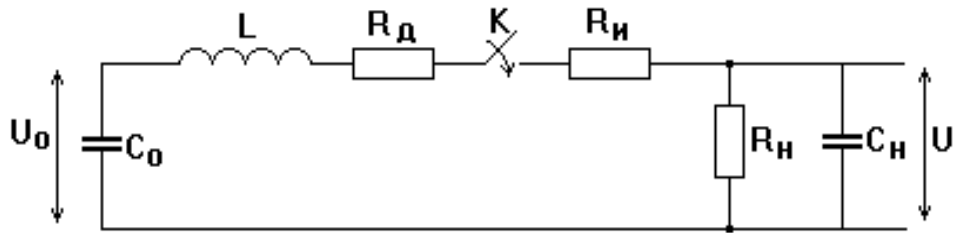


Рис.1.46. Разрядная схема ГИН

Если считать, что искровые промежутки в разрядниках пробиваются в условиях, близких к статическому режиму, то для одного разрядника сопротивление канала искры можно определить по формуле Ромпе и Вайцеля

$$R_e^2(t) = \frac{p \cdot d^2}{2a \int_0^t i^2 dt}, \quad (1.89)$$

где p – давление газа, ат; d – длина промежутка, см; i – ток, А;
 a – константа, характеризующая газ.

Для воздуха и азота $a \approx (0,8 \div 1)$ ат·см²/ В²·с [24]. При неизменном пробивном напряжении промежутка $pd = \text{const}$ (закон Пашена). Поэтому с ростом давления газа $R_{и}$ уменьшается. При определении амплитуды и длительности импульса обязательно надо учитывать $R_{и}$. Если не учитывать влияние L , $C_{н}$ и $R_{д}$ на параметры импульса, то с учетом сопротивления искры амплитуда импульса имеет вид:

$$U = U_0 \left(1 - \frac{1}{\sqrt[3]{1+2B}} \right)^{3/2} \cdot \sqrt{\frac{1+2B}{2B}}, \quad (1.90)$$

где $\hat{A} = \frac{R_i \cdot \tilde{N}_0}{\theta}$, $\theta = \frac{2p \cdot d^2}{a \cdot U_0^2}$.

Для $B \leq 20$ $t_{и} = 2,2 \cdot \theta + 1,3 \cdot R_{н} \cdot C_0$.
(2.3)

При $B \geq 5$ $t_{\phi} \approx \frac{128}{27} \cdot \theta \cdot \frac{(1 - (2B)^{-1/3} \cdot j^{3/2})}{1 - \varphi(A)}$, (1.91)

где $\hat{A} = L/\theta \cdot R_i$, L – индуктивность разрядного контура.

Из формул (1.89-1.91) следует, что длительность импульса $t_{и}$, амплитуда импульса U и длительность фронта импульса $t_{ф}$ зависят не только от параметров R, L, C разрядного контура, но и от величины θ – постоянной времени искры. Чем меньше θ , тем больше амплитуда импульсов, меньше фронт и длительность. При неизменном напряжении $U_0 \sim pd$ величина $\theta \sim p^{-1}$. Следовательно, чем больше давление газов p , тем меньше величина θ .

В воздухе при атмосферном давлении и $d = 1$ см, $\theta = 2$, а длительность фронта импульса даже при отсутствии индуктивности ($L = 0$) не может быть меньше 10 нс. Следовательно, для получения импульсов с фронтом < 10 нс необходимо помещать разрядники в атмосферу сжатого газа. При высоком давлении газа θ очень мала, разрядник можно считать идеальным ключом. Фронт импульса будет определяться только паразитными параметрами разрядного контура L и $C_{н}$. Если пренебречь влиянием емкости $C_{н}$, то длительность фронта импульса между уровнями 0,1 - 0,9 амплитуды составит $t_{ф} = 2,2 L/R_{н}$. Если $R_{н} \gg 2\sqrt{\frac{L}{C_{н}}}$,

то $t_{и} = 0,7 R_{н} \cdot C_{о}$. Для получения фронта импульса $t_{ф} = 10^{-9}$ с необходимо, чтобы $L < R_{н} \cdot 10^{-9}$ Гн. При $R_{н} = 100$ Ом индуктивность разрядного контура должна быть $L < 10^{-7}$ Гн. Следовательно, для снижения длительности фронта необходимо уменьшать индуктивность разрядного

контура путем уменьшения габаритов конструкции генератора, которые определяются электрической прочностью среды. Для увеличения электрической прочности генератор помещают в атмосферу сжатого газа, что уменьшает θ и L одновременно.

Скорость вывода энергии из первичного накопителя определяется его индуктивностью, которая в значительной степени зависит от конструкции обратного токопровода. Обычно в качестве обратного токопровода генератора Аркадьева - Маркса используются стенки бака, в котором он размещен [7]. При этом, в связи с тем, что в схеме Аркадьева

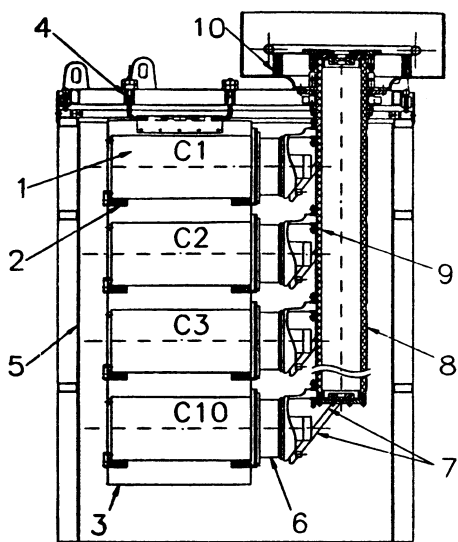


Рис.1.47. Генератор Аркадьева-Маркса с токопроводом в виде коаксиальной линии [30]

- Маркса высшие ступени должны быть изолированы на полное выход-

ное напряжение, стенки бака располагаются достаточно далеко от токоведущих частей, что приводит к возрастанию индуктивности и падению мощности генератора. В работе [30] предложено решение проблемы уменьшения индуктивности генератора Аркадьева - Маркса путем выполнения обратного токопровода в виде отрезков коаксиальной линии с твердой изоляцией. Конденсаторы 1 уложены на диэлектрические бруски 2, которые крепятся к вертикальным диэлектрическим плитам 3. Эти плиты висят на подвесах 4, вмонтированных в крышку бака 5. Каждый конденсатор снабжен разрядником 6, который с помощью коробчатых шин 7 соединяется с внешним электродом 8 коаксиальной линии. Внутренний электрод этой линии 9 подключен с одной стороны к нагрузке 10, а с другой – к выходному электроду разрядника последней ступени. Межэлектродный зазор коаксиала изолирован с помощью твердой изоляции (полиэтилена). Внутренний объем бака заполняется трансформаторным маслом. При такой компоновке емкостная связь, необходимая для возникновения перенапряжения на разрядниках в ходе переходного процесса, обеспечивается межэлектродной емкостью отрезков коаксиала.

Индуктивность разработанного генератора складывается из индуктивности накопительных конденсаторов (~ 100 нГн), коаксиальных разрядников (~ 85 нГн), коробчатых шин (~ 200 нГн), коаксиального токопровода (~ 210 нГн) и выходного узла (~ 60 нГн). Эти элементы сконструированы исходя из требований минимальной индуктивности и достаточной электрической прочности [30].

Для уменьшения времени срабатывания ГИН в разрядные промежутки вводятся поджигающие электроды, дополнительное ультрафиолетовое облучение. В РИЦ «Курчатовский институт» разработано и создано несколько частотных ускорителей. Особенности основных элементов источника питания ускорителей можно рассмотреть на примере ускорителя РС-20, схема одного из параллельных модулей ГИН которого приведена на рисунке 1.48 [10].

ГИН ускорителя состоит из 4 модулей по 20 каскадов в каждом. Напряжение на выходе ГИН $U_{\text{ВЫХ}} = 1$ МВ. Модули ГИН расположены вокруг изолятора, и совместно с высоковольтным тоководом составляют квазикоаксиальную линию, соединяющую ГИН с размыкателем. Это позволяет при минимальной индуктивности соединения около половины индуктивности поместить в вакуумный объем и, следовательно, снизить напряжение на изоляторе, поскольку именно индуктивность контура определяет ускоряющее напряжение. Изолятор набран из полиэтиленовых колец, высота каждого равна высоте одного каскада ГИН и составляет 10 см. Используются частотные конденсаторы ИМК-50-0,2 с

параметрами: $U = 50$ кВ; $C = 0,2$ мкФ; $L = 150$ нГн; $f = 10$ Гц. Схема одного модуля приведена на рисунке 1.48. Конденсаторы каждого модуля образуют две колонки,

между которыми расположены разрядники 1. Для снижения индуктивности каждый конденсатор коммутируется отдельным разрядником. Нижний разрядник – управляемый, тригatronного типа, остальные – трехэлектродные с искажением поля. Разрядники модуля размещены в общей диэлектрической трубе, продуваемой воздухом. Соединение промежуточных электродов разрядников резисторами и их взаимоподсветка расширяют диапазон рабочих напряжений от 25 до 50 кВ. Кроме того, промежуточные электроды разрядников соответствующих каскадов соседних модулей ГИН связаны между собой и с градиентными кольцами изолятора. Это позволяет синхронизировать работу модулей. Если один из модулей срабатывает быстрее остальных, напряжение с его каскадов автоматически подается на промежуточные электроды «отстающих» разрядников соседних каскадов и ускоряют их пробой. Разброс срабатывания всех четырех модулей не превышает 50 нс.

Для зарядки конденсаторов ГИН от источника постоянного тока используются зарядные индуктивности 2 (рис. 1.48), индуктивно связанные между собой в каждом каскаде. При зарядке магнитные потоки этих спиралей вычитаются, а при разрядке – суммируются. Индуктивность ГИН при зарядке составляет $\sim 7 \cdot 10^{-5}$ Гн, при разрядке $\sim 10^{-3}$ Гн.

В мощных генераторах высоковольтных (свыше 100 кВ) импульсов напряжения наносекундного диапазона, как правило, используют разрядники на сжатых газах. Размещают такие генераторы в герметичных газонаполненных – или маслonaполненных корпусах. Пуск многокас-

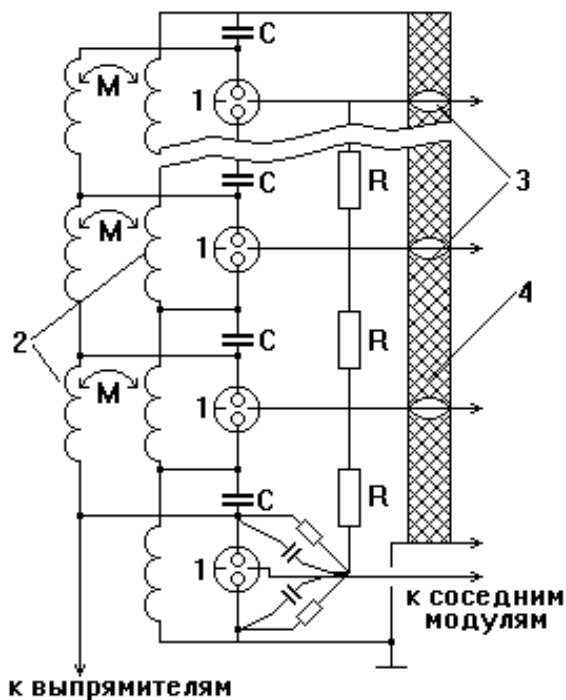


Рис. 1.48. Схема одного из параллельных модулей ГИН: 1 – разрядники; 2 – зарядные катушки; 3 – градиентные кольца; 4 – изолятор; R – резисторы связи C – конденсаторы; [10]

кадных ГИН осуществляют внешним иницированием значительного числа каскадов, что усложняет схему и конструкцию генератора.

При значительном увеличении числа каскадов величина U_n начальных каскадов мало отличается от $U_{зар}$. Недостаточное поле в разрядниках этих каскадов ведет к увеличению времени запаздывания пробоя. В свою очередь это приводит к сужению диапазона устойчивой работы ГИН по $U_{зар}$ и увеличению времени статистического разброса между пусковым и выходным импульсами. Таким образом, в ГИН наносекундного диапазона желательно иметь значительное перенапряжение на разрядниках и иницировать разрядники в момент максимума перенапряжения.

Необходимое перенапряжение на разрядниках можно обеспечить дополнительными резистивными и емкостными связями, при этом использование первых позволяет существенно увеличить длительность и кратность перенапряжения.

В работе [32] описан 14-ти каскадный генератор Аркадьева-Маркса на воздушных разрядниках, в котором высокое перенапряжение на разрядниках обеспечивается последовательным включением «земляных» зарядных сопротивлений через три каскада. Пуск ГИН осуществляется внешним иницированием разрядников первых двух каскадов, а разрядники остальных каскадов иницируются автоматически за счет резистивных связей электродов поджига с предыдущими каскадами. Диапазон рабочих разрядных напряжений $U_{зар} = 9 \div 18$ кВ; выходное напряжение ГИН на нагрузке 225 Ом – до 250 кВ; время нарастания тока

≈ 10 нс; ударная емкость 400 пФ при энергозапасе до 12 Дж; габаритные размеры 20×12×29 см. Генератор предназначен для работы в воздухе при атмосферном давлении.

Принципиальная электрическая схема ГИН представлена на рисунке (1.49). «Земляные» зарядные сопротивления R_0 включены в четыре параллельные

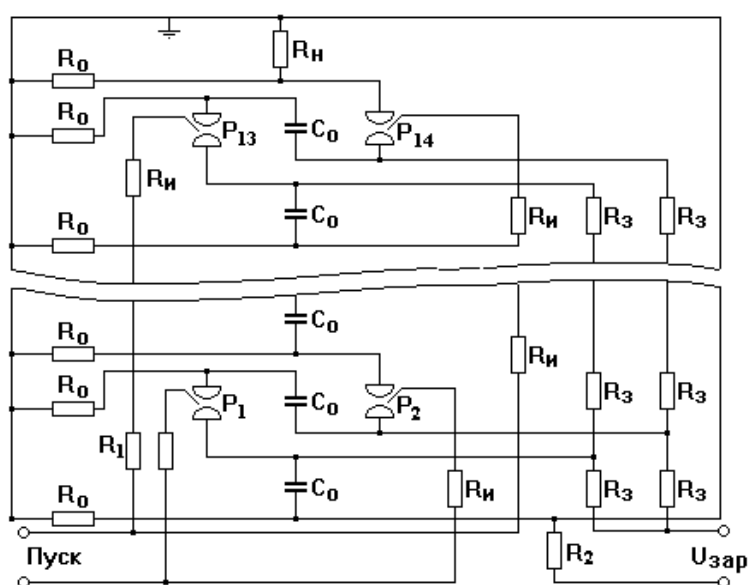


Рис. 1.49. Принципиальная электрическая схема генератора импульсных напряжений [32]

ветви. При коммутации разрядника P_1 напряжение на разряднике P_2 стремится к значению $2U_{зар}$, на разряднике P_3 (после срабатывания P_1 и P_2) к $3U_{зар}$, для разрядников последующих каскадов оно составляет $4U_{зар}$. Это позволяет при внешнем запуске тригatronных разрядников двух разрядников двух первых каскадов выполнить условие $U_{п} \geq 2 U_{ст}$ при $U_{зар} \geq 2/3 U_{ст}$ ($U_{ст}$ – статическое пробивное напряжение разрядников) независимо от числа каскадов и обеспечить устойчивую работу ГИН. Следует отметить, что при этом отпадает необходимость в точной подгонке межэлектродных зазоров разрядников. Разрядники ГИН инициируются до достижения на них максимума перенапряжения. При этом импульс напряжения через сопротивление $R_{и}$ после пробоя разрядника n – го каскада поступает на инициирующий электрод $(n + 2)$ – го каскада. Ток инициирования $I_{и} \approx 2U_{зар} / R_{и}$.

Номиналы резисторов «земляной» цепи R_0 выбраны из условия поддержания тока в разряднике $I_p = U_p / R_0$ в интервале 1 – 10 А. Резисторы R_0 двух последних каскадов подключены напрямую к «земляной» шине. Это позволило отсечь проникновение по «земляным» цепям предымпульса напряжения в нагрузку.

Резисторы зарядных цепей R_3 разнесены в две колонны из конструктивных соображений. Развязку цепей пуска и зарядки от «земляного» контура ГИН на момент срабатывания обеспечивают резисторы R_1 и R_2 . Конструктивной особенностью ГИН является взаимное расположение шин соседних каскадов и разрядников, при котором шины соседних каскадов имеют одинаковые статические потенциалы и образуют значительную межкаскадную емкость (~ 100 пФ).

Генератор собирается из предварительно изготовленных секций, в состав которых входят конденсаторы и припаянные к ним короткими гибкими проводниками шины с электродами разрядников. Такая компоновка каскадов существенно снижает индуктивность ГИН за счет уменьшения его объема и приближения наиболее индуктивной части контура разрядников к обратным токопроводам [32].

Системы параллельно или синхронно включаемых одинаковых генераторов высоковольтных импульсов (ГИН), умножающих напряжение по методу Аркадьева-Маркса, используются в мощных электрофизических установках [12]. При создании комплексов ГИН предварительно тщательно отрабатывают электрическую схему и конструкцию одиночного ГИН, испытывают его в номинальном и более жестких режимах для получения заданных характеристик. Сборку и наладку последующих ГИН и общего комплекса проводят на основе экспериментально проверенных однотипных конструкций, технологических и мет-

рологических приемов. Это упрощает ввод комплекса в действие и его эксплуатацию.

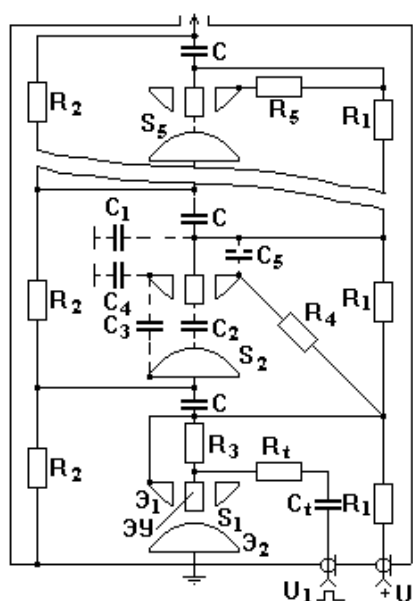


Рис.1.50. Принципиальная схема генератора импульсных напряжений

рядной цепи через резисторы R_4 , R_5 .

Кроме того, основной электрод \mathcal{E}_1 каждого коммутатора и размещенный соосно в его отверстии управляющий стержневой электрод $\mathcal{E}\mathcal{U}$ находятся при зарядке постоянным напряжением U под положительным потенциалом относительно второго основного электрода \mathcal{E}_2 . Работает ГИН следующим образом: пусть обеспечиваются обычно выполняемые в подобных ГИН условия: $R_1 C \gg t_{\Gamma}$, $R_2 C \gg t_{\Gamma}$, $C \gg C_1 \geq C_2$, где t_{Γ} – суммарный интервал времени задержки последовательного срабатывания всех разрядников каскадов и требуемой длительности импульса выходного напряжения ГИН на нагрузке. Кроме того, пусть выполняются неравенства [33]: $C_3 \geq C_4 > C_5$, $C_1 R_1 \gg t_{\Pi}$, $C R_4 \gg t_{\Gamma}$, $C_4 R_4 \ll t_{\Pi}$, где t_{Π} – задержка времени пробоя разрядника в рассматриваемом каскаде относительно момента срабатывания разрядника в предыдущем каскаде. После подачи через цепь $C_t R_t$ напряжения U_t на S_1 и его пробоя потенциал электрода \mathcal{E}_1 в S_2 быстро снижается с $+U$ до нуля из-за разряда емкости C_4 через R_4 и S_1 .

В результате этого импульсная разность потенциалов между $\mathcal{E}\mathcal{U}$ и \mathcal{E}_1 может достичь значения U , а между $\mathcal{E}\mathcal{U}$ и \mathcal{E} – $1,7 U$. Такие разности напряжений резко возмущают распределение поля между всеми электродами в S_2 . Поскольку потенциал $\mathcal{E}\mathcal{U}$ положителен относительно обоих электродов \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , то S_2 быстро срабатывает. Затем аналогичные про-

Электрическая схема ГИН (рис. 1.50) [33] содержит 5 каскадов (ступеней) умножения напряжения U по методу Аркадьева-Маркса. Разрядники $S_1 - S_5$ – газонаполненные тригатроны, управляемые возмущением электрического поля. $C_1 - C_5$ – емкости рассеяния электродов разрядника (изображены только для S_2) и присоединенных к ним участков контура. Особенностью данной схемы является создание указанными емкостями рассеяния условий быстрого срабатывания разрядников $S_2 - S_5$ во время переходных процессов. Для этого электроды \mathcal{E}_1 тригатронов присоединены к за-

цессы будут происходить в тригатроне S_3 , но задержка его пробоя будет короче, чем задержка пробоя S_2 , так как импульсная разность потенциалов между его электродами ЭУ и Э₂ может составить $2,4U$. Если общие условия и выше приведенные неравенства, а также дополнительно $C_5R_5 \gg t_n$ выполняются и в тригатронах S_4, S_5 , то они тоже быстро поочередно включаются, тем более, что напряжения между ЭУ и Э₂ в них могут составить до $3,1U$ и $3,8U$ соответственно [33].

Геометрические размеры разрядников в каскадах, их электропроводность, нагрузочные, пусковые и ресурсные характеристики определяют в значительной мере подобные характеристики одиночного ГИН и комплекса в целом.

Разрядная камера тригатрона заполняется смесью 40 % SF₆ + 60 % N₂ под давлением 1 МПа. Два экземпляра тригатрона были испытаны при $U = 100$ кВ, коммутируемой энергии 2,5 кДж (при номинале 1,25 кДж), амплитуде разрядного тока 60 кА, запасе электропрочности $K = 100$ %, амплитуде 50 кВ с фронтом 13 нс и включением через каждые 30 – 60 с. Измерения показали, что у обоих разрядников в сериях до 10^4 запусков средняя задержка времени срабатывания 25 нс практически не изменилась, а максимальный ее разброс в диапазоне до $5 \cdot 10^3$ включений не превысил ± 5 нс, а по завершении испытаний ± 8 нс.

Высоковольтный контур ГИН смонтирован в стальном заземленном герметичном баке с изоляцией контура от бака трансформаторным маслом. Габаритные размеры бака – $1,33 \times 0,73 \times 0,75$ м. Бак является обратным сильноточным низкоиндуктивным токопроводом разрядной цепи. Он служит экраном от рассеяния электромагнитных полей в окружающее пространство при срабатывании тригатронов. Бак предохраняет персонал от поражения электрическим током и позволяет перемещать собранный ГИН грузоподъемным механизмом.

Принципиально новым способом получения импульсов с крутым фронтом практически от любой схемы умножения является импульсная зарядка малоиндуктивного накопительного элемента [7]. Из ранее приведенного анализа разрядного контура схемы Маркса следует, что параметры импульса даже при высоком давлении газа в разряднике определяются индуктивностью разрядного контура и емкостью нагрузки. Для устранения влияния этих факторов на фронт импульса необходимо включить между высоковольтным электродом отсекающего разрядника ГИН и землей безиндуктивный конденсатор емкостью C_K (рис. 1.51). Работа схемы основана на импульсной зарядке емкости C_K с последующим разрядом ее через промежуток P_2 на нагрузку R_H .

Пусть накопительный элемент C_K заряжается достаточно долго так, чтобы после пробоя всех разрядников ГИН процесс коммутации в них

практически закончился. При быстром пробое отсекающего промежутка P_2 и при малой L_2 по сравнению с L_1 импульс на нагрузке R_H будет определяться вначале в основном параметрами L_2 , C_K , R_H и сопротивлением искры промежутка P_2 , а затем уже параметрами разрядного контура ГИН. Схема замещения приведена на рисунке 1.51(б). Включение K_1

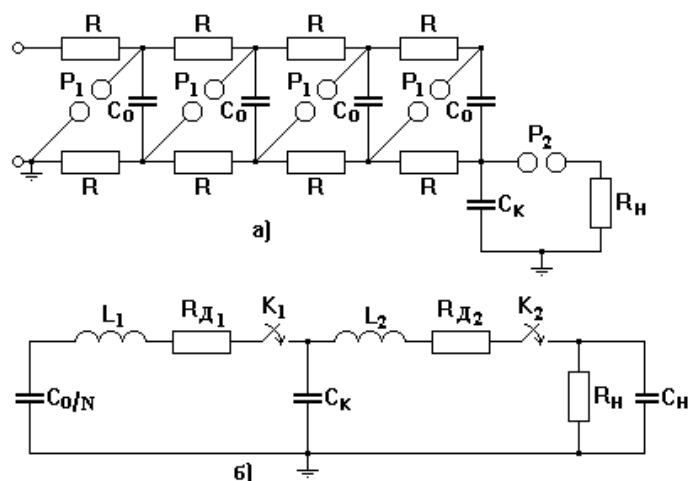


Рис. 1.51. Принципиальная схема ГИН (а) и разрядная схема (б)

и K_2 соответствует пробое промежутков P_1 и P_2 . Сопротивление $R_{Д1}$ равно сумме остаточного сопротивления разрядников P_1 , сопротивления ГИН, демпферного сопротивления. Основной недостаток схемы – малый КПД использования энергии ГИН в C_K и нагрузке. Для повышения КПД следует увеличить $C_K / (C_0/N)$, однако при этом напряжение на нагрузке будет падать. Анализ схемы разряда ГИН на C_K показывает, что при $C_K / (C_0/N) \rightarrow 1$, КПД $\rightarrow 1$, хотя выигрыш по напряжению пропадает.

После замыкания ключа K_2 при условии, что $R_H \cdot C_K \gg t_3 = \pi / \omega_2$, где $\omega_2 = \sqrt{2 / \sqrt{L_1 C_2}}$,

$R_{P1} \approx 0$ практически вся энергия, запасенная в C_K , выделяется на нагрузку R_H . Оптимальное значение $L_1 \approx 5R_H t_{и}$. Этот режим работы ГИН называется импульсной зарядкой накопительного элемента, и получил широкое распространение в мировой практике. На ри-

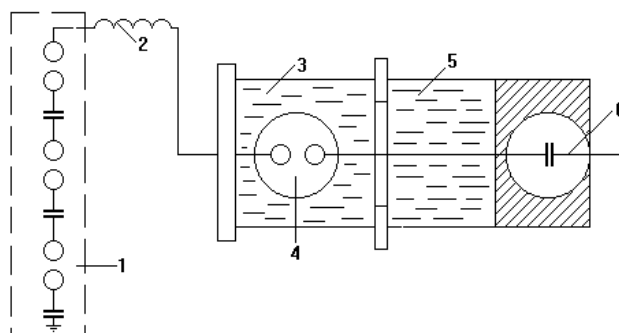


Рис. 1.52. Схема ГИН с накопительным конденсатором: 1 – $C_{ГИН} = 12,5$ нФ, $U_{ГИН} = 150$ кВ; 2 – дополнительная индуктивность; 3 – малоиндуктивный конденсатор $C_K = 1$ нФ; 4 – разрядная камера под давлением $P = 1,6$ МПа (азот); 5 – передающая глицериновая линия; 6 – срезающий разрядник

сунке 1.52 приведена схема ГИН с импульсной зарядкой C_K . На разомкнутом конце напряжение удваивается и амплитудное значение $U_{\text{вых}} \sim 500$ кВ, фронт импульса $\tau_{\text{ф}} = 1,5$ нс.

Для получения импульсов тераваттной мощности в качестве малоиндуктивных накопителей энергии используются линии с водяным диэлектриком при многокаскадном обострении импульса в водяных разрядниках.

Для генераторов мощностью ~ 10 ГВт емкость малоиндуктивного накопителя составляет 0,1 нФ, а обостритель работает в трансформаторном масле.

2.2 LC – генераторы Фитча

LC – генератор описан Фитчем в [28]. Принципиальная его схема приведена на рисунке 1.53. В исходном состоянии емкости C заряжены от источника постоянного напряжения. В момент времени $t = 0$ четные емкости при замыкании ключей начинают разряжаться через индуктивности L . Через время $t = \pi\sqrt{LC}$ напряжение на них меняет знак, и на выходе генератора получается напряжение $U_{\text{вых}} = N \cdot U_0$, где N – число каскадов. При отсутствии нагрузки напряжение на выходе изменяется по закону [7]

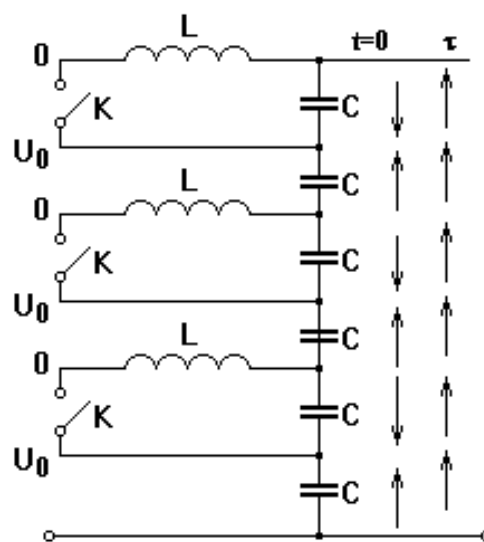


Рис.1.53. Схема LC-генератора

$$U_{\text{вых}}(t) = N \cdot U_0 (1 - e^{-\alpha t} \cdot \cos \omega t) \quad (1.91)$$

где $\omega^2 = 1/LC$; $\alpha = R/2L$; R – сопротивление LC - контура, Ом.

Из формулы (1.91) видно, что напряжение определяется специально включенной индуктивностью L . Если уменьшить L , то уменьшится напряжение на выходе из-за увеличения α .

Эта схема имеет ряд преимуществ по сравнению с ГИН: вдвое уменьшается количество разрядников, но увеличивается точность их включения; сопротивление разрядников, их индуктивность не влияют на выходной импеданс схемы, если

LC-генератор включить на нагрузку через дополнительный быстродействующий коммутатор.

Можно выполнить схему с автоматическим запуском неуправляемых коммутаторов (рис. 1.54) [29]. Схема работает следующим образом. В исходном состоянии все конденсаторы $C_1 - C_6$ и $C_{01} - C_{03}$ заряжены до U_0 . После включения управляемого коммутатора K_1 на искровой промежутке K_2 возникает удвоенное напряжение. Сначала пробивается промежуток K_2 , затем под тройным напряжением - K_3 . После включения всех коммутаторов $K_1 - K_3$ конденсаторы C_1, C_3, C_5 перезаряжаются через индуктивности $L_1 - L_3$ и вентили $D_1 - D_3$.

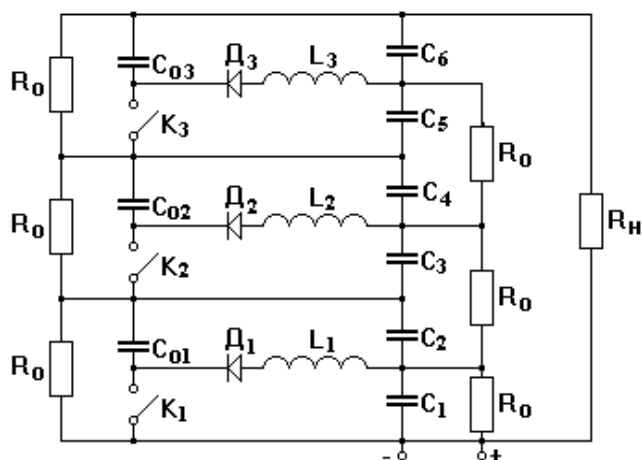


Рис.1.54. Схема LC – генератора с необратимым перезарядом емкостей каскадов и автоматическим запуском коммутаторов

Четные конденсаторы C_2, C_4, C_6 остаются в исходном состоянии. В результате на нагрузке суммируется напряжение конденсаторов $C_1 - C_6$. Время включения искровых промежутков $K_1 - K_3$ определяется параметрами коммутаторов $K_1 - K_3$, емкостей $C_{01} - C_{03}$, паразитными индуктивностями и может быть порядка наносекунд. Это время много меньше времени перезарядки накопительных конденсаторов. Конденсаторы $C_{01} - C_{03}$ дозаряжаются до двойного напряжения, которое прикладывается к вентилям $D_1 - D_3$. Дозарядка продолжается до тех пор, пока полностью не перезарядятся конденсаторы C_1, C_3, C_5 .

2.3 Коммутаторы генераторов импульсных напряжений

Искровые разрядники находят широкое распространение в импульсной технике. Их можно классифицировать по следующим признакам [7]:

- по числу электродов: двух, трех, многоэлектродные;
- по способу запуска: тригatronные, с «искажением» поля, запускаемые лучом лазера, подсветкой ультрафиолетовыми, рентгеновскими лучами, электронным и ионным пучком;
- по пробиваемому диэлектрику: газоразрядные (высокого и

- низкого давления), вакуумные, жидкостные и твердотельные;
- по конфигурации электродов: рельсовые, кольцевые, шаровые, игольчатые и др.;
- по числу каналов: одно, многоканальные;
- по разряду: искровые, с объемным разрядом, поверхностным разрядом.

Двухэлектродные разрядники. Наиболее простым и широко распространенным двухэлектродным газовым коммутатором высокого давления является промежуток между двумя металлическими шарами, заполненный каким-либо газом под давлением 0,1МПа и более.

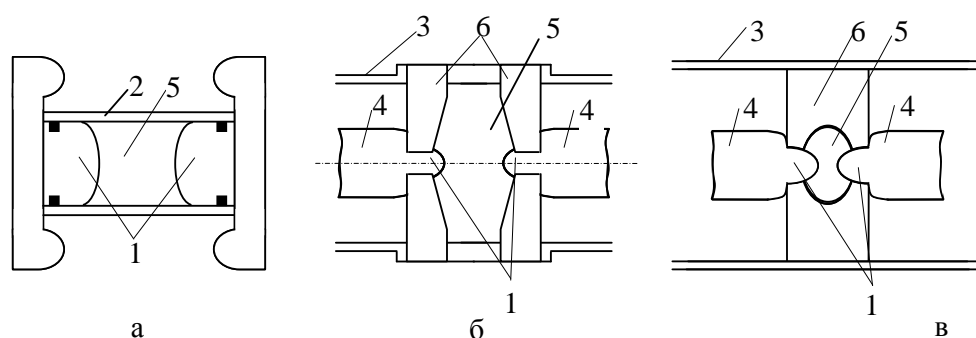


Рис. 1.55. Конструкция двухэлектродных газовых разрядников: 1 – электроды; 2 – корпус; 3 - внешние проводники; 4 – внутренние проводники; 5 – газ под давлением; 6 – изоляторы[7]

Наиболее типичные профили двухэлектродных разрядников приведены на рисунке 1.55. Пробивное напряжение промежутка при импульсном воздействии зависит в общем случае от способа инициирования начальных электронов, интенсивности процесса инициирования, состояния поверхности электродов, их материала, количества проведенных разрядов и других факторов. После того как проводимость искрового канала становится соизмеримой с проводимостью источника напряжения, напряжение на промежутке за короткое время спадает до сотен вольт. Время уменьшения напряжения на промежутке при пробое от $0,9 U_{\text{п}}$ до $(0,1 - 0,2) U_{\text{п}}$ называется временем коммутации искрового промежутка $t_{\text{к}}$. Время коммутации зависит от сорта и плотности газа, импеданса разрядного контура Z и пробивной напряженности $E_{\text{п}} = U_{\text{п}}/d$. Оно возрастает с увеличением d и плотности газа и убывает с повышением пробивной напряженности в большей степени, чем с ростом d , а также оно убывает с увеличением импеданса разрядного контура. На этом основана работа обостряющих промежутков, в которых с умень-

шением фронта подаваемого на них исходного импульса напряжения может быть достигнуто все более высокое напряжение, а следовательно, и $E_{п}$. При пробое с ростом $E_{п}$ уменьшается время коммутации.

Важной характеристикой разрядника является ресурс его работы, т.е. количество включений без его разборки из-за увеличения разброса времени срабатывания, нарушения изоляции продуктами разложения газа или материала электродов или ее старения. Для повышения ресурса работы разрядника нужно уменьшать переносимый за импульс заряд, увеличивать площадь электродов, использовать продувку газом после каждого включения, выбирать смеси газов с нейтральными продуктами разложения, электроды из материалов с повышенным сроком службы (нержавеющую сталь и другие твердые и тугоплавкие материалы) [7].

Трехэлектродные разрядники. В генераторах импульсных напряжений для получения минимального разброса в срабатывании используются управляемые разрядники тригatronного типа (рис. 1.55,а) и разрядники с искажением поля, в которых поджигающий импульс должен иметь крутой фронт и сравнительно большую амплитуду, а также используется усиление поля на катоде, способствующее эмиссии эффективных электронов. Для уменьшения разброса времени срабатывания трехэлектродных разрядников, используемых в многосекционном ГИН мегаджоульного энергозапаса, все разрядники расположены в общем корпусе. При этом достигается их взаимное облучение и стабильность срабатывания на уровне единиц наносекунд. Трехэлектродные разрядники являются наиболее простыми и надежными управляемыми разрядниками, использующиеся в схемах ГИН. Они обеспечивают большое (порядка 10^4) число включений без переборки. В пусковых схемах (первых каскадах ГИН) разброс в срабатывании разрядников может быть значительным. Уменьшение разброса срабатывания пусковых схем ГИН дают тригatronны или разрядники с искажением поля. Преимущества их в том, что они не требуют для своей работы дополнительной подсветки [7].

Многоззорные разрядники. Многоэлектродные разрядники довольно широко применяются в импульсной технике, например, для укорочения длительности импульса, регулируемой задержки мощных наносекундных импульсов, в обострителях фронта импульса. Разработаны многоэлектродные коммутаторы с высокой стабильностью времени запаздывания включения, малой амплитудой пускового импульса, широким диапазоном рабочих напряжений при атмосферном давлении и временем коммутации порядка наносекунд [7, 12,]. Эти характеристики дос-

тигаются использованием большого числа последовательно соединенных искровых промежутков длиной порядка 1 мм, а также существенным увеличением конструктивными методами емкости электродов на землю по сравнению с межэлектродной емкостью. На рисунке 1.56 приведена принципиальная схема многоэлектродного разрядника. Емкости электродов на землю C_3 значительно больше межэлектродных емкостей $C_э$. Исходное равномерное распределение напряжения U_0 накопительной емкости C по промежуткам обеспечивается резистивным делителем. При подаче пускового импульса амплитудой U_{Π} через емкость C_p к среднему электроду $n/2 + 1$ (при общем числе электродов $n+1$) непосредственно к среднему электроду приложится напряжение U'_{Π} , равное

$$U'_{\Pi} \approx U_{\Pi} \frac{C_p}{C_3 + C_p}, \quad (1.92)$$

так как $C_3 \gg C_э$.

Дальнейшее распределение пускового напряжения U'_{Π} по электродам $1 \div n/2$ (рис 1.56) определяется выражением [12]

$$U_{k\Pi} = U'_{\Pi} \frac{shak}{sh \frac{an}{2}}, \quad (1.93)$$

где $a = \sqrt{C_3 / C_{\Pi}}$, k – порядковый номер электрода, n – число зазоров.

Анализ проведен при следующих допущениях:

- 1) постоянная времени зарядки емкости C_3 значительно меньше времени запаздывания пробоя очередного промежутка;
- 2) постоянная времени перезарядки емкостей C_3 через сопротивление R значительно больше общего времени пробоя коммутатора;

Распределение пускового импульса по электродам $n/2 - n$ аналогично (1.56). Несмотря на явные преимущества в управляемости и стабильности времени включения, многоэлектродные разрядники пока не получили широкого распространения. Это связано, по-видимому, с их сравнительно сложной конструкцией – необходимостью тщательной регулировки промежутков малой длины, сложностью использования подсветки, сильным влиянием эрозии электродов на характеристики разрядника и т.д. [7].

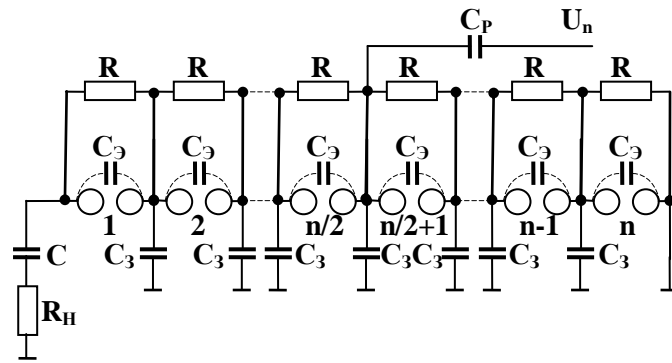


Рис. 1.56. Схема многозазорного разрядника: C – формирующая емкость; R_H – нагрузка; C_3 – межэлектродные емкости; C_3 – емкости электродов на землю; R – делитель напряжения; C_P – разделительная емкость; U_n – пусковой импульс; 1, 2, ..., n – номера промежутков [7]

Газонаполненные металлокерамические разрядники высокого давления.

В ГИН амплитудой $10^5 - 10^6$ В, собранных по схеме Аркадьева-Маркса или на основе трансформатора Тесла, питающих разрядные LC-контуры, двойные формирующие линии и т.д., обычно используются газовые искровые разрядники. Известно, что при токах до 10^4 А время коммутации, в течение которого ток меняется в пределах 10-80% от своей амплитуды, не зависит от величины тока и уменьшается с ростом напряженности поля в зазоре E и давления газа P [65]. Характерное время роста проводимости искры θ определяет изменение ее сопротивления в процессе развития разряда. Для получения времени коммутации искрового зазора 1 нс необходимо иметь давление газа в коммутаторе порядка нескольких МПа [24]. Для уменьшения времени развития разряда и повышения стабильности срабатывания разрядников с промежутком d следует повышать давление газа при фиксированном произведении Pd , увеличивать перенапряжение на промежутке (импульсной зарядкой накопительных устройств), усиливать неоднородность поля на катоде, приводящую к усилению выхода электронов из катода вплоть до автоэмиссии.

Выпускаемые промышленностью разрядники высокого давления серии Р-48, Р-43, Р-49 и др. с металлическим корпусом и конусообразным изолятором, своей вершиной направленным внутрь корпуса (что позволило повышать давление газа внутри разрядников до 4 МПа), широко используются в качестве коммутаторов разрядных RLC-контуров [66].

Попытки использовать промышленные разрядники Р-48 и Р-49 в каскадных ускорителях типа АРСА показали, что, работая в более напряженном режиме (разрядный ток, энергозапас и время нарастания напряжения на электродах в 2 – 3 раза больше, чем в аппаратах МИРА), они не обеспечивали надежное последовательное срабатывание каскадов генератора Маркса из-за большого разброса пробивных напряжений их искровых зазоров. Быстрое загрязнение изоляторов сокращало ресурс работы разрядников Р-48 и Р-49.

Для уменьшения разброса пробивных напряжений и увеличения ресурса работы этих разрядников была проведена их модернизация, заключающаяся в очистке поверхности изолятора от загрязнений с помощью химического травления и замене рабочего газа азота на водород. Это позволило избавиться от загрязнения изолятора нитридами вольфрама, образующимися в искровом разряде при оплавлении электродов, и повысить ресурс работы. Нанесение на рабочую часть поверхности катодного электрода кольцевых, концентрически расположенных неглубоких канавок и образование при этом кольцевых выступов позволило увеличить автоэмиссию электронов, которые в предпробойной фазе дают начало электронным лавинам, стабилизирующим разряд. Такая частичная модернизация позволила несколько улучшить характеристики промышленных разрядников, однако несовершенство конструкции металлокерамического узла разрядников Р-48 и Р-49 (тонкий высоковольтный вывод, соединение изолятора с боковой стенкой корпуса) не обеспечивало равномерности распределения электрического поля вдоль поверхности изолятора. Это ограничивало его электрическую прочность. Кроме того, полусферическая форма электродов не позволяла существенно повысить стабильность пробивных напряжений разрядников.

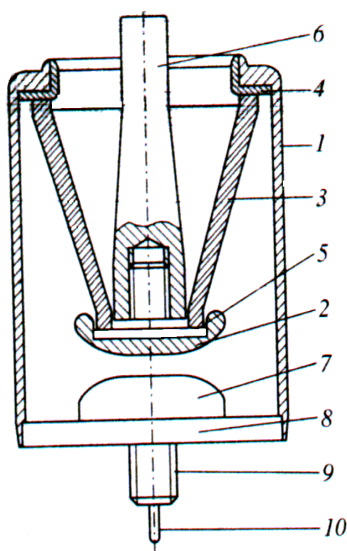


Рис. 1.57. Конструкция разрядника РИМ 200/50: 1-корпус; 2-электрод; 3- изолятор; 4 – манжета; 5 – переходник; 6 – высоковольтный вывод; 7 – электрод; 8 – крышка; 9 – штуцер; 10 – штенгель [66]

В этой связи были разработаны более совершенные разрядники РИМ 100/35 и РИМ 200/50, пригодные к использованию как в ускорителе АРСА, так и в импульсных аппаратах на основе трансформатора Тесла.

Нанесение на рабочую часть поверхности катодного электрода кольцевых, концентрически расположенных неглубоких канавок и образование при этом кольцевых выступов позволило увеличить автоэмиссию электронов, которые в предпробойной фазе дают начало электронным лавинам, стабилизирующим разряд. Такая частичная модернизация позволила несколько улучшить характеристики промышленных разрядников, однако несовершенство конструкции металлокерамического узла разрядников Р-48 и Р-49 (тонкий высоковольтный вывод, соединение изолятора с боковой стенкой корпуса) не обеспечивало равномерности распределения электрического поля вдоль поверхности изолятора. Это ограничивало его электрическую прочность. Кроме того, полусферическая форма электродов не позволяла существенно повысить стабильность пробивных напряжений разрядников.

На рисунке 1.57 приведена конструкция одного из этих разрядников.

Практика работы показала, что электропрочность металлокерамических разрядников определяется оптимальным соотношением между диаметрами высоковольтного вывода 6 и корпуса 1 [66], оптимальным углом наклона образующей изолятора 3 и профилем высоковольтного вывода 6, обеспечивающими равномерность распределения электрического поля вдоль поверхности изолятора. Кроме того, соблюдение экспериментально найденных оптимальных соотношений между межэлектродным зазором S_1 , диаметром рабочей части электрода D (т.е. части его поверхности, непосредственно участвующей в искровом разряде) и расстоянием между электродом и корпусом разрядника S_2 исключает искровые разряды вне межэлектродного зазора:

$$S_1 \leq 0,5D, \quad 2S_1 \leq S_2.$$

Разрядник РИМ 200/50 имеет электроды, выполненные по профилю Брюса, что при наличии стабилизирующих канавок на катоде существенно уменьшает разброс пробивных напряжений. Высоковольтный вывод имеет профиль, показанный на рисунке 1.57, что вместе с некоторым удалением большего торца изолятора от боковой стенки корпуса повышает электрическую прочность конического изолятора на 20 – 25% по сравнению с промышленным разрядником Р-49. При межэлектродном зазоре 3,5 – 4 мм и давлении водорода 3,5 – 4 МПа разрядник РИМ 200/50 обеспечивает следующие характеристики [66]: пробивное напряжение – 220 кВ; коммутируемый ток – 2 кА; коммутируемая энергия – 1 Дж; ресурс работы – $>10^6$; время коммутации – $<0,5$ нс. Максимальная частота срабатывания в масляной среде 20 Гц при коммутируемой энергии 4 Дж и 1000 Гц – при 0,5 Дж. Разрядники РИМ 100/35 и РИМ 200/50 могут быть использованы для коммутации первичных цепей импульсных генераторов при статическом напряжении на электродах до 7 кВ для РИМ 100/35 и 15 кВ для РИМ 200/50.

2.4 Импульсные тиратроны

В высоковольтных импульсных системах большой мощности в качестве ключевых элементов используются газоразрядные приборы – водородные тиратроны. Способность коммутировать значительный ток с нестабильностью включения, составляющей порядка единиц наносекунд, и выдерживать до 10^{11} включений позволяет им конкурировать с другими ключевыми элементами силовоточной электроники. Импульсные тиратроны обладают высокой электрической прочностью. При ну-

левом потенциале сетки тиратроны выдерживают высокое напряжение между анодом и катодом. Для возникновения разряда между анодом и катодом необходимо вначале подать между сеткой и катодом положительный поджигающий импульс, создающий вспомогательный разряд в этом промежутке. Затем разряд возникает в основном промежутке.

Одним из основных направлений совершенствования газоразрядных коммутаторов является уменьшение времени включения и увеличение скорости нарастания анодного тока. Различные способы увеличения быстродействия тиратронов можно условно разделить на две группы: конструктивную и физическую. Конструктивная группа связана с изменением внутренней конфигурации коммутаторов (сложные сеточные электроды, полые аноды, немагнитные фланцы и др.). Физическая – с различными способами формирования плазмы (использование подготовительного разряда, введение в промежуток радиоактивных изотопов), методами управления и др. Наиболее целесообразным решением с точки зрения технологичности установки в целом можно считать использование управляющего воздействия в форме электрического сигнала [68].

Время запаздывания импульса тока анода по отношению к импульсу напряжения сетки зависит от параметров сеточной цепи, напряжения накала, напряжения анода, частоты следования импульсов.

Чтобы уменьшить t_3 и сделать его более стабильным, нужно повышать крутизну фронта напряжения сетки и величину импульсного тока сетки.

К достоинствам импульсных тиратронов следует отнести следующее: возможность параллельного запуска большого числа тиратронов (малая нестабильность в запуске), работу с большой частотой следования, долговечность.

Недостатками тиратронов являются: значительная индуктивность, значительно большее t_K по сравнению с разрядниками, ограничение по коммутируемому току и напряжению, потребление мощности для накала.

Для определения диапазона рабочих параметров тиратрона следует знать L_T , t_K , Δt_3 , которых нет в паспортных данных. Время коммутации t_K в водородном тиратроне определяется давлением в колбе, которое зависит от температуры водородного генератора. Важным свойством тиратронов является возможность увеличения тока по сравнению с номинальным при уменьшении длительности импульса. Экспериментальные исследования показали, что при длительности импульса порядка 10^{-7} с величина импульсного тока может превышать номинальное значение в

несколько раз [24] (табл.1.9). Критерием возможности изменения параметров тиратронов может служить произведение параметров $U \cdot I_{\text{и}} \cdot f \leq N_{\text{СР}}$, где $N_{\text{СР}}$ – паспортное значение средней мощности.

Таблица 1.9

Некоторые экспериментальные характеристики тиратронов

Параметры	ТГИ-1 400/16	ТГИ-1 2500/35	ТГИ-1 1000/25	ТГИ-1 3000/50	ТГИ-1 700/25
Требования к нестабильности источника питания, %	5	1,5	8	-	8
К накали катода, %	1	1	1	-	1
К амплитуде поджигающего напряжения, %	1	2	1	-	1
t_3 развития разряда при номинальном режиме, нс	± 1	± 1	± 1	-	± 1
t_{Φ} при $U = 6,3$ В, нс	20	35	20	25	25
Импульсный ток анода при $t_{\text{и}}=100$ нс (экспериментальный)	10^2	$7 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
L тиратрона, мкГн	0,15	0,7	0,2	0,3	0,35
Импульсный ток анода, А	400	2500	1000	3000	700
Средняя выходная мощность, кВт	4	43	25	250	25

Длительность фронта импульса на выходе генератора определяется временем нарастания тока через тиратрон и зависит от времени развития разряда, индуктивности цепи коммутатора и $C_{\text{К}}$ (рис. 1.58). Для уменьшения времени коммутации последовательно с тиратроном включен индуктивный коммутатор $L_{\text{К}}$ с малым временем переключения $t_0 \ll t_{\Phi}$, который срабатывает после окончания переходного процесса в тиратроне, когда ток через тиратрон достигает максимального значения. t_{Φ} – длительность фронта импульса без коррекции.

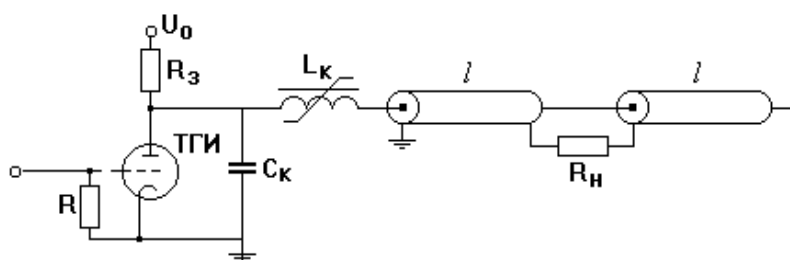


Рис. 1.58. Схема включения тиратрона с дополнительной емкостью $C_{\text{К}}$ и нелинейной индуктивностью $L_{\text{К}}$ [24]

Величину емкости C_K можно найти из условия равенства максимальных токов в контуре $L_T C_K$ и через генератор:

$$C_K = \frac{L_T}{\rho^2}, \quad (1.95)$$

где ρ – волновое сопротивление ступени линии.

Индуктивность L_K выбирается с учетом тока I_K , при котором индуктивность L_K не входит в насыщение, и длительность скорректированного фронта равна $t_{\Phi 0}$ [24].

В работе [68] рассматривается способ управления тиратронами, когда формирование плазмы в межэлектродном пространстве осуществляется под воздействием волны ионизации.

Обязательным условием формирования ионизационных волн является подача на управляющий электрод высоковольтного импульса с коротким фронтом (до 100 нс). Внутреннее пространство современных коммутаторов тиратронного типа можно разделить на две области: катодно-сеточную и анодную (рис.4.8). Протяженность катодно-сеточной области значительно превышает расстояние между анодом и сеточным электродом. Подобное соотношение приводит к тому, что эффективное образование плазмы происходит в пространстве катод – сетка с последующей диффузией заряженных частиц в анодную камеру и переводом прибора в проводящее состояние. Концентрация плазмы в области сеточного электрода определяет скорость нарастания анодного тока, и, следовательно, для увеличения скорости включения тиратрона необходимо повышать скорость образования плазмы в катодно-сеточной области или создать условия для локального накопления заряженных частиц с последующим быстрым вводом их в анодную камеру. Такой механизм пробоя оказался возможным при значительном перенапряжении катодно-сеточного промежутка, которое создается при подаче на управляющую сетку импульсов напряжения амплитудой не менее 15 кВ со скоростью нарастания напряжения на фронте не менее $3 \cdot 10^{12}$ В/с при длительности управляющего импульса

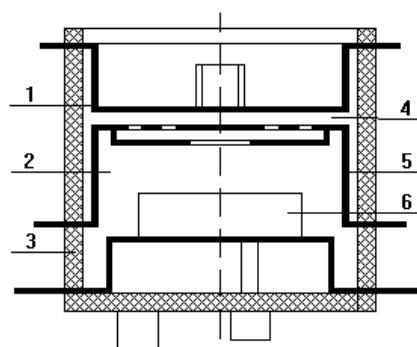


Рис. 1.59. Тиратронный коммутатор триодной конструкции:

1 – анод; 2 – катодно-сеточная область; 3 – керамическая оболочка; 4 – анодная камера; 5 – сетка; 6 – катодный узел [68].

не менее 5 нс. Это позволяет уменьшить время включения металлокерамических водородных тиратронов с накальным катодом ТГИ1-270/12, ТГИ2-500/20 от 15 до 3,5-4 нс и увеличить скорость нарастания анодного тока от $\sim 10^{10}$ до $\sim 10^{11}$ А/с при работе на активную нагрузку.

Контрольные вопросы.

1. От чего зависит амплитуда, длительность и фронт импульса напряжения в генераторе импульсных напряжений, собранного по схеме Аркадьева-Маркса?
2. Что такое «постоянная времени искры»?
3. Как влияет индуктивность разрядного контура на скорость вывода энергии из первичного накопителя?
4. Как можно уменьшить время срабатывания ГИН?
5. Что понимается под импульсной зарядкой малоиндуктивного накопительного элемента?
6. Пояснить принцип работы генератора Фитча.
7. Назовите основные характеристики газовых разрядников, используемых в генераторах импульсных напряжений.
8. От чего зависит пробивное напряжение промежутка при импульсном воздействии?
9. Как достигается высокая стабильность срабатывания газовых разрядников?
10. Какие достоинства имеют металлокерамические газонаполненные разрядники высокого давления?
11. Как можно уменьшить время включения водородных тиратронов с накальным катодом?

Список литературы

1. Кучинский Г.С., Шкуропат П.И., Шнеерсон Г.А. Генераторы больших импульсных токов // Физика и техника мощных импульсных систем: Сб. статей/ Под ред. Е.П. Велихова.- Энергоатомиздат, 1987.- С.127-164.
2. Бугаев С.П., Волков А.М., Ким А.А. и др. ГИТ 16: мегаджоульный импульсный генератор с плазменным ключом для нагрузок типа Z-пинча // Изв. вузов. Сер. Физика, 1997.- №12.- С.38-46.
3. Бут Д.А, Алиевский Б.Л. и др. Накопители энергии. - М: Энергоатомиздат, 1991. - 400с.
4. Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С. и др. Техника больших импульсных токов и магнитных полей/ Под ред. В.С.Комелькова. -М: Атомиздат, 1972. - 472с.
5. Авруцкий В.А., Кужекин И.П., Чернов Е.М.. Испытательные и электрофизические установки. Техника эксперимента / Учебное пособие. - М: МЭИ, 1983, - 264с.
6. Коршунов Г.С., Хмыров В.В., Важов В.Ф., Пичугина М.Т. Управляемый искровой разрядник // ПТЭ.- 1974.- № 4.- С.92-94.
7. Кремнев В.В., Месяц Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. - Новосибирск: Наука, 1987.- 226с.
8. Ларионов Б. А., Столов А.М. Коммутирующая аппаратура для импульсных источников энергии на основе индуктивных накопителей//Физика и техника мощных импульсных систем: Сб. статей / Под ред. Е.П. Велихова.- Энергоатомиздат, 1987.- С.105-126.
9. Шенбах К., Кристиансен М, Шефер Г. Размыкатели для индуктивных накопителей // ТИИЭР.- 1984.- Т. 72.- №2.- С.28-38.
10. Долгачев Г.И, Закатов Л.П, Нитишинский М.С и др. Сверхмощные частотные генераторы с плазменным прерывателем тока // ПТЭ.- 1999.- № 2.- С.3-26.
- 11.Рукин С.Н. Генераторы мощных наносекундных импульсов с полупроводниковыми прерывателями тока // ПТЭ.- 1999. - № 4.- С 5-36.
- 12.Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электротехника.- М: Наука, 2004.- 704с.
- 13.Ковальчук Б.М., Месяц Г.А. О возможности обрыва большого тока в объемном разряде, возбуждаемом электронным пучком // Письма в ЖТФ.- 1076. - Т.2, вып. 14. - С.644-650.
- 14.Котов Ю.А., Лучинский А.В. Усиление мощности емкостного накопителя энергии прерывателем тока на электрически взрывааемых про-

- волочках // Физика и техника мощных импульсных систем: Сб. статей / Под ред. Е.П. Велихова.- Энергоатомиздат, 1987.- С.189-210.
15. Азаркевич Е.И. Применение теории подобия к расчету некоторых характеристик электрического взрыва проводников // ЖТФ.- 1973, вып.1.-С.141-145.
 16. Азаркевич Е.И., Котов Ю. А., Седой В.С. Условия возникновения паузы тока при электрическом взрыве проводников / ЖТФ, 1975, т. 45, вып. 1, С. 175-177.
 17. Колганов Н.Г., Котов Ю.А. Переключение LC - контура на активную нагрузку с помощью ЭВП // Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков / Под ред. Г.А. Месяца. - Новосибирск: Наука. - 1976.- С. 69-75.
 18. Котов Ю.А., Колганов Н.Г., Ковальчук Б.М.. Быстродействующие размыкатели на основе электрически взрывающихся проволочек // ПТЭ.- 1974.- №6.- С.107-112.
 19. Сахаров А.Д., Людаев Р.З., Смирнов Е.Н. и др. Магнитная кумуляция// Докл. АН СССР.- 1965.- т.165.- №1.- С.65—68.
 20. Кравченко А.С., Борискин А.С. и др. Формирование с помощью магнитокумулятивного генератора ВМГ-160 импульса напряжения 1,3 МВ на нагрузке 13 Ом // ПТЭ.- 2000.- №2.- С.70-74.
 21. Швецов Г.А. Взрывные МГД-генераторы. Физика и техника мощных импульсных систем // Физика и техника мощных импульсных систем: Сб. статей/ Под ред. Е.П. Велихова.- Энергоатомиздат, 1987.- С.253-263.
 22. Сипайлов Г.А., Хорьков К.А.. Генераторы ударной мощности. -М: Энергия, 1979.-128с.
 23. Рукин С.Н. Генераторы мощных наносекундных импульсов с полупроводниковыми прерывателями тока // ПТЭ.- 1999. - № 4.- С 5-36.
 24. Месяц Г.А., Насибов А.С., Кремнев В.В. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. - М: Энергия, 1970.- 152с.
 25. Смирнов С.М., Терентьев П.В. Генераторы импульсов высокого напряжения. -М: Энергия, 1964.- 138с.
 26. Воробьев А.А. Сверхвысокие электрические напряжения.- М: Госэнергоиздат, 1960.- 315с.
 27. Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Воробьев Н.И., и др. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения.- М: Госэнергоиздат, 1960.- 584с.
 28. Fitch R.A., Howell V.T.S. Novel principle of transient high voltage generation// Proc. IEEE Electronics Power Science and General. -1964. -Vol. 111.- №4.- P 849
 29. Козлов М.И., Гершенкрой И.Л., Гошуренко В.И. и др. Генератор

- импульсных напряжений с необратимым перезарядом ступеней и автоматическим запуском коммутаторов // ПТЭ.- 1983.- №2.- С.109-110.
30. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Ким А.А. и др. Быстрый первичный накопитель на основе генератора Аркадьева-Маркса // Известия ВУЗов. 1997.-№12.- С.17-24.
31. Gunter A., Kristiansen M., Martin T. Opening switches.- N.Y.: Plenum Press, 1987
32. Воеводин С.В., Горохов В.В., Карелин В.И. Малогабаритный высоковольтный наносекундный генератор Аркадьева-Маркса на воздушных разрядниках // ПТЭ.- 2000.-№3.- С.67-71.
33. Герасимов А.И., Федоткин А.С., Зенков Д.И. и др. Надежный экранированный генератор Аркадьева-Маркса на 500 кВ и 6,25 кДж со стабильным временем задержки срабатывания // ПТЭ.- 1998.- №1.- С.96-101.
34. Басов Г.Ф., Бастриков А.Н. др. Генератор мощных мегавольтных импульсов с наносекундным фронтом // ПТЭ. - 1995. - №2.- С.117-121.
35. Бочаров Е.А., Гладков В.С., Зябко Ю.П. и др. Высокоскоростной источник заряда 5-мегавольтного формирователя импульсов напряжения наносекундного диапазона // ПТЭ.- 2001.- № 4.- С.88-93.
36. Андреев Ю.А., Буянов Ю.И., Визирь В.А. и др. Генератор мощных импульсов сверхширокополосного электромагнитного излучения. // ПТЭ.- 1997.- № 5. С.72-76.
37. Rühl F., Herziger G. Analysis of the Spiral Generator // Rev. Sci. Instrum.- 1980.- Vol.51.- N11.-C12-16.
42. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. - М: Сов.радио. - 1974. - 256с.
46. Лучинский А.В., Махрин В.И., Ратахин Н.А., Чертов А.А. Мощный генератор с высоковольтной зарядкой формирующих линий путем использования электрического взрыва проводников // Изв.вузов. Сер. Физика.- 1995.- №12.-С.52-57.
64. Бастриков А.Н., Воробьюшко М.Н., Ковальчук Б.М. и др. Генератор импульсных напряжений для мощных импульсных систем // II Всесоюзная конференция по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Сб. докл. НИИ ЭФА, 1982.- Т.3.- С.152-159.
65. Мощные наносекундные импульсные источники ускоренных электронов / Под ред. Г.А. Месяца. -Новосибирск: Наука.- 1974.- 86с.
66. Авилов Э. А., Юрьев А. Л. Газонаполненные металлические разрядники высокого давления. // ПТЭ.- 2000.- №2.- С.78-81.

- 67.Бабич Л. П., Кудрявцев Ю. Г., Петрушин О. Н. и др. Устройство для генерации озона и дезактивации дымных газов на основе электрического разряда, развивающегося в режиме убегающих электронов // ПТЭ.- 2002.- №1.- С.125-128.
- 68.Юдаев Ю.А.. Повышение быстродействия импульсных газоразрядных коммутаторов при управлении высоковольтными наносекундными импульсами //ПТЭ.- 1997.- №5.- С.55-60.
- 69.Бочков В.Д., Колесников А.В., Королев Ю.Д. и др. Исследование предпробойных токов, протекающих в псевдоискровых разрядниках // ЖТФ.- 1997.- Т.67.- №10.- С.26-29.
- 70.Накопление и коммутация энергии больших плотностей. / Пер.с англ.; Под ред. Ч.Бостика, В. Нарди, О. Ункера.- М.: Мир.1979.- 475с.

Содержание

Введение.....	4
1. Генераторы импульсных токов.....	4
1.1 Емкостные накопители энергии.....	4
1.1.1 Общие сведения об емкостных накопителях.....	4
1.1.2 Зарядные устройства.....	9
1.1.3 Разрядные процессы в емкостных накопителях энергии.....	10
1.1.4 Импульсные конденсаторы.....	14
1.1.5 Изоляция генераторов импульсных токов на основе емкостных накопителей энергии.....	28
1.1.6 Системы коммутации генераторов импульсных токов на основе емкостных накопителей энергии.....	33
1.2 Генераторы импульсных токов на основе индуктивных накопителей энергии.....	46
1.2.1 Общие сведения.....	47
1.2.2 Коммутирующие устройства.....	47
1.2.3 Размыкатели, основанные на использовании электрического взрыва проводников.....	54
1.2.4 Плазменные прерыватели тока.....	58
1.2.5 Полупроводниковые прерыватели тока.....	60
1.2.6 Использование индуктивных накопителей в цепях с емкостными и индуктивными элементами.....	67
1.3 Взрывные генераторы.....	70
1.4 Ударные генераторы.....	74
2. Генераторы импульсных напряжений.....	78
2.1 Генераторы импульсных напряжений, выполненные по схеме Аркадьева-Маркса.....	78
2.2 LC- генераторы Фитча.....	88
2.3 Коммутаторы.....	89
2.4 Импульсные тиратроны.....	95
Список использованной литературы.....	100
Содержание.....	104

Учебное издание

ПИЧУГИНА Мария Тимофеевна

МОЩНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА

Учебное пособие

Издано в авторской редакции

Научный редактор доктор технических наук,
профессор *В.В. Лавринович*

Компьютерная верстка *М.Т. Пичугина*

Дизайн обложки *О.Ю. Аршинова*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати...Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л....Уч.-изд. л.....

Заказ.....Тираж 40 экз.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета сертифицирована

NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050. г. Томск, пр. Ленина, 30

Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru