

Федеральное агентство по образованию  
ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ»



С. Ю. Соковнин

## **МОЩНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА**

Учебное электронное текстовое издание  
Подготовлено кафедрой «Техника высоких напряжений»

Учебное пособие по курсу «Физические установки» для студентов специальностей 140306 – Электроника и автоматика физических установок и 140307 – Радиационная безопасность человека и окружающей среды.

В учебном пособии рассмотрены основные типы импульсных генераторов и мощных ускорителей электронов, принципы их работы, основные составные части и области применения. Содержит обширный фактический материал; может быть использовано в качестве справочника при курсовом и дипломном проектировании.

© ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2008

Екатеринбург  
2008

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Структура установки мощной импульсной техники	5
1.1. Схемы построения сверхмощных генераторов	5
1.2. Первичные накопители энергии	7
1.3. Промежуточные накопители энергии	11
1.4. Коммутаторы для сверхмощных генераторов	12
1.4.1 ЭВП-прерыватели	13
1.4.2. Плазменные прерыватели тока	15
1.4.3. Взрывные прерыватели тока	16
2. Современные сверхмощные генераторы	17
2.1 Генераторы по схеме ГИН-ФЛ	17
2.2 Установки по схеме ИТ-ФЛ	20
2.3 Генераторы по схеме ГИН-ППТ	24
3. Элементы схем формирования импульсов	27
3.1 Высоковольтные конденсаторы	27
3.2 Катушки индуктивности	30
3.3 Коммутаторы	31
3.3.1. Разрядники	31
3.3.2 Тиратроны	35
3.3.3 Тиристоры и реверсивно-включаемые динисторы	37
3.3.4 Магнитный ключ	40
3.3.5 Полупроводниковые ключи	43
3.4. Критерии выбора элементов схем формирования импульсов	50
4. Применение генераторов импульсов тока и напряжения	52
4.1. Электрофизические методы обработки	52
4.2. Электроэрозионная обработка	52
4.3. Электромеханическая обработка	55
4.4. Электроимпульсная дезинтеграция материалов	58
4.5. Электроимпульсная обработка воды	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	64
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	65

## ВВЕДЕНИЕ

Мощная импульсная техника (МИТ) включает в себя устройства для накопления, сжатия и передачи в нагрузку импульсной электрической энергии больших мощностей. С начала 20 века МИТ создавалась для физического эксперимента в областях физики элементарных частиц, рентгентехники, радиотехники, а с 60-х годов стала применяться в лазерной физике и термоядерном синтезе. По мере развития техники увеличивались выходные параметры и сейчас к МИТ относятся электрофизические установки, обеспечивающие на нагрузке импульсы:

- амплитуда напряжения: от десятков кВ до десятков МВ ( $10^4$ – $10^7$  В);
- токи от единиц кА до сотен МА ( $10^3$ – $10^8$  А);
- мощностью  $10^7$ – $10^{14}$  Вт;
- скорость нарастания мощности  $10^{14}$ – $10^{22}$  Вт/с;
- энергия в одном импульсе  $10^3$ – $10^8$  Дж.

Имеется три основных этапа в истории развития МИТ.

С момента заключения ядерными державами в 1963 г. «Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в трех средах» интерес к МИТ резко повысился в связи с возможностью создания установок, моделирующих различные компоненты излучения ядерного взрыва (электромагнитный импульс, гама импульс, жесткий и мягкий рентген, нейтронный импульс и др.). Интенсивные исследования и разработки в этом направлении позволили в начале 70-х годов создать ускорители электронов и генераторы рентгеновского тормозного излучения на их основе с выходной мощностью до  $10^{13}$  Вт, скоростью её нарастания до  $10^{21}$  Вт/с и энергией импульса  $10^6$  Дж. Эти исследования дали толчок развитию импульсных электронных пушек, было установлено что в электронном пучке можно обеспечить амплитуды тока до  $10^8$  А. Исходя из этого, Винтенберг в США и Завойский в СССР в 1968 г. выдвинули идею использования пучков заряженных частиц для осуществления инерционного УТС путем всестороннего быстрого разогрева Д-Т (дейтерий-тритиевой) мишени (время разогрева  $\phi \ll t_{\text{разлета}}$ ).

Расчеты показали, что для решения этой задачи требуются пучки заряженных частиц параметрами: энергозапас – более 10 МДж; мощность – более  $10^{14}$  Вт; длительность – до 50 нс; скорость нарастания мощности – более  $10^{22}$  Вт/с.

Третьим толчком послужили развернутые в 70–80-х годах работы по изучению возможности создания оружия пучкового действия в рамках стратегической оборонной инициативы президента США Р. Рейгана (пучки заряженных частиц, лазерное излучение, ускорение твердых тел, направленное СВЧ излучение). Оценки показали, что пучковое оружие применимо для поражения мишеней на сравнительно небольшом расстоянии (до 1000 км). Но даже для этих расстояний требуется запас энергии на уровне  $10^{12}$  Дж, что эквивалентно 200 тонн взрывчатых веществ.

Таким образом, в 60–80-е годы МИТ бурно прогрессировала за счет бюджетных финансирования по указанным выше программам. Созданная научная и техническая база МИТ позволила ей в настоящее время стать самостоятельной отраслью науки и техники. Находятся все новые и новые применения в науке и технологиях.

Сокращения ядерных вооружений за последние годы снизили интерес оборонных отраслей промышленности. Однако появился новый интерес к этой технике для весьма широкого профиля (обработка материалов, экология, медицина, пищевая промышленность и др.). В этой связи большое внимание уделяется мобильным компактным установкам, обладающим высоким КПД, работающим в частотном режиме и с большим частотным ресурсом.

## МОЩНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА

### 1. Структура установки мощной импульсной техники

#### 1. 1. Схемы построения сверхмощных генераторов

Принцип формирования импульсов высокого напряжения или тока относительно прост: сравнительно медленно энергия накапливается в специальном устройстве, а затем с помощью коммутатора она быстро передается в нагрузку. Таким образом, при малой длительности импульса даже при небольших энергиях можно получить гигантские мощности.

В настоящее время используется два основных способа для сжатия энергии: с емкостным (ЕНЭ) и индуктивным накопителями энергии, которые реализуются с различными видами коммутаторов: размыкатель К1 (прерыватель) и замыкатель К2 (разрядник).

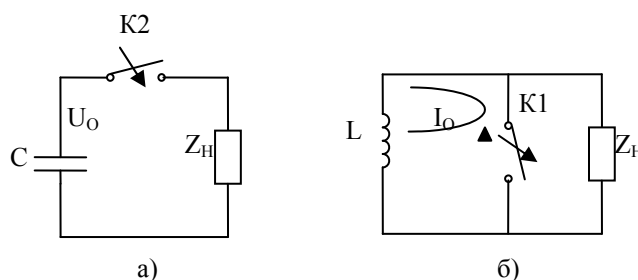


Рис. 1. 1. Схемы формирования импульсов: с ИНЭ (б) и ЕНЭ (а).

В первом случае (рис. 1. 1, а) формирование импульса происходит за счет разряда емкости  $C$ , которая предварительно заряжена до напряжения  $U_0$ , через разрядник  $K$  в нагрузку –  $R_n$ . Если параметры разрядника близки к идеальным (т. е. время коммутации много меньше постоянной разряда  $t_k \ll R_n C$ ), то на нагрузке возникнет импульс напряжения экспоненциальной формы:

$$U(t) = U_0 \cdot \exp(-t/R_n C);$$

с длительностью на полувысоте близкой  $t_n \sim R_n \cdot C$  и фронтом  $t_f \sim t_k$ .

Если разрядный контур неидеален, то имеет индуктивность  $L_k$  и, соответственно,  $t_f = 2,2 \cdot L_k / R_n$  (уровень фронта от 0.1 до 0.9 от амплитуды). Для коммутации емкостного накопителя энергии могут быть использованы разрядники, тиратроны, тиристоры, магнитные ключи.

Во втором случае (Рис. 1. 1, б) индуктивный накопитель энергии (ИНЭ) используется с генератором тока. Обрыв тока приводит к формированию на индуктивности  $L$  за счет ЭДС самоиндукции импульса напряжения, пропорционального  $(-L \, dI/dt)$ , который прикладывается к нагрузке. Параметры формируемого импульса сильно зависят от свойств размыкателя и при линейном росте его сопротивления по закону  $R = b \cdot t$ :

$$U_a = I_0 \cdot (bL/e)^{0,5}; t_{ин} \sim (L/b)^{0,5}. \quad (1.1)$$

В момент обрыва тока сопротивление прерывателя составит  $R_{п} \sim L/t_{п}$ , напряжение на нагрузке  $U \sim (I_0 \cdot L/t_{п}) \cdot (x/(1+x)^2)$ , где  $x = R_{н}/R_{п}$ , а мощность  $P \sim (I_0^2 L/t_{п}) \cdot (x/(1+x)^2)$ . Следовательно, для получения максимальной мощности надо, чтобы  $R_{н} = R_{п} = L/t_{п}$ , в этом случае:

$$P_{max} \sim (I_0^2 L)/(4t_{п}). \quad (1.2)$$

Таким образом, чем меньше время обрыва и выше скорость роста сопротивления прерывателя  $K1$ , тем выше эффективность передачи энергии в нагрузку. Обычно с использованием таких простых схем формируются импульсы длительностью до долей единиц мкс и амплитудой до десятков кВ или сотен кА. Главной причиной, ограничивающей применение схем с промежуточным индуктивным накопителем энергии, служит то, что создание прерывателя тока – более сложная инженерная задача, чем создание замыкателя.

В настоящее время используются три основных типа прерывателей, которые устанавливаются параллельно нагрузке:

- 1) на основе электрически взрывааемых проволок;
- 2) плазменные прерыватели тока;
- 3) полупроводниковые прерыватели тока (ППТ).

Формирование импульса высокого напряжения большей величины или тока в МА и более, особенно наносекундного, представляет нетривиальную задачу, которая осложняется тем, что накопитель, коммутатор и нагрузка имеют различные технические ограничения и паразитные параметры, поэтому процесс передачи энергии не удастся выполнить за одну стадию и приходится использовать промежуточный этап сжатия энергии.

Структурная схема мощных импульсных установок МИУ показана на рис. 1. 2. Различают первичный и промежуточный НЭ, в качестве этих НЭ могут быть использованы ЕНЭ и ИНЭ, каждый из которых имеет свой коммутатор.

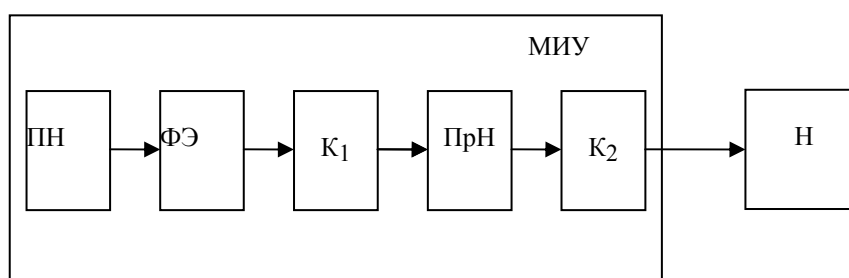


Рис. 1. 2. Структурная схема мощных импульсных установок:

ПН – первичный накопитель, ФЭ – формирующий элемент, К1, К2 – коммутаторы, ПрН – промежуточный накопитель, Н – нагрузка

Любой генератор МИТ содержит первичный накопитель энергии, которая запасается в течение достаточно длительного времени, а затем быстро

передается в формирующий элемент. Характерные времена накопления энергии в НЭ составляют от сотен минут до долей секунды. Времена вывода энергии из первичного НЭ составляют от миллисекунд до долей микросекунды. Чем больше разница между временем накопления и временем выводу энергии, тем выше степень сжатия энергии НЭ. После срабатывания первого коммутатора  $K_1$  – энергия и ФЭ передается в промежуточный накопитель энергии, а после срабатывания коммутатора  $K_2$  – в нагрузку.

## 1. 2 Первичные накопители энергии

Первичные накопители энергии в МИТ построены в основном по принципу накопления энергии электрического поля в конденсаторе, или энергии магнитного поля в катушке индуктивности. Энергия также может быть запасена в кинетической форме в виде энергии вращающегося ротора электрической машины; электрохимической энергии аккумуляторной батареи; химической энергии взрывчатых веществ (табл. 1. 1).

Плотность запасаемой энергии характеризует эффективность накопления энергии, а, учитывая запасенную энергию в НЭ каждого типа, можно судить о геометрических размерах. Рассмотрим типы НЭ подробнее.

Таблица 1. 1

### Сравнительные характеристики различных типов первичных НЭ

№	Тип накопителя	Плотность энергии, Дж/дм <sup>3</sup>	Предельная энергия, Дж	Длительность импульса вывода энергии, с	Удельная мощность импульса, Вт/дм <sup>3</sup>
1	Конденсаторы	$(0,5 \div 3) \cdot 10^2$	$10^7$	$10^{-6}$	$(1 \div 5) \cdot 10^8$
2	Индуктивные накопители	$10^5$	$10^8$	$10^{-1}$	$(1 \div 10) \cdot 10^5$
3	Ударные генераторы	$(1 \div 4) \cdot 10^4$	$10^8$	$10^{-4}$	$(3 \div 10) \cdot 10^4$
4	Аккумуляторы	$(1 \div 5) \cdot 10^5$	$10^8$	$10^{-3}$	$(3 \div 10) \cdot 10^2$
5	Химические ВВ	$10^7$	$10^8$	$10^{-7}$	$10^{14}$
6	Ядерные ВВ (U <sub>235</sub> – 200 МэВ)	$10^{14}$			

Предельная плотность энергии  $\omega$ , запасаемая в емкостных накопителях, определяется электрической плотностью диэлектрика  $E$  и его диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ :

$\omega = \epsilon\epsilon_0 E^2/2$ , где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума.

В современных импульсных конденсаторах электрические поля, длительное время выдерживаемые диэлектриком, достигают значений порядка  $10^6$  В/см, при этом плотность электрической энергии составляет до 300 Дж/дм<sup>3</sup>. Использование импульсной зарядки конденсаторов позволяет эксплуатировать их при напряжениях, превышающих на порядок пробивные значения. В зависимости от цели ЕНЭ выполняются по схеме генератора импульсных токов (ГИТ) или генератора импульсных напряжений (ГИН). В ГИТ конденсаторы (обычно однотипные) в разрядном режиме соединяются параллельно, а в ГИН – последовательно. Современные ГИТ на ЕНЭ имеют энергозапас до 100 МДж, индуктивность на уровне 0, 2–6 нГн и ток от 16 до 300 МА при времени нарастания 1–10 мкс.

Основные проблемы, которые решаются при создании ГИТ состоят в том, что необходимо получить минимальные индуктивность и сопротивления контура, которые ограничивают амплитуду тока (без учета нагрузки). Основным путем решения – применение модулей, включаемых параллельно, т. к. индуктивность и сопротивление уменьшаются при параллельном соединении. Современные ГИН на ЕНЭ имеют энергозапас до 200 МДж, выходное напряжение до 10МВ при времени нарастания 0, 1–10 мкс.

Наиболее широко используемой схемой создания ГИТ является схема Аркадьева-Маркса (рис. 1. 3). Принцип работы состоит в том, что конденсаторы  $C_0$  заряжаются через зарядные резисторы  $R_0$  до напряжения источника  $U_0$ . После срабатывания разрядников конденсаторы выстраиваются последовательно и к нагрузке прикладывается напряжение  $\sim nU_0$ , которое пропорционально числу  $n$  ступеней генератора.

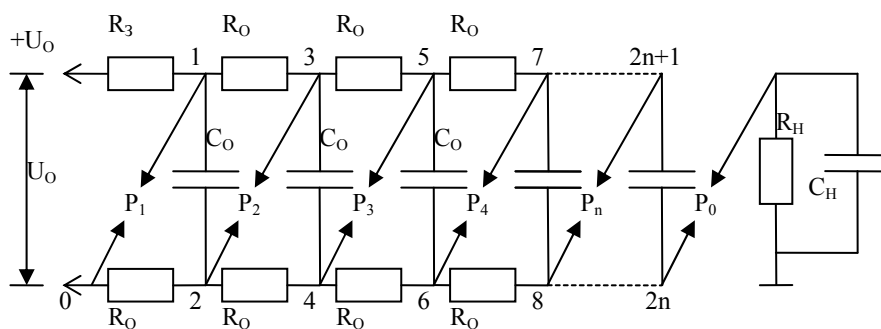


Рис. 1. 3. Принципиальная схема ГИН Аркадьева-Маркса

Плотность энергии  $\omega$ , запасаемая в индуктивных накопителях, определяется напряженностью магнитного поля  $H$  и магнитной проницаемостью материала  $\mu$ :

$\omega = \mu \mu_0 H^2/2$ , где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

Плотность магнитной энергии определяется предельно допустимыми магнитными полями, которые ограничены механической прочностью



материала ИНЭ. При достигнутых значениях  $H \sim 500 - 600 \text{ кЭ}$  ( $1 \text{ Э} \approx 80 \text{ А/м}$ ) плотность магнитной энергии имеет порядок  $10^5 \text{ Дж/дм}^3$ . Основная проблема ИНЭ – вывод энергии за короткий промежуток времени. Её нерешенность на сегодняшний день – основная причина, сдерживающая их более широкое применение.

Вторая проблема, сдерживающая широкое применение ИНЭ, – это необходимость применения мощных источников питания, т.к. при накоплении энергии в индуктивности происходят непрерывные потери энергии. При постоянном токе, например в течение каждого промежутка времени, равного половине постоянной времени катушки ( $t = L/2R$ ), рассеивается энергия в количестве, равном запасенной энергии. В случае же накопления электрической энергии в ИНЭ, потери энергии определяются относительно небольшими токами утечки. Переход к сверхпроводящим ИНЭ способен решить эту проблему.

Механическая энергия ротора электрической машины, передаваемая в нагрузку в режиме короткого замыкания, использовалась ещё в 1924 году Капицей П. Л. для получения магнитных полей большой напряженности. Позднее по этому принципу были разработаны специальные ударные генераторы. Раскрученный до больших оборотов массивный ротор генератора обладает значительной энергией. При звуковых скоростях кинетическая энергия единицы объема ротора составляет около  $5 \cdot 10^5 \text{ Дж/дм}^3$ . В настоящее время существуют генераторы с запасом энергии в роторе до 1 ГДж. Эффективность передачи энергии в нагрузку до 80%. Однако время передачи достаточно длинное (мс) и определяется инерцией ротора.

Аккумуляторные батареи являются ещё более медленными накопителями энергии; они способны отдавать в нагрузку часть запасенной энергии за время  $\sim 10^{-3} - 10$  секунд. При этом токи достигают величины  $10^4 \text{ А}$  при напряжении около 1 В. Удельная мощность порядка 1 кВт/кг. Однако в одном импульсе используется только малая часть ( $\sim 1\%$ ) запасенной энергии. Небольшой срок службы и сложности эксплуатации – главные причины, по которым химические накопители не находят широкого применения в качестве источников импульсных токов в МИТ.

Источником энергии может служить взрывчатое вещество. Данный метод реализован в так называемых взрывных или взрывомагнитных генераторах (ВМГ). Длительности импульсов при данном способе накопления от  $10^{-7}$  ч до  $10^{-5}$ с, амплитуда тока достигает  $10^7 \text{ А}$ . Принцип их действия основан на том, что энергия, выделяемая при взрыве, используется для сжатия магнитного потока, который был предварительно создан внешним источником. В классической схеме ВМГ (рис. 1. 4) продукты детонации ВВ, воздействуя на цилиндрический металлический лайнер, сжимают его поперек силовых линий магнитного поля, совершая тем самым работу против пондемоторных сил этого все возрастающего по величине магнитного поля. Накопленная магнитная энергия импульсного тока передается в нагрузку при

быстром размыкании тока в индуктивности контура, образованного в конце процесса сжатия лайнера и вытеснения магнитного поля.

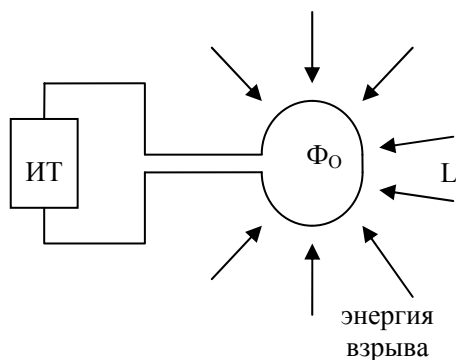
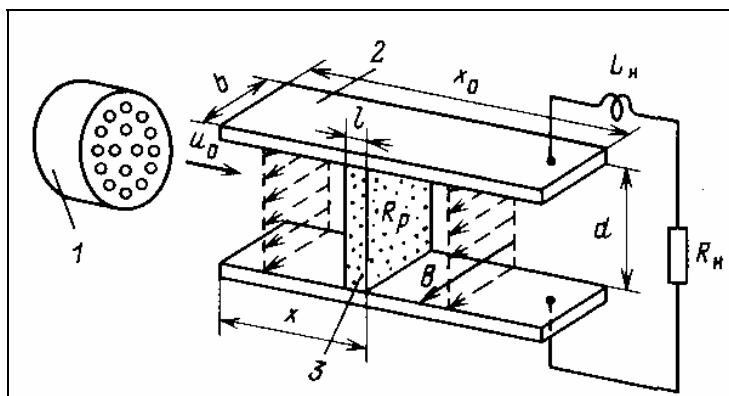


Рис. 1. 4. Схема ВМГ

Рис. 1. 5. Схема взрывного МГД-генератора:  
1 – разряд ВВ, 2 – электроды, 3 – сгусток плазмы

Схлопывание контура тока означает уменьшение его индуктивности, а поскольку поток не меняется, то ток и энергия контура возрастают, а, следовательно, возрастает и напряженность магнитного поля. Таким образом, энергии ВВ превращается в энергию магнитного поля. С помощью ВМГ были получены рекордные токи и сверхсильные магнитные поля (до 10 МЭ). Главными недостатками ВМГ являются однократность действия, уничтожение при взрыве самого генератора и объекта исследования, а также невозможность использования создаваемого тока для других целей, кроме создания сильного магнитного поля.

Для ликвидации этих недостатков были созданы взрывные плазменные МГД-генераторы. Это сохраняемый преобразователь химической энергии ВВ. В классической схеме взрывного МГД-генератора (рис. 1. 5) расширяющиеся продукты детонации ВВ проталкивают электропроводную плазму, образованную за головкой ударной волны, через заранее созданное поперечное магнитное поле МГД-канала. Электроды канала соединены с нагрузкой. При сжатии поля часть кинетической энергии плазмы преобразуется и передается в нагрузку. Мощность около 1ГВт, ток до 1МА. Имеются разработки таких генераторов со сверхпроводниками. В менее мощных МГД-генераторах (для геофизики) используются пороховые заряды.

Сравнение всех источников энергии показывает, что, несмотря на малую плотность энергии и благодаря малому внутреннему сопротивлению, конденсаторы обеспечивают наибольшие импульсные токи и мощности. Поэтому подавляющее число установок в области МИТ использует емкостные накопители энергии.

Накопление энергии в магнитном поле становится целесообразным при энергиях выше 1 МДж и при передаче энергии в нагрузку в течение  $\sim 10^{-3}$  с. ВМГ и взрывные МГД-генераторы эффективны, обладают малой массой,

высокой надежностью и готовностью к быстрому применению. Они хороши для однократных систем, особенно в сочетании со сверхпроводниками.

Механическое накопление энергии во вращающихся маховых массах выгодно производить при длительностях импульсов  $10^{-1}$  ч  $10$  секунд и при энергиях  $10^6$  ч  $10^9$  Дж. Чем больше величина требуемой энергии и чем длиннее импульс, тем экономически более выгодно по сравнению с другими методами применять механическое накопление энергии.

### 1.3 Промежуточные накопители энергии

Имеется два типа промежуточных НЭ – емкостный и индуктивный. В качестве промежуточного ИНЭ может выступать либо паразитная индуктивность контура, либо дополнительный соленоид.

Остановимся на промежуточном ЕНЭ. ГИН и ГИТ характеризуются временами импульсов во много раз большими времени пробега ЭМ волной размера установки. Формирующая линия (ФЛ), в отличие от ГИН и ГИТ, передает энергию в нагрузку в волновом режиме, т. е. за время, определяемое временем пробега электромагнитной волны вдоль линии. Поясним это на следующем простом примере. Рассмотрим отрезок коаксиального кабеля длиной  $L$ . Время распространения волны по кабелю составляет  $t_p = L/v$ , где  $v = c/(\epsilon\mu)^{1/2}$  – скорость распространения волны по кабелю. Пример генератора на ФЛ показан на рис. 1. 6.

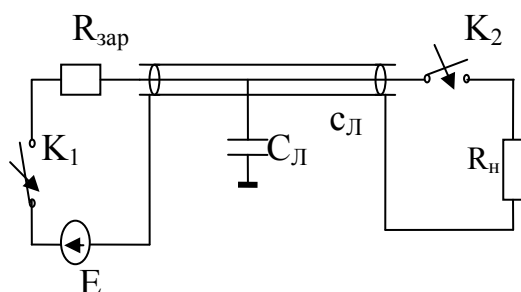


Рис. 1. 6. Схема генератора на формирующей линии

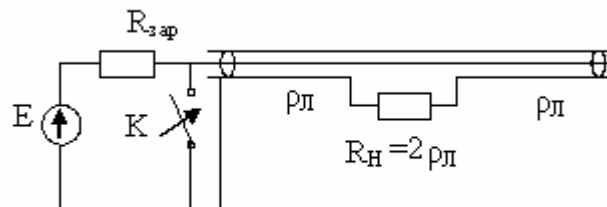


Рис. 1. 7. Схема генератора на двойной формирующей линии

Пусть линия заряжена от источника напряжением  $E$  (замыкание ключа  $K_1$ ) через резистор  $R_{зар}$  за время  $t_{зар} \sim R_{зар} * C_{Л} \gg t_p$ . При этом линия ведет себя как обычный цилиндрический конденсатор с сосредоточенными параметрами.

В случае замыкания ключа  $K_2$  на нагрузку  $R_n$  порядка  $c$  (волновое сопротивление линии) за время  $t_k < t_p$  характер процесса будет чисто волновой. В частности, если  $R_n = \rho$  (согласованный режим), то  $t_n = 2L/v$ ,  $U_{R_n} = E/2$ . Главный недостаток одинарной ФЛ – уменьшение выходного напряжения в 2

раза. Для преодоления этого недостатка был создан генератор на двойной ФЛ, впервые рассмотренный Блюмляйном (рис. 1. 7).

ФЛ бывают полосковыми (плоскими) и коаксиальными. Волновое сопротивление коаксиальной линии с диаметрами внешнего D2 и внутреннего D1 электродов:

$$\rho = (60/\varepsilon^{0.5}) * \ln(D2/D1).$$

В настоящее время для создания промежуточных ЕНЭ используют ФЛ с жидкими диэлектриками, в основном на основе воды ( $\rho = 80$ ) и трансформаторного масла ( $\rho = 2, 3$ ). Ранее было показано, что при уменьшении длительности импульса возрастает электрическая прочность жидкой изоляции, при временах менее 1 мкс электрическая прочность достигает 300 и 150 кВ/см, для масла и воды соответственно. Это позволяет существенно увеличить удельную энергоемкость и сократить размеры промежуточного ЕНЭ. Линии на основе воды более энергоемки, чем на основе масла (9 и 80 Дж/л, соответственно), однако они имеют меньшее удельное сопротивление и требуют более быстрой зарядки. При этом в линиях используется вода, очищенная по специальной технологии – деионизованная и дегазированная.

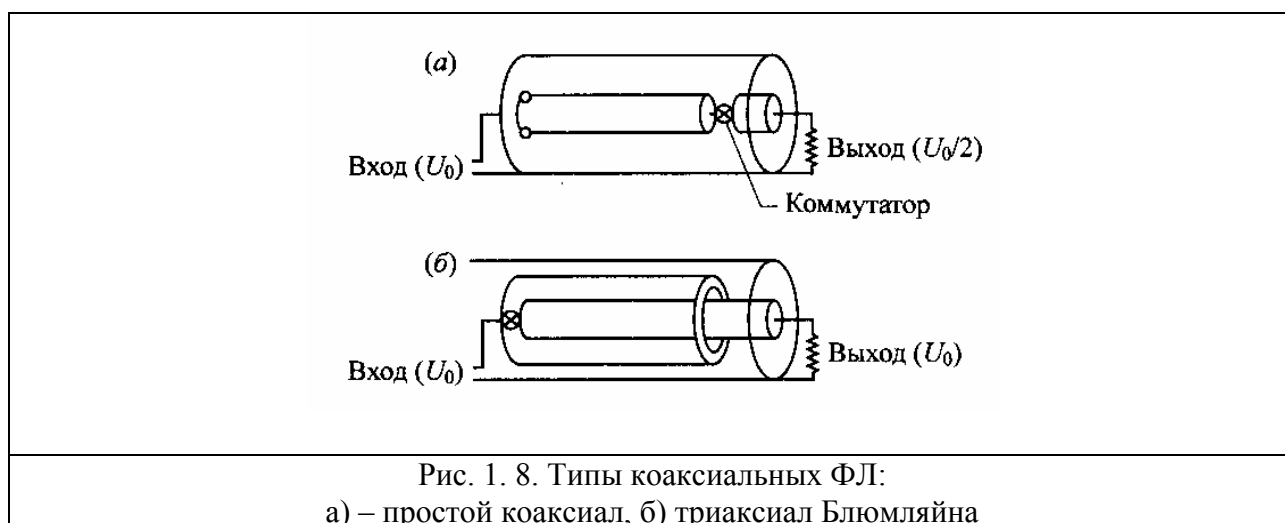


Схема конструкций промежуточного ЕНЭ показана на рис. 1.8. Одна из главных проблем этой конструкции состоит в создании разрядника на полное выходное напряжение. Обычно для зарядки ФЛ используют генераторы Маркса или импульсные трансформаторы.

#### 1. 4. Коммутаторы для сверхмощных генераторов

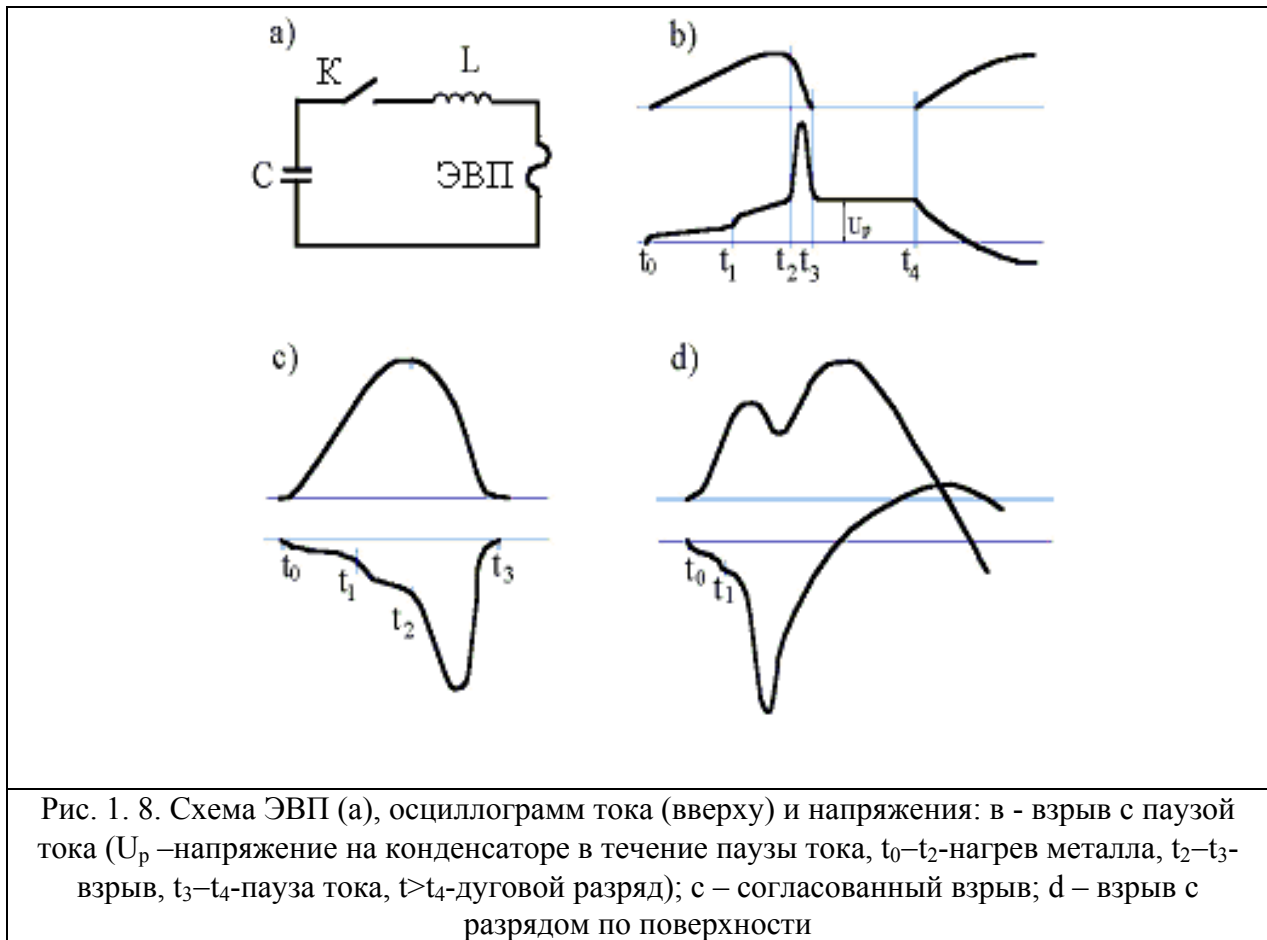
Принципиально разрядники для МИТ не отличаются от обычных, но конструктивно они имеют большие габариты и стоимость. Прерыватели же для промежуточных ИНЭ отличаются принципиально.

### 1. 4. 1. ЭВП-прерыватели

Явление электрического взрыва проводников (ЭВП) известно более двухсот лет (первая работа выполнена в 1774 году Нернстом) и состоит в следующем. Когда импульс тока высокой плотности ( $10^4$ – $10^6$  А/мм<sup>2</sup>), обычно получаемый при разряде батареи конденсаторов, переходит через проволоку, наблюдается взрывное разрушение металла, сопровождаемое яркой вспышкой света, ударной волной, диспергированием металла и быстрым расширением смеси кипящих капель металла и пара в окружающую среду. В зависимости от условий взрыва после конденсации образуются частицы с характерным размером от десятков мкм до нескольких нанометров. В процессе ЭВП происходит одновременно несколько разнообразных процессов, которые нелинейно зависят от исходных параметров как контура, так и проводников (материала, диаметра, длины, количества), что существенно затрудняет исследование этого процесса.

Для получения ЭВП требуются источник заданного напряжения, конденсатор, коммутатор, соединительные шины и сама взрываема проволока (рис. 1. 9, *a*), обычно диаметр проволоки в пределах 10–500 мкм. Собственное активное сопротивление контура должно быть пренебрежимо, по сравнению с начальным сопротивлением ЭВП.

Последовательность событий при ЭВП следующая. Когда ключ К замыкается (рис. 1. 9, *a*), заряженный конденсатор С разряжается на ЭВП в цепи с индуктивностью L. При протекании тока проволока нагревается и падение напряжения на ней растет (рис. 1. 9, *b-d*). К моменту  $t_1$  проволока плавится (скачок напряжения в осциллограмме). Затем проволока нагревается в жидком состоянии до момента  $t_2$  (рис. 1. 9, *b, c*), когда ее сопротивление начинает возрастать до  $t_3$ , где проволока теряет металлическую проводимость. Сопротивление ЭВП становится на несколько порядков выше, и ток в цепи обрывается. Возникший при этом импульс напряжения на L цепи может в несколько раз превышать зарядное напряжение конденсатора. Это и есть электрический взрыв, разрушение проволоки и разлет продуктов взрыва в окружающую среду. Затем наступает пауза тока,  $t_3$ – $t_4$ , когда промежуток с продуктами взрыва выдерживает оставшееся на конденсаторе напряжение  $U_p$ . В момент  $t_4$  этот промежуток пробивается (падает давление паров продуктов взрыва), и начинается дуговой разряд через продукты взрыва.



В зависимости от начальных условий ( $U_0$ ,  $L$ , проводников (их материала, диаметра, длины, количества)) процесс ЭВП протекает по-разному, и можно наблюдать осциллограммы, в которых отдельные стадии отсутствуют: согласованный взрыв (рис. 1. 9, с) или сливаются друг с другом – взрыв без паузы тока (рис. 1. 9, d).

При постоянных параметрах увеличение длины проводников  $l$  приводит к увеличению паузы тока, а уменьшение – к шунтированию газовым разрядом. Чем выше возникающее перенапряжение при обрыве тока, тем больше должна быть его длина ( $\sim 1\text{МВ/м}$ ). длина проводника при нулевой паузе тока называется критической  $l_k$ .

Существенным недостатком прерывателя на основе ЭВП являются достаточно большие потери энергии (до 40 %) на их электрический взрыв. Для сверхмощных систем это очень много. Кроме того, эти прерыватели принципиально однократны.

### 1. 4. 2. Плазменные прерыватели тока

В настоящее время при создании МИТ нашли применение плазменные прерыватели тока (ППТ). Принцип действия ППТ основан на эрозии плазмы в вакууме под воздействием протекающего через нее тока, приводящей к существенному изменению ее проводимости. ППТ могут успешно работать только при больших токах (более кА).

Первые работы по ППТ были выполнены в СССР Плютто. В настоящее время имеется два основных типа ППТ: наносекундный – для обострения мощности МИТ и микросекундный – для использования с промежуточными ИНЭ.

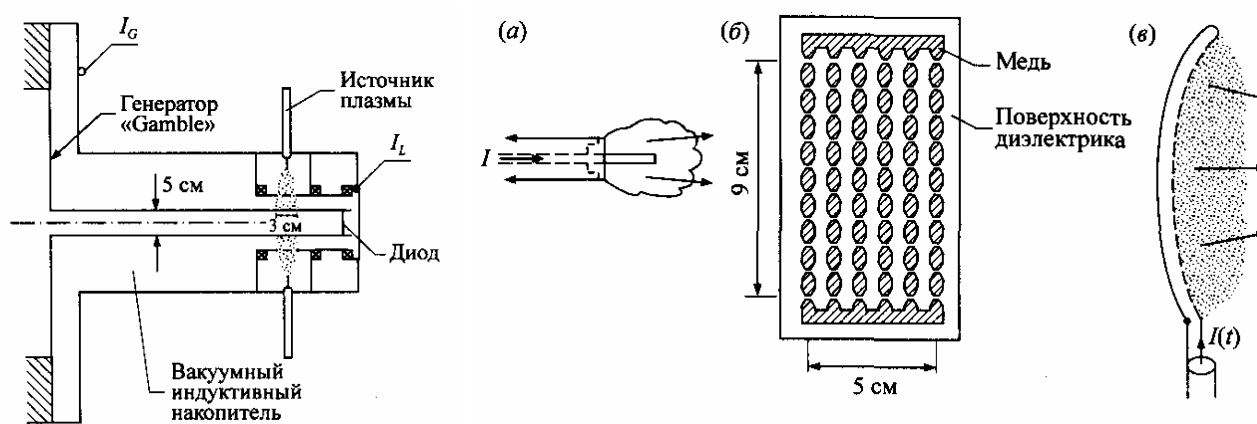


Рис.1. 10. Схема наносекундного ППТ (слева) и схема плазменных пушек: а) коаксиальная, б) с поверхностным пробоем, в) движение плазмы от пушки б – типа

Схема наносекундного ППТ показана на рис. 1. 10. Первоначально (за 1–10 мкс до прихода основного импульса) создается плазма между электродами (коаксиальными или планарными) с помощью плазменных пушек. Плазма создается посредством электрического пробоя по поверхности диэлектрика в различной геометрии (рис. 1. 10, а-в).

Для питания пушек используется специальный генератор. В настоящее время не существует единой теории ППТ. Однако современные представления о его работе следующие.

При протекании тока основного импульса для переноса тока в вакууме используются носители из инжестрированной в зазор плазмы. По мере увеличения силы тока число носителей уменьшается, в результате чего у поверхности катода образуется двойной слой. Из этого слоя удаляются электроны и образуется плоский слой, обладающий свойствами вакуумного диода, ограниченный поверхностью катода и краем плазмы. Катод становится ограниченным пространственным зарядом эмиттером электронов со взрывной эмиссией, индуцированной плазмой. Ионы из введенной плазмы уменьшают отрицательный заряд и позволяют увеличить плотность тока ионов, по

сравнению с током Ленгмюра-Чайлда, который для одномерного потока зарядов составляет:

$$j_i = 1.86(4\epsilon_0/9)(2e/m_i)^{0.5}(U^{3/2}/d^2), \quad (1.3)$$

при этом плотность тока электронов:

$$j_e = (m_i/m_e)^{0.5} j_i, \quad (1.4)$$

где  $m_i, m_e$  – массы покоя ионов и электронов,  $e$  – заряд электрона,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $U$  – напряжение на слое,  $d$  – толщина слоя.

Если ток продолжает увеличиваться, поток ионов из пушек оказывается недостаточным для поддержания биполярного тока на границе раздела плазмы. Дополнительный поток ионов образуется за счет распада плазмы, что приводит к увеличению толщины двойного слоя, в результате чего эффективное сопротивление размыкателя растет и, за счет наличия индуктивности контура, растет напряжение на слое.

При дальнейшем увеличении тока траектории электронов в области переключения искривляются собственным магнитным полем. Размыкание происходит, когда поток электронов через зазор превышает критическое значение тока для магнитного экранирования:

$$I_c = 8500G((u/c)/(1-(u/c)^2)^{0.5}), \quad (1.5),$$

где  $G$  – геометрический фактор,  $u, c$  – скорости электронов и света.

После магнитного запираания потока электронов поток ионов продолжается, т. к. для его запираания необходимо поле в  $(m_i/m_e)^{0.5}$  раз большее. Однако плотность тока ионов относительно мала и расширение слоя продолжается до полного распада плазмы и прерывания тока. Необходимо отметить, что полного прерывания тока не происходит, как, например в ЭВП, – импеданс ограничивается током ионов. Это один из главных недостатков ППТ.

В механизме размыкания ППТ выделяют три стадии: проводимости, эрозии и магнито-изолированный диод.

### 1. 4. 3. Взрывные прерыватели тока

Другой тип размыкателей, используемый с ИНЭ – взрывной. Принцип его работы основан на механическом разрушении токопровода за счет энергии ВВ. В образовавшемся межэлектродном зазоре возникает дуга, гашение которой приводит к прерыванию тока. Взрывные размыкатели тока (ВРТ) – получили распространение в высокоэнергетических системах, а также для надежного аварийного отключения мощных потребителей (электролизеров, аккумуляторных батарей) при коротком замыкании. ВРТ компактны, позволяют длительно проводить большой ток (0, 2МА) и обрывать его за время 10–100 мкс, при напряжении до 50 кВ.



По сравнению с ЭВП они имеют следующие преимущества: не расходуют энергию контура, могут длительно проводить ток, не снижают проводимость контура. Точность синхронизации ВРТ достигает 1 мкс. Конструктивно ВРТ различаются на системы (рис. 1. 11): с гашением дуги в свободном объеме и с гашением дуги в замкнутом объеме (в том числе с кумулятивными выемками). Вторая конструкция сложнее, но обеспечивает большие напряженности электрического поля ( $3 \cdot 10^4$  и  $8 \cdot 10^6$  В/м) и скорости роста напряжения ( $7 \cdot 10^6$  и  $8 \cdot 10^{10}$  В/с, соответственно).

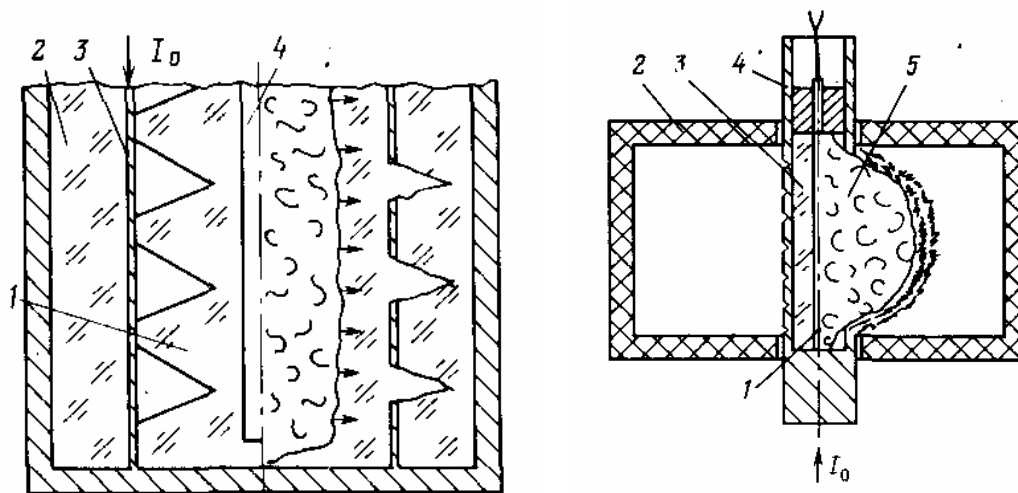


Рис.1. 11. Схема взрывного размыкателя: с гашением дуги в свободном объеме (слева: 1 – заряд ВВ, 2 – защитная камера, 3 – парафин, 4-токопровод, 5 – продукты детонации) и с гашением в замкнутом объеме с кумулятивными выемками (справа: 1 – полиэтиленовый цилиндр, 2 – полиэтиленовый блок, 3 – токопровод, 4 – заряд ВВ)

За счет конструкций, в которых происходит гашение дуги продуктами детонации, удалось существенно улучшить характеристики. В настоящее время созданы ВРТ, позволяющие коммутировать ток до 7 МА со скоростью роста напряжения  $6 \cdot 10^{11}$  В/с.

## 2. Современные сверхмощные генераторы

### 2. 1 Генераторы по схеме ГИН-ФЛ

Первые мощные установки имели схему ГИН-ФЛ – нагрузка. Главными недостатками этой схемы являются высокая стоимость и наличие предимпульса. Мощные ГИН, уровня 0, 5 МДж и выше, имеют модульную конструкцию и состоят из секций, которые собираются параллельно. Серьезная проблема состоит в том, чтобы синхронизировать запуск секций с точностью не хуже 50 нс.

Рассмотрим схему таких установок на примере самой мощной в настоящее время – РВФА-II. Внешний вид установки показан на рис. 2. 1 и 2. 3.

Установка РВФА-II имеет внешнее кольцо из 36 ГИН Маркса (рис. 2. 2) по 360 кДж (13 МДж) с выходным напряжением 6 МВ. Секции опущены в бак диаметром 109 футов (33, 2 м) и высотой 20фут (6 м). Каждый модуль ГИН нагружен на ФЛ (рис. 2. 3), которая формирует импульс 3 МВ, 42 нс на нагрузке 2, 16 Ом.

Разрядники элегазовые с искажением поля. ФЛ – водяные погружены в бассейн из деионизированной воды. ФЛ коммутируется газовым разрядником с лазерным запуском на передающие линии.

Установка позволяет получать мощность до 200ТВт при напряжении до 30 МВ. Установка используется для исследования по управляемому термоядерному синтезу. Работает на ионный диод или лайнер.

По аналогичному принципу в СССР была построена установка Ангара-5 (рис. 2. 5). Компоновка установки отличалась от РВФА-II тем, что каждый модуль, состоящий из ГИН и ФЛ, был в отдельном корпусе и представлял из себя ускоритель электронов на 2 МэВ и током 0, 8 МА при длительности 85 нс. Планировалась установка 48 модулей в два яруса (подобно РВФА-II), но реально по финансовым причинам было установлено 8 модулей.

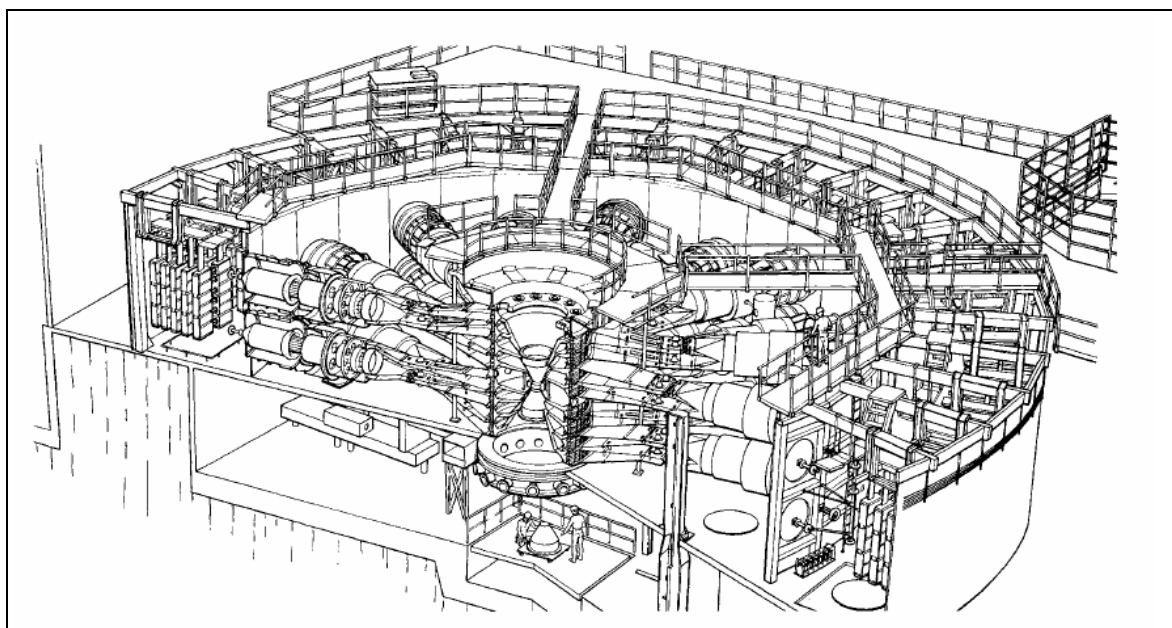


Рис.2. 1. Схема установки РВФА-II

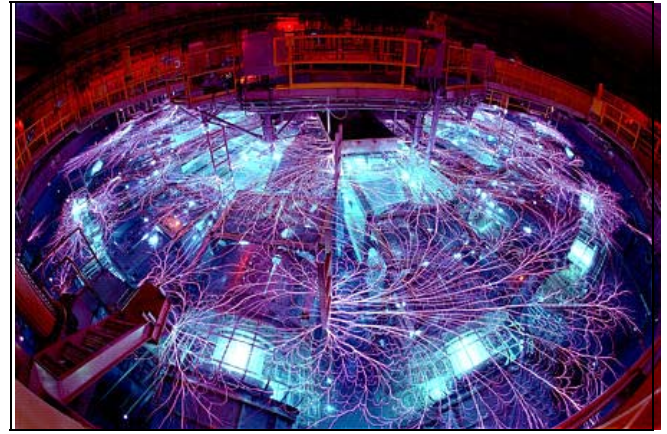
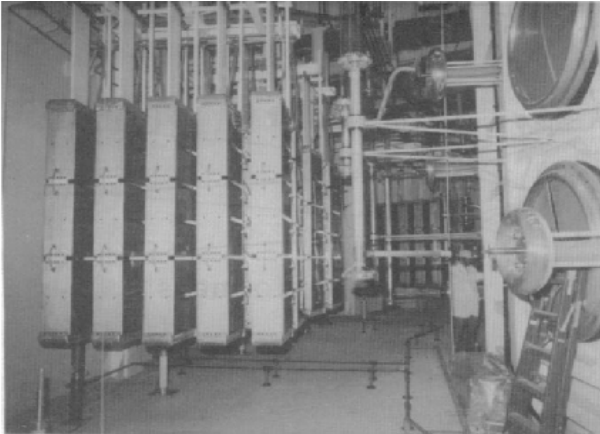


Рис. 2. 2. Внешний вид секции ГИН РВФА-II

Рис. 2. 3. Фото РВФА-II в момент выстрела

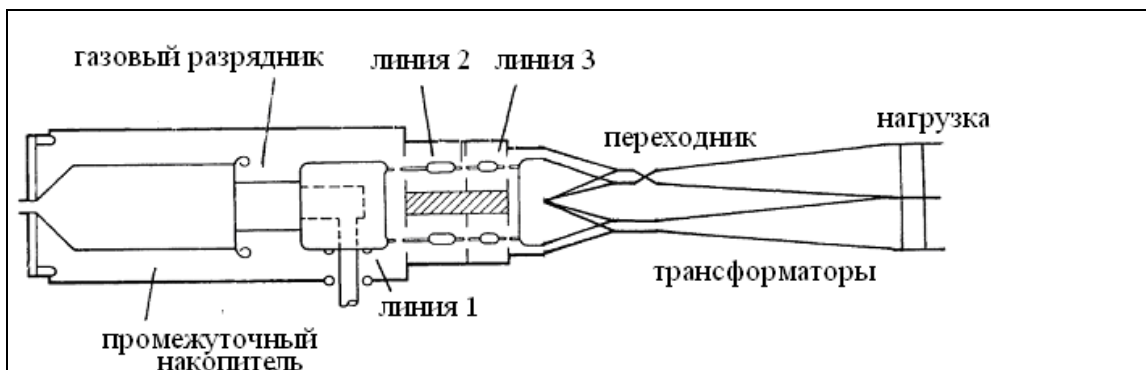


Рис.2. 4. Схема ФЛ установки РВФА-II



Рис. 2. 5. Фото установки Ангара-5

На установке Ангара-5 достигнута мощность до 5 ТВт при токе до 6 МА. Установка используется для обжата лайнеров.

## 2. 2 Установки по схеме ИТ-ФЛ

Другая схема, которая широко используется для создания МИТ и коммерческих ускорителей, состоит в использовании импульсного трансформатора (ИТ) для зарядки ФЛ. Этот путь позволяет иметь первичный ЕНЭ на существенно более низкое напряжение, однако требует дополнительного устройства – ИТ.

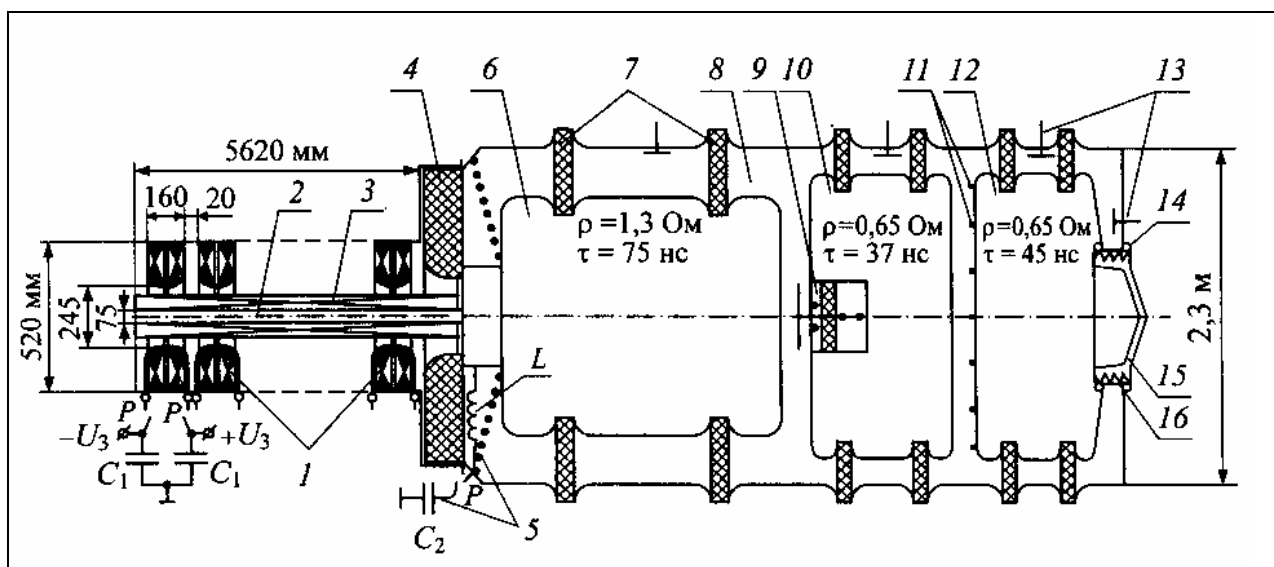


Рис. 2. 6. Схема установки СНОП-3:

1 – 24 индуктора, 2 – внутренний токопровод, 3 – глицериново-пленочная изоляция, 4 – проходной изолятор глицерин/вода, 5 – разделительные индуктивности и конденсаторы схемы размагничивания сердечника, 6- промежуточный ЕНЭ, 7 – опорные изоляторы, 8 – водная изоляция, 9 – управляемый многоканальный коммутатор, 10 – ФЛ, 11 – неуправляемый многоканальный коммутатор, 12 – передающая линия, 13 – емкостные датчики напряжения, 14 – датчик тока, 15 – блок нагрузки, 16 – вакуумный изолятор

Линейный ИТ отличается тем, что состоит из набора секций, каждая из которых имеет один первичный и вторичный виток. Каждая секция имеет свой магнитопровод. Внутри магнитопровода линейного ИТ проходит металлический стержень, который вместе с корпусом ИТ образует вторичный виток линейного ИТ. Этот стержень изолируется пленочной изоляцией с глицериновой пропиткой, выдерживающей электрическое поле около 1 МВ/см. Таким образом вторичные контуры ИТ соединены последовательно и напряжение, индуцируемое первичными обмотками на стержне, суммируется. По такой схеме выполнен генератор СНОП-3 (рис. 2. 6).

Линейный ИТ заряжает промежуточный ЕНЭ (1, 3 Ом, 75 нс) до 2МВ за 1, 3 мкс, из накопителя в ФЛ энергия передается за 300 нс резонансно, т.е. длина ФЛ в 2 раза меньше промежуточного ЕНЭ (2 и 4 пробега волны). ФЛ разряжается на передающую линию, которая соединена с нагрузкой – лайнером (рис 2. 7).

Дальнейшим развитием схемы стала установка МИГ (табл. 2. 1), в которой используются ППТ и ЭВП прерыватели.

Самой мощной с мире системой, созданной на основе линейного ИТ, является ускоритель Гермес-3 (Hermes III). Схема установки показана на рис. 2. 8. Ускоритель имеет напряжение 20 МВ на выходе при токе до 800 кА и длительности 40 нс. Ускоритель предназначен для радиационных испытаний и обеспечивает мощность дозы  $5 \cdot 10^{12}$  Р/с в цилиндре с площадью основания  $500 \text{ см}^2$ .

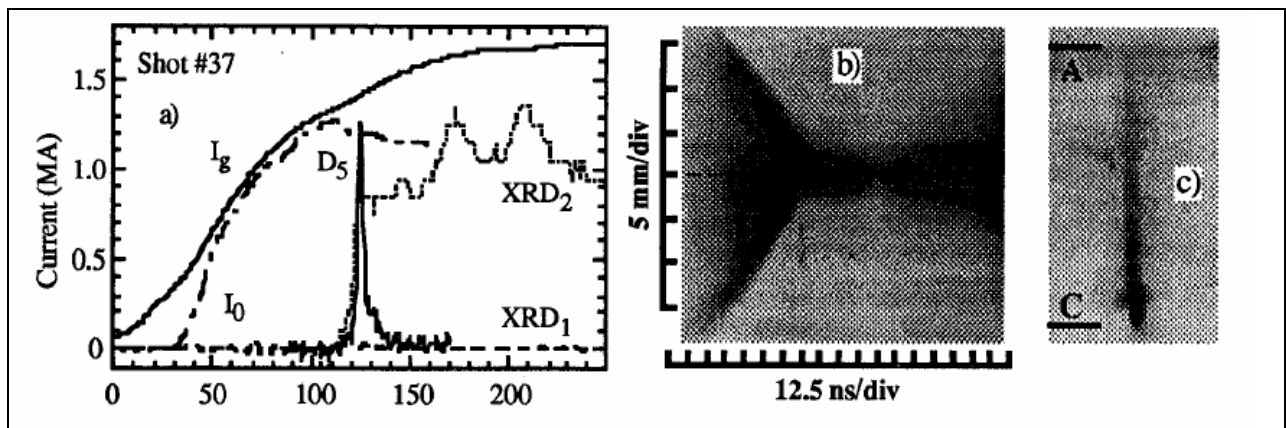


Рис. 2. 7. Обжатие лайнера (20 мкм Al) на установке СНОП-3:  
а) Осциллограммы, б) ЭОПограмма сжатия, с) Обскурrogramма плазмы (фильтр 20 мкм Cu)

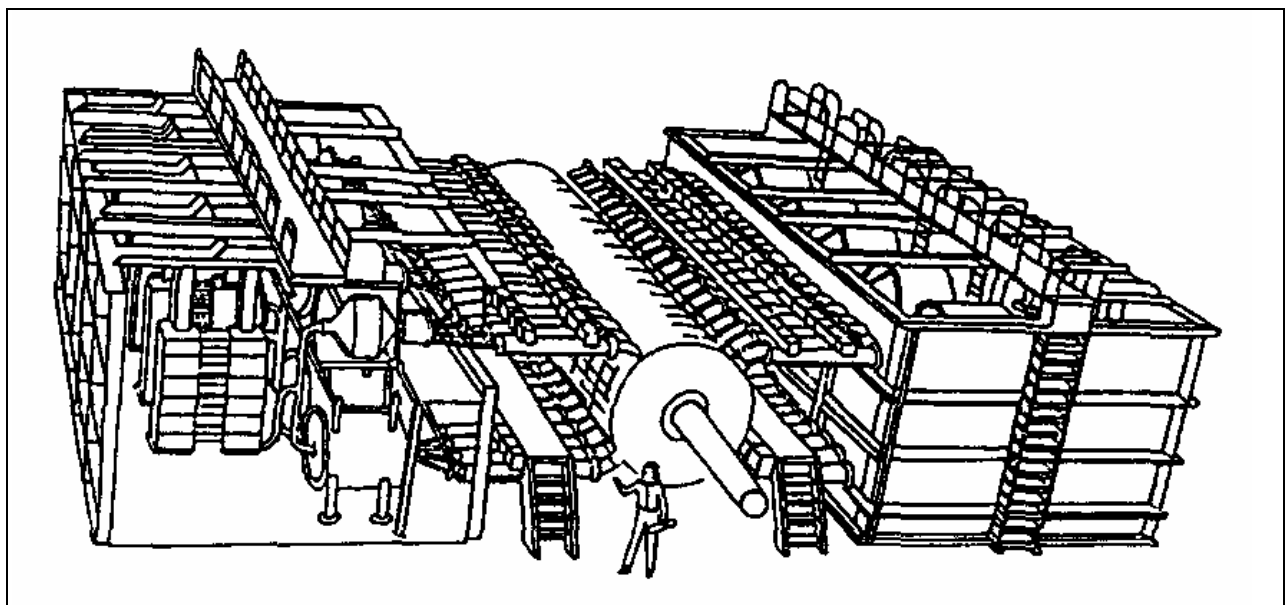


Рис. 2. 8. Схема установки Гермес-3

Схема содержит 20 секций линейного ИТ, причем на каждую секцию ИТ разряжается водяная ФЛ, пара которых заряжается от ГИН с напряжением 2, 4 МВ (всего 10 по 156 кДж). ФЛ коммутируются разрядниками (с лазерным запуском по 20 волоконным трактам) с разбросом 5 нс. Особенность

конструкции в том, что сборным электродом ИТ (длина 12, 8 м) является вакуумная линия с магнитной самоизоляцией (собственное магнитное поле закручивает электроны вдоль катода). Для сердечников ИТ используется аморфное железо.

Более простая конструкция секции ЛТД-100 (рис. 2. 9) разработана в Институте сильноточной электроники СО РАН на конденсаторах Maxwell 31165 (100 кВ, 40 нФ, 25 нГн). Используются 2 слоя по 9 конденсаторов, каждый из конденсаторов заряжается разнополярно до 100 кВ. Ступень может работать на нагрузку 0, 4 Ом и обеспечивает передачу энергии за 125 нс при токе 380 кА. Секции можно соединять последовательно для набора напряжения и параллельно для увеличения тока.

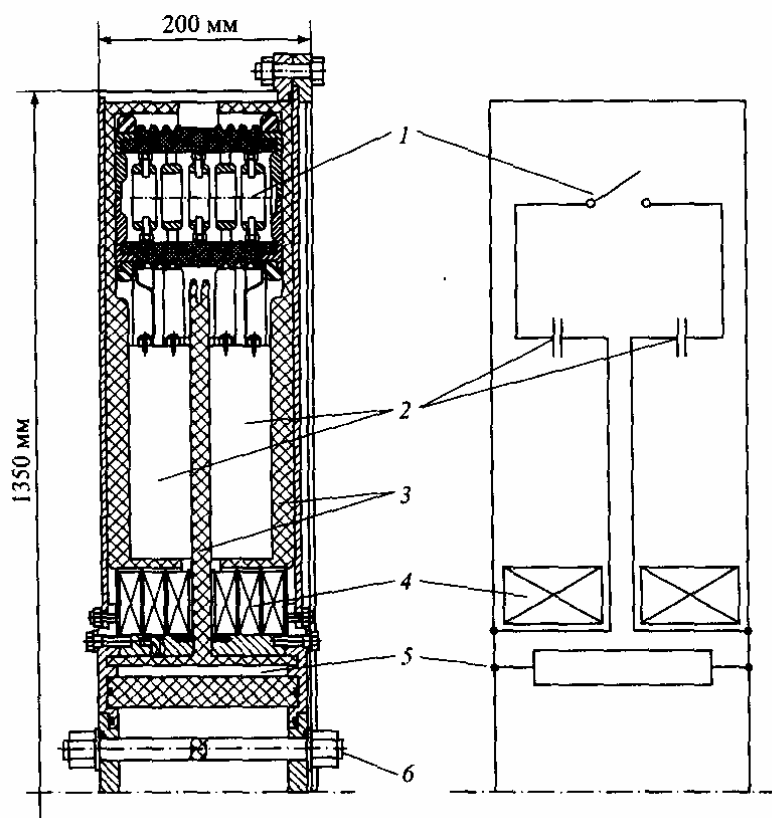
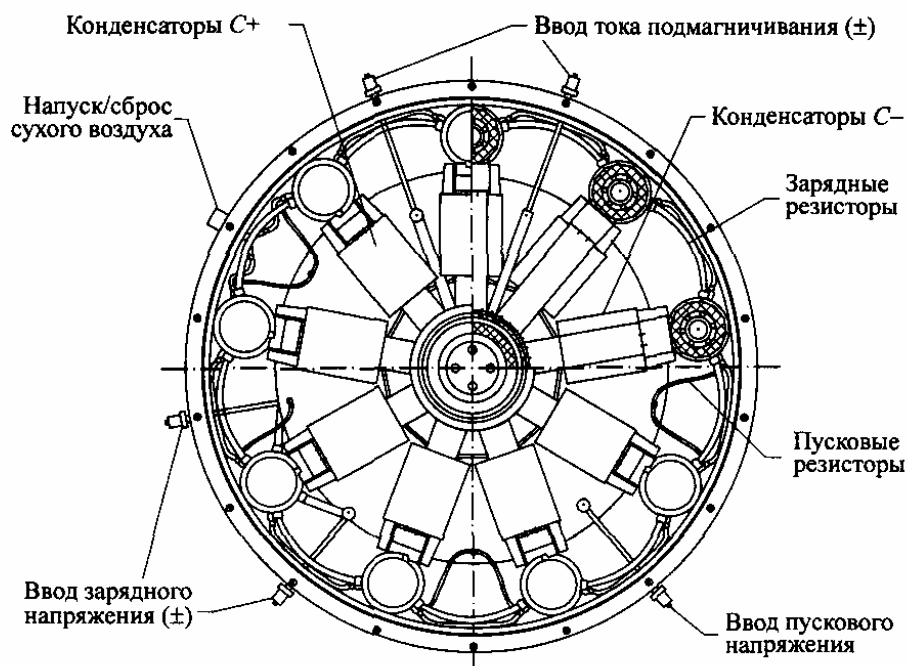


Рис. 2. 9. Секция ЛТД-100 (вид с торца, разрез и электрическая схема):  
 1 – разрядник, 2 – конденсаторы, 3- полиэтиленовая изоляция, 4 - сердечник, 5 – нагрузка,  
 6 – шпилька

### 2. 3. Генераторы по схеме ГИН-ППТ

Первые работы по наносекундному ППТ были выполнены в США на установке Proto-1 (Сандийские национальные лаборатории – SNL) для устранения предымпульса (30 кВ) от промежуточного ЕНЭ-ФЛ. Уровень напряжения 2 МВ, тока 75 кА. Работы были продолжены на Gamble-1 при токе до 250 кА и Python при токе до 1 МА. Типичное значение концентрации плазмы  $10^{13}$ , времени отключения 5 нс, скорости тока до  $3 \cdot 10^{13}$  А/с и скорости напряжения при размыкании  $10^{15}$  В/с. Время ввода энергии в ППТ составляло до 100 нс. Схема микросекундного ППТ приведена на рис. 2. 10.

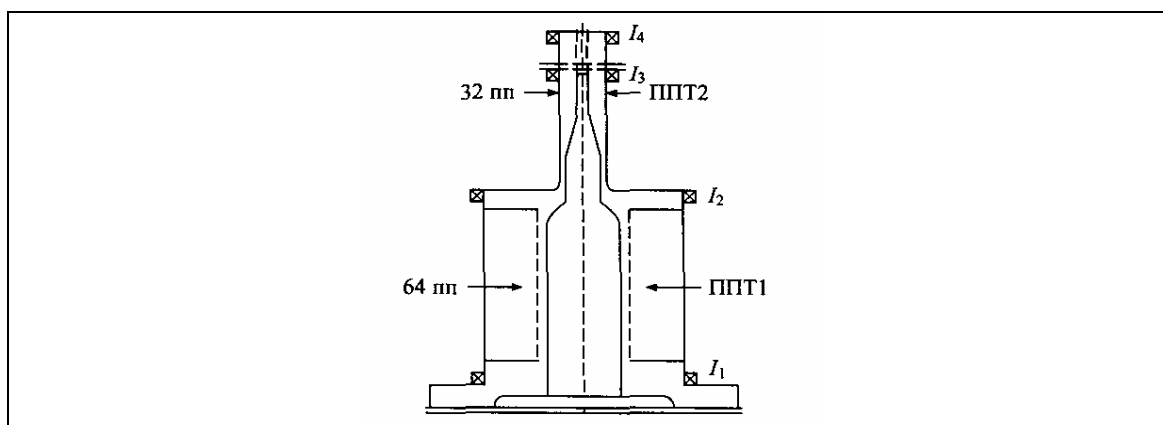


Рис. 2. 10. Схема микросекундного ППТ

Работы по микросекундному ППТ были начаты в ИСЭ СО РАН на установках Гамма и ГИТ-4 (60 кВ, 2 МА, 3, 4 ТВт) (табл. 2. 1). Использовалась как однокаскадная, так и двухкаскадная схема усиления мощности. При этом время ввода энергии достигало 1 мкс.

Параллельно в США шли работы на установке HAWK, близкой по параметрам к ГИТ-4.

Установка ГИТ-12 (рис. 2. 11) – это один из мощнейших в мире физических комплексов. Выполнено устройство по схеме ЕНЭ (масляный ГИН Маркса в 12 ступеней с искровыми разрядниками), плюс промежуточный ИНЭ, плюс ППТ. Комплекс предназначен для исследования высокотемпературной плазмы, получаемой при сжатии газовых и многопроволочных лайнеров. Рентгеновское излучение плазмы имеет энергию (температуру) более 100 кэВ, при мощности до 300 ГВт и энергии до 60 кДж. Установка имеет многомодульную компоновку, диаметр модулей – 22 м. В эксплуатации с 1992 г.



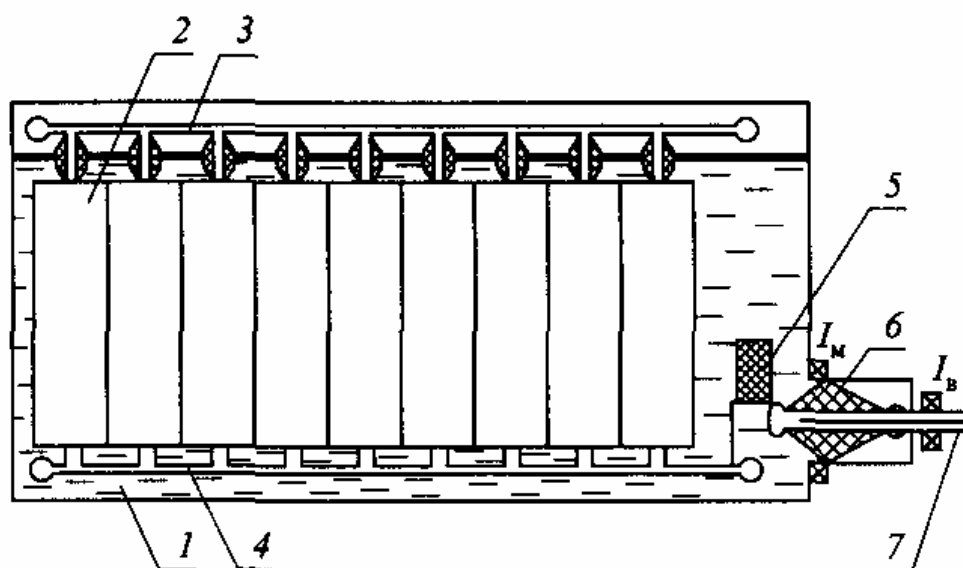
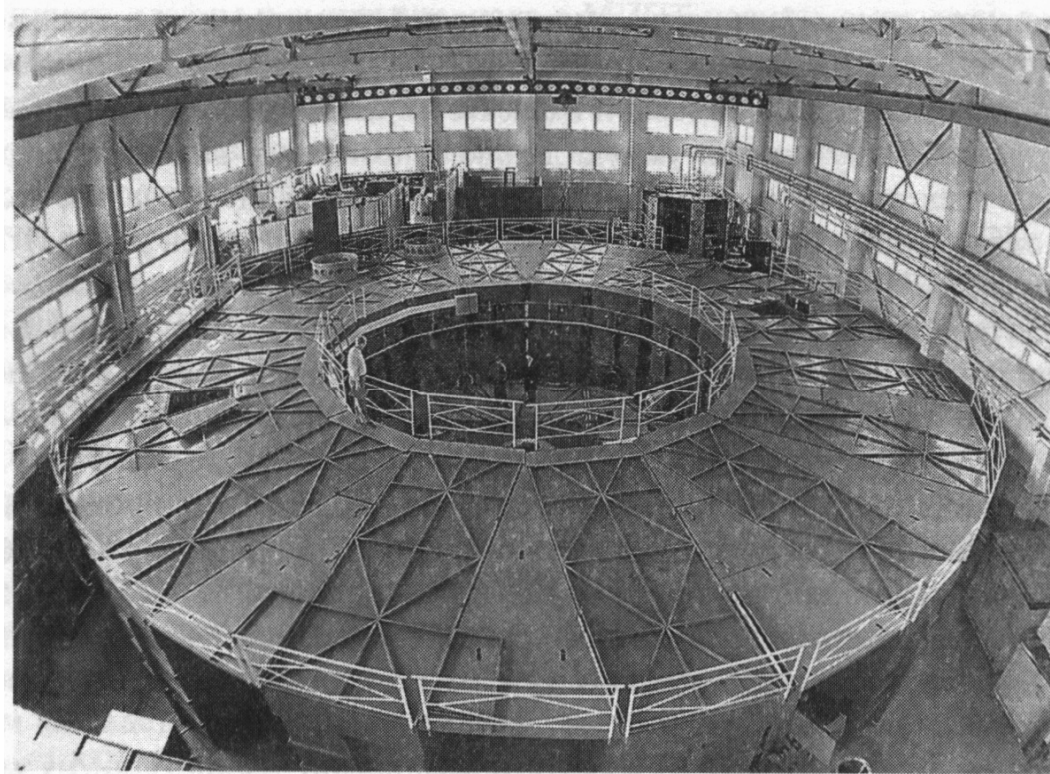


Рис. 2. 11. Генератор ГИТ-12: внешний вид (сверху) и схема секции:  
 1 – бак с трансформаторным маслом, 2 – секции – генераторы Маркса, 3- схема запуска и синхронизации, 4- сборный электрод, 5 – демпфирующий резистор, 6 – проходной изолятор (масло/вакуум), 7 – вакуумная линия

Таблица 2. 1

## Основные характеристики импульсных генераторов ИСЭ СО РАН

Параметр	ГАММА	ГИТ-4	ГИТ-8	ГИТ-12	ГИТ-16 (проект)	СНОП-3	МИГ	СГМ
Напряжение, МВ	2	2	2	2	~2	1	6	1
Запасаемая энергия, МДж	1	2	3,3	5	6, 8	0,2	0, 35	0, 2
Ток в нагрузке, МА	0, 3	2	4, 2	6, 2	7, 6	1, 5	2, 5	1, 5

В США имеется установка АСЕ-4 с микросекундным ППТ, по схеме близкой к ГИТ-4, которая имеет энергозапас 4 МДж, напряжение до 1, 2 МВ, ток до 3, 7 МА и время ввода 1, 05 мкс.

### 3. Элементы схем формирования импульсов

#### 3.1. Высоковольтные конденсаторы

Высоковольтные конденсаторы предназначены для длительного (в течение минут) накопления энергии и ее быстрого вывода. Импульсные конденсаторы работают в условиях высокой напряженности электрического поля, поэтому к используемому в них диэлектрику предъявляются повышенные требования, как по электрической прочности, так и стабильности характеристик. В настоящее время для формирования высоковольтных импульсов наиболее широко применяются следующие типы конденсаторов:

1. Керамические, производства завода «Прогресс», г. Ухта, типа КВИ, фирмы «MuRATA» – серий DHS, DCT, фирмы «Morgan Electro Ceramic» серия K3500 и K2500, конструктивно представляющие собой керамическую основу, на которую напылены электроды (серебряные), к которым припаяны выводы для подключения.

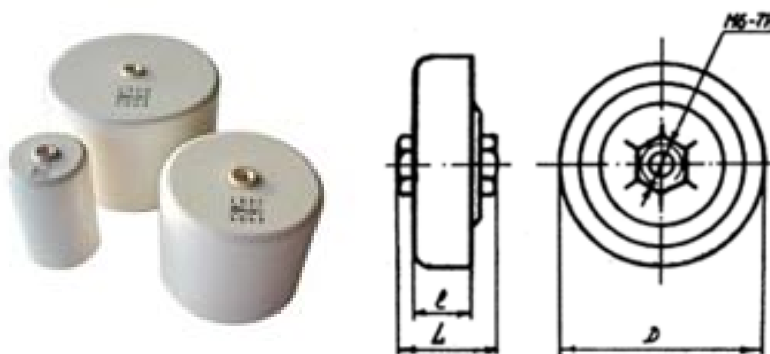


Рис. 3. 1. Внешний вид керамических конденсаторов «MuRATA» – серий DHS (слева) и рисунок конденсаторов КВИ-3

2. С бумажным и комбинированным (полипропилен) диэлектриком с пропиткой касторовым маслом (рис. 3. 2), эти конденсаторы набираются из секций, соединенных последовательно-параллельно на нужное напряжение и емкость.

Параметры некоторых конденсаторов сведены в табл. 3. 1. и 3. 2.

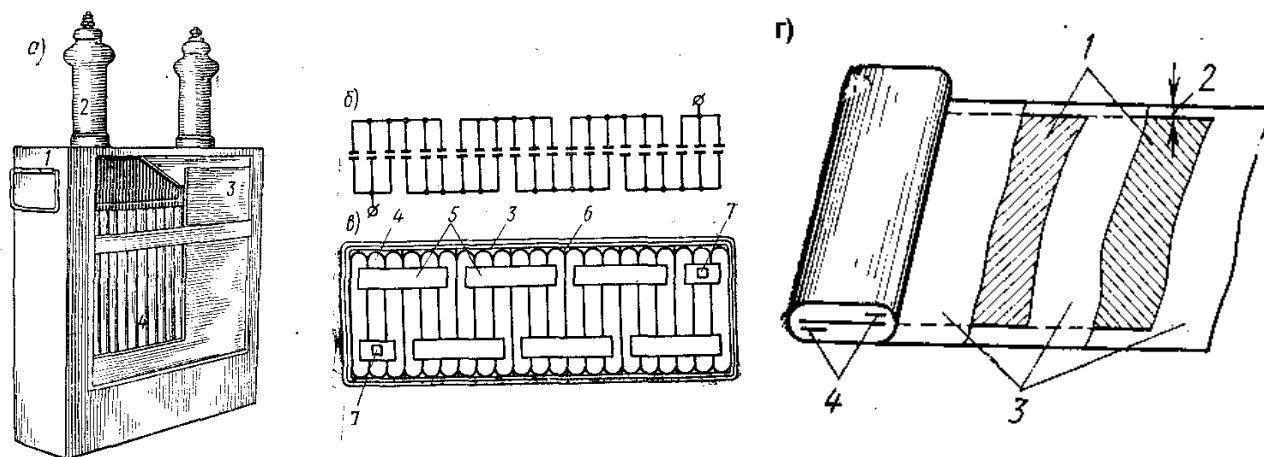


Рис. 3. 2. Устройство высоковольтного конденсатора:

а) внешний вид; б) электрическая схема соединений; в) эскиз пакета секций: 1 – корпус, 2 – выводы, 3 – корпусная изоляция, 4 – секция, 5 – перемычка, 6 – изоляция между группами, 7 – место для пайки отводов; г) эскиз рулонной секции: 1 – электроды из алюминиевой фольги, 2 – закраина, 3 – изоляция из диэлектрика, 4 – выводы

Таблица 3. 1

### Параметры импульсных конденсаторов

Тип конденсатора	Рабочее напряжение, кВ	Емкость, нФ	Запасаемая энергия, Дж	Удельная запасаемая энергия, Дж/дм <sup>3</sup> (Дж/кг)	Индуктивность, нГн	Предельный ток, А	Частота разряда, Гц	Габариты, мм	Масса, кг	Ресурс, имп (ч)	Стоимость, долларов
ИК-50-3	50	3000	3750	56,8 (34, 7)	40	20	1/60	314*31 4*670	108	3*10 <sup>3</sup>	1000
ИК-50-2	50	2000	2500	37,8 (22, 7)	80	16	1	314*31 4*670	110	3*10 <sup>3</sup>	1000
ИК-100-0,4	100	400	2000	90(62, 5)	15	50	1/15	455*15 0*326	32	2*10 <sup>3</sup>	300
ИК-200-0,1	200	100	2000	90 (62, 5)	20	50	1/15	455*15 0*326	32	2*10 <sup>3</sup>	300
КВИ-3	10	3, 3	0, 17	4, 67	4	1	5000	Ш50*1 8	0,09 3	(5000 )	34,5
КВИ-3	12	6, 8	0, 49	3, 5	4	1	5000	Ш90*2 2	0,31 5	(5000 )	34,5
DHS4E4 G202KT 2B	40	2	1, 6	5,66	7	0.5	1000	Ш60*3 6	-	-	126
K2500-07812	28	3	1, 17	3,43	8	0.5	1000	Ш66*4 3	-	-	-
K2500-078	35	2	1,22	3,58	8	1	1000	Ш66*4 3	-	-	-

Таблица 3. 2

## Импульсные конденсаторы «Русская Технологическая Группа 2»

Тип конденсатора	Емкость, мкФ	Масса, кг	Напряжение, кВ	Индуктивность, нГн	Габариты, мм	Ресурс, циклов $10^{-4}$	Удельная энергоемкость, Дж/г	Частота, Гц
КПИ-8-240	240	31	8	85	450x150x326	$10^4$	0,3	1,0
КПИ-16-60	60	31	16	85	450x150x326	$10^4$	0,3	1,0
КПИ-25-26	26	31	25	85	450x150x326	$10^4$	0,3	1,0
КПИ-33-15	15	31	33	85	450x150x326	$10^4$	0,3	1,0
КПИ-30-7	7	31	30	85	450x150x326	$1,2 \cdot 10^6$	0,1	1,0
КПИ-40-4	4	31	40	85	450x150x326	$1,2 \cdot 10^6$	0,1	1,0
КПИ-45-3	3	31	45	85	450x150x326	$1,2 \cdot 10^6$	0,1	1,0
КПИ-100-0,6	0,6	31	100	85	450x150x326	$1,2 \cdot 10^6$	0,1	1,0
КПИ-200-0,15	0,15	31	200	85	450x150x326	$1,2 \cdot 10^6$	0,1	1,0
КПИ-100-0,4	0,4	31	100	85	450x150x326	$1,2 \cdot 10^6$	0,06	1,0
КПИ-200-0,1	0,1	31	200	85	450x150x326	$1,2 \cdot 10^7$	0,06	1,0
КПИ-100-0,3	0,3	31	100	85	450x150x326	$1,2 \cdot 10^7$	0,05	1,0

### 3. 2 Катушки индуктивности

При подборе катушек индуктивности (соленоидов) должны быть обеспечены следующие характеристики.

Высокая динамическая устойчивость, т. е. способность конструкции накопителя противостоять механическим напряжениям, возникающим в результате действия силы Лоренца. Сложность ее расчета связана с необходимостью учета распределения объемных электродинамических сил и анизотропии свойств материалов. Для простого случая длинного цилиндрического соленоида (т. е. длина  $h$  много больше среднего диаметра  $d$ ) суммарная растягивающая сила есть частная производная от энергии по перемещению:

$$F = dL/dr \cdot I_0^2 / 2, \quad (3.1)$$

где  $r$  – радиус обмотки,  $I_0$  – ток в соленоиде.

Тогда средние механические напряжения от радиальных растягивающих сил составят:

$$\sigma = F / (2\pi \cdot s), \quad (3.2)$$

где  $s$  – площадь сечения обмотки.

Масса обмотки составит:

$$M = \gamma \cdot \pi \cdot d \cdot s, \quad (3.3)$$

где  $\gamma$  – плотность материала обмотки.

Удельная энергия, запасенная на единицу массы, составит:

$$w = W/M = (L \cdot I_0^2 / 2) / (\gamma \cdot \pi \cdot d \cdot s) = (L / d \cdot dL/dd) \cdot (\sigma / \gamma). \quad (3.4)$$

С учетом того, что индуктивность такого соленоида:

$$L \sim (\pi/4) \cdot (d^2/h), \quad (3.5)$$

то удельная энергия, запасаемая на единицу длины, в пределе составит:

$$w = 0,5 \cdot (\sigma / \gamma). \quad (3.6)$$

Для медного накопителя  $\sigma = 4,5 \cdot 10^5$  Па,  $\gamma = 8,9$  г/см<sup>3</sup>, поэтому  $w = 2,55$  кДж/кг, для алюминиевого накопителя  $\sigma = 7,5 \cdot 10^5$  Па,  $\gamma = 2,7$  г/см<sup>3</sup>, поэтому  $w = 13,9$  кДж/кг. Другими словами соленоиды имеют значительно более высокую плотность запасаемой энергии (примерно в 100 раз), чем конденсаторы. Это связано с тем, что ограничивающим фактором является механическая прочность материала металла, а не электрическая диэлектрика.

Высокая термическая устойчивость – способность выдерживать тепловые нагрузки, вызванные накоплением электромагнитной энергии. Термическая устойчивость определяется, исходя из температуры допустимого перегрева изоляции (в адиабатическом режиме). При этом:

$$\Delta t = Pa / (M \cdot C_v), \quad (3.7)$$

где  $C_v$  – теплоемкость материала обмотки (для меди 390 Дж/кг·К),

$\Delta t$  – обычно не более 75°C.

Резко улучшить условия термической устойчивости можно при переходе к сверхпроводящим соленоидам. Для них активные потери отсутствуют, поэтому постоянная соленоида близка к бесконечности. Однако

сверхпроводники работают при криогенных температурах, что создает серьезные технические проблемы, в том числе ввода/вывода в них энергии. Кроме того, у сверхпроводящих материалов есть ограничения по амплитуде магнитного поля, при которой происходит срыв.

### 3.3. Коммутаторы

Имеются следующие основные типы высоковольтных коммутаторов: разрядники; тиратроны; тиристоры и реверсивно-включаемые динисторы; плазменные прерыватели тока; электрически взрывааемые проволочки; SOS-ключи; магнитные ключи.

#### 3.3.1. Разрядники

По принципу работы разрядники разделяются на:

- управляемые, т. е. срабатывающие в заданный момент времени от управляющего воздействия (механического – прокол диэлектрика, электрического импульса, оптического или ионизирующего излучения);
- не управляемые, срабатывающие статистическим образом, после достижения на них определенного уровня напряжения.

Управляемые разрядники находят более широкое применение.

Разрядник – это прибор, предназначенный для коммутации электрической энергии посредством электрического пробоя изолирующей среды. На рис. 3.3. приведена кривая Пашена для промежутка с равномерным полем при 20°C.

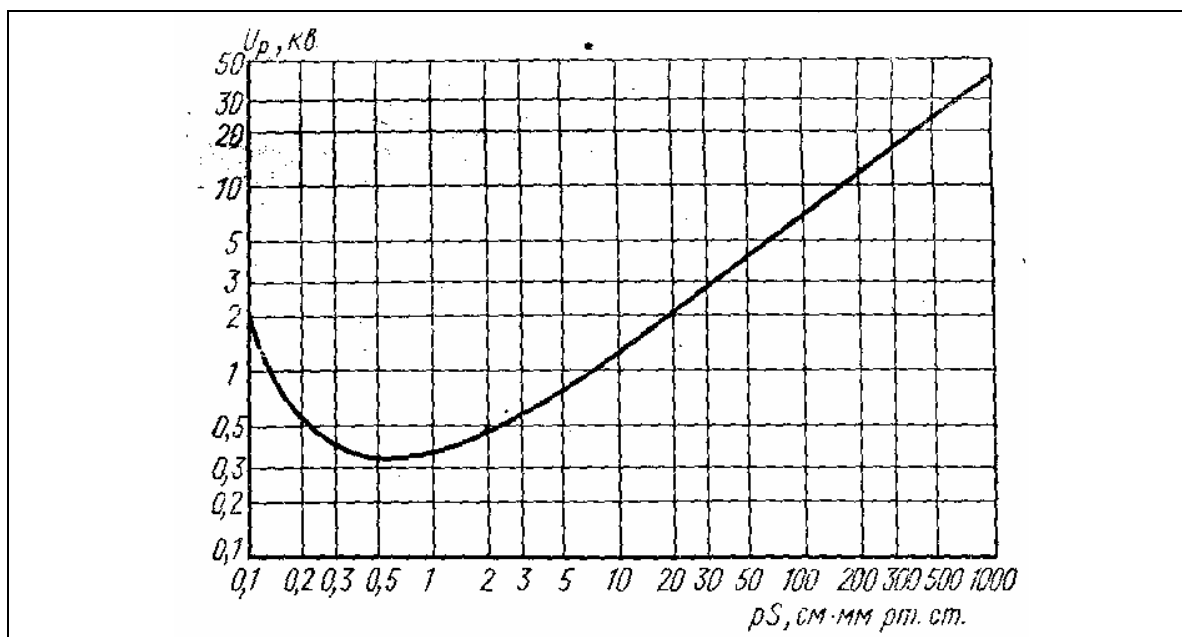


Рис.3.3. Кривая Пашена для воздушного промежутка с равномерным полем при 20°C

Разрядники можно классифицировать по виду диэлектрика:

- 1) разрядники газовые атмосферного и высокого давления (искровые), которые работают в правой части кривой Пашена;
- 2) разрядники низкого давления или вакуумные, которые работают в левой части кривой Пашена;
- 3) разрядники с жидким диэлектриком;
- 4) разрядники с твердым диэлектриком.

Наибольшее распространение к настоящему времени получили искровые и вакуумные разрядники. Достоинства и недостатки различных разрядников приведены в табл. 3. 3.

Таблица 3. 3

#### Достоинства и недостатки различных разрядников

Тип разрядника	Достоинства	Недостатки
Искровые	Простота конструкции, дешевизна, большой диапазон управления за счет изменения давления газа.	Низкий ресурс, эрозия электродов, необходимость продувки газа.
Вакуумные	Малая индуктивность, возможность работы при малых напряжениях коммутации и больших токах, повышенный ресурс.	Сложность конструкции, дороговизна.
Жидкостные	Упрощение конструкции генератора при использовании в качестве тела – изолирующей среды.	Наличие гидроудара, большие потери при коммутации, большая индуктивность канала, изменение свойств жидкости.
Твердотельные	Высокая электрическая прочность, низкая индуктивность	Принципиальная однократность, эрозия электродов, сложность запуска.

Таблица 3.4

#### Параметры искровых разрядников

Продукт	Импульсный ток, кА	Коммутируемая энергия, Дж	Анодное напряжение, кВ	Частота, Гц	Габариты, d x H, мм	Срок службы, Кл
РУ-52	1.1	800	10–25	4	75x170	1000
РУ-65	35/5	37000/1000	16–40	0.002/0.1	99x97	200/500



Таблица 3. 5

## Параметры искровых тригatronных разрядников

Продукт	Габариты, d x H, мм	Частота, Гц	Импульсный ток, кА	Коммутируемая энергия, Дж	Анодное напряжение, кВ	Срок службы, Кл
РТ-53	45x36	0.1/10	10/1.3	60/1.7	0.6-1.6	50/2000
РУ-69	54x36	0.05/10	16/3	400/4	2-4	300/1000
РУ-62	54x36	0.1/50	16/4	300/23	4-10	30/1000

Таблица 3. 6

## Параметры вакуумных разрядников

Продукт	Габариты, d x H, мм	Частота, Гц	Импульсный ток, кА	Коммутируемый заряд, Кл	Анодное напряжение, кВ	Срок службы, Кл (импульсов)
РБУ-63-20	152x214	0.02	63	100	5-45	$10^5$
РБУ-400-20	126x214	0,02	400	400	60	$4 \cdot 10^5$
РБУ-43*	144x195	0,02	10-300	120	30	$(10^4)$

производства Всероссийского электротехнического института, г. Москва

Для запуска искровых и вакуумных разрядников используются три основных принципа (рис. 3. 4):

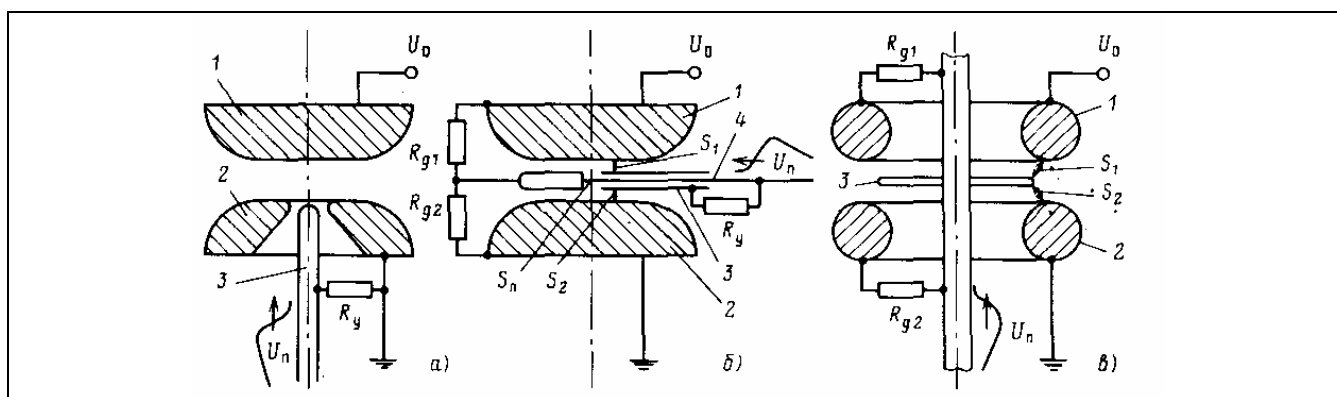


Рис. 3. 4. Управляемые газопроводные разрядники:

а) – тригatron, б) каскадный разрядник с автоподсветкой, в) каскадный разрядник с искажением электрического поля; 1, 2 – основные электроды, 3, 4 – вспомогательные электроды

1. Тригатроны – при подаче на управляющий электрод напряжения  $U_{\text{п}}$  (противоположной полярности основному напряжению  $U_{\text{о}}$ ) происходит усиление поля на кончике управляющего электрода, что вызывает пробой на нем с последующим развитием разряда в основном промежутке, подсвеченным вспомогательным пробоем. Тригатроны позволяют коммутировать постоянное напряжение до 150 кВ при токе до 200 кА с задержкой 20 нс при индуктивности до 100 нГн. Главные недостатки – разрушение диэлектрика управляющего электрода и высокий уровень напряжения запуска.

2. Каскадный разрядник с подсветкой – имеет делитель напряжения, который задает распределение потенциалов в зазорах  $S_1$  и  $S_2$  (обычно равное). При подаче напряжения  $U_{\text{п}}$  на управляющий электрод происходит пробой промежутков  $S_1$ , напряжение  $U_{\text{о}}$  прикладывается к промежутку  $S_2$  и происходит его пробой. Для уменьшения разброса пробоя используется подсветка за счет пробоя вспомогательного промежутка  $S_{\text{п}}$ . Главное достоинство таких разрядников – высокая точность включения.

3. Каскадный разрядник с искажением поля, в котором управляющий импульс подается на промежуточный электрод, расположенный в эквипотенциальной поверхности. Это приводит к искажению поля и пробую. Достоинства – высокий ресурс, малые задержки и возможность секционирования конструкции, что позволит работать на высоких напряжениях.

Если мощные искровые разрядники, как правило, изготавливаются по спецзаказу, то имеется целый ряд искровых (управляемых и неуправляемых) и вакуумных разрядников, выпускаемых промышленностью – серий РО, РУ, РГУ, РВУ (таблицы 3. 4–3. 16).

Управляемый вакуумный разрядник РБУ-63-20 (рис. 3. 5), выпускаемый серийно на Минусинском электротехническом комплексе, имеет систему массивных медных электродов стержневого типа («вложенные пальцы») и отпаянный керамический корпус; работает при давлении  $10^{-4}$  Па, что позволяет получать высокие значения коммутируемого тока при высоком ресурсе.

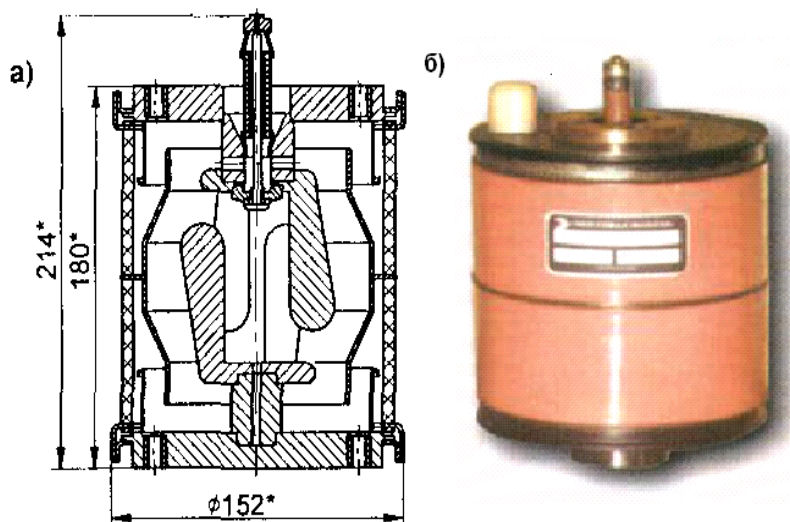


Рис. 3. 5. Устройство (а) и внешний вид (б) разрядника РВУ-63-20

### 3. 3. 2 Тиратроны

Импульсный водородный тиратрон (ИВТ) (рис. 3. 6) применяется в импульсных схемах и обладает высокой стабильностью включения (2–5 нс), малым временем восстановления электрической прочности (десятки мкс) и небольшими потерями на коммутацию (кпд до 98 %).

В отличие от обычных электронных ламп в ИВТ анод так сильно экранируется сеткой, что независимо от потенциала сетки поле анода к катоду не проникает. Отпирание происходит только тогда, когда между катодом и сеткой возбуждается вспомогательный разряд и плотность плазмы в области сетки, в которую проникает поле анода, становится достаточна для распространения проводимости на весь тиратрон (токовое управление). Существенно, что для запираания тиратрона необходим переход напряжения на нем через ноль.

На рис. 3. 7 приведена типовая схема включения ИВТ, а параметры в табл. 3. 7. Отпирание тиратрона происходит после возбуждения вспомогательного разряда между катодом и сеткой, который создает определенную плотность заряженных частиц в щели сетка-катод (это период задержки ИВТ). Анодный ток появляется после того, как концентрация носителей достигнет критической величины (период коммутации). Напряжение на сетке возрастает, затем уменьшается одновременно с падением анодного, ток сетки меняет направление. В период проводимости ток и падение напряжения на тиратроне постоянны, ограничение за счет тока эмиссии катода.

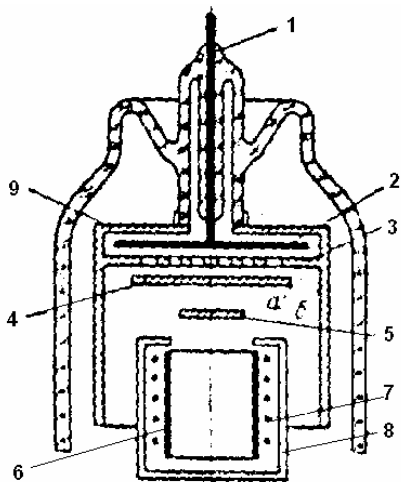


Рис. 3. 6. а) Схема импульсного тиратрона (слева): 1 – ввод анода, 2 – анод, 3 – диск сетки, 4 – экранирующий диск, 5 – верхний экран катода, 6 – эмитирующая поверхность катода, 7 – подогреватель, 8 – тепловой экран катода, 9 – экран; б) внешний вид тиратронов

К недостаткам ИВТ относятся: необходимость создания атмосферы водорода (доли мм рт. ст.), для чего имеется встроенный генератор водорода; наличие накаливаемого катода с высокой эмиссией, что вызывает потребность в большом токе накала (до 200 А). Последний недостаток ликвидирован в псевдоискровых разрядниках (тиратронах с холодным катодом – серии ТП, ТД – табл. 3. 7), в которых для эмиссии используется разряд с полым катодом. Однако этот тип катодов имеет более сложную схему включения.

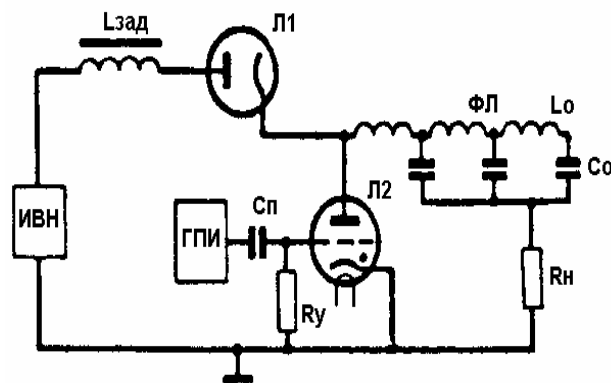


Рис. 3. 7. Схема включения тиратрона:

ИВН – источник высокого напряжения, ГПИ – генератор пусковых импульсов, Л1 – зарядный диод, Л2 – тиратрон, Lзад – зарядный дроссель, ФЛ – формирующая линия

Таблица 3. 7

**Параметры импульсных тиратронов**

Тип	Напряже- ние анода, кВ	Ток анода, кА	Средний ток, А	Ток накала, А	Ресурс	Частота работы, Гц
ТГИ1- 1000/25	25	1	1	20	500 ч	700
ТГИ1- 2000/35	35	2	3	59	1000 ч	330
ТГИ1- 2500/50	50	2,5	4	94	1000 ч	400
ТГИ1- 5000/50	50	5	10	202	1000 ч	125
ТП2- 10к/25	25	10	0,5	2,5	$1 \cdot 10^6$ Кл	2000
ТП2- 10к/50	50	10	0,35	2,5	$1 \cdot 10^6$ Кл	2000
ТП-5к/100	100	5	0,5	2,5	$1 \cdot 10^6$ Кл	500
ТД- 150к/25	25	150	0,5	1,5	$5 \cdot 10^5$ Кл	50
ТД-50к/25	45	50	0,25	1,5	$5 \cdot 10^5$ Кл	50

### 3. 3. 3 Тиристоры и реверсивно-включаемые динисторы

Тиристоры и реверсивно-включаемые динисторы обладают существенными достоинствами, прежде всего высоким ресурсом. Процесс переключения любого мощного полупроводникового (ПП) прибора заключается в заполнении хорошо проводящей электронно-дырочной плазмой (ЭДП) области, которая до этого не содержала в значительном количестве свободных носителей заряда. Такой областью служит область объемного заряда (ООЗ) обратномещенного р-п –перехода, а процесс заполнения ее плазмой осуществляется различными методами. Имеются две практически используемые возможности создания ЭДП в полупроводнике: 1) инжекция носителей через барьеры р-п-переходов и 2) ионизация, которая создается либо разогнанными электрическим полем носителями, либо ионизирующим излучением. Инжекция энергетически выгоднее, т. к. нужно снизить барьер на доли эВ, а при ионизации необходимо преодолеть ширину запрещенной зоны ПП материала (1. 12 эВ для кремния).

**Тиристор** – это ПП управляемый коммутатор, созданный на основе четырехслойной структуры р-n-p-n-переходов. Он состоит из 4 слоев чередующегося типа проводимости (р<sup>+</sup>-N-р-n-структура), образующих три р-n-перехода (рис. 3. 8). При приложении напряжения к клеммам переходы 1 и 3 смещены в прямом направлении (эмиттеры), а переход 2 в запиорном (коллектор). Практически все внешнее напряжение приложено к ООЗ коллектора, большая часть этой области лежит в слабо легированном N –слое. Для включения в цепи пропускают импульс тока управления. Протекание тока приводит к инжекции электронов из сильнолегированного n<sup>+</sup>-слоя через барьер n<sup>+</sup>-р –перехода 1 в р-слой (базу). Из-за высокого сопротивления этого слоя в продольном направлении, инжекция происходит в небольшой области ( $d_0 = 0,1 - 0,2$  мм), прилегающей к границе n<sup>+</sup>-слоя с управляющим электродом. Инжектированные электроны диффундируют через р-базу, доходят до ООЗ и выбрасываются полем в N –базу уже в качестве основных носителей, что понижает барьер р<sup>+</sup>-перехода и инжекцию дырок в N –базу. Эти дырки, попадая в р-базу, вызывают инжекцию электронов и т.д. – процесс открытия пошел. Когда потери носителей (из-за рекомбинации и ухода через барьеры р-n –переходов) становятся меньше поступления, тиристор переходит во включенное состояние и включенная область заполняется ЭДП ( $d_0$ ). Из этой области, называемой областью первоначального включения (ОПВ) ЭДП достаточно медленно ( $0,1 - 0,01$  мм/мкс) распространяется по всей площади прибора. Если не ограничить скорость нарастания тока, то в области  $d_0$  может произойти разрушение прибора из-за высокой плотности тепловыделения.

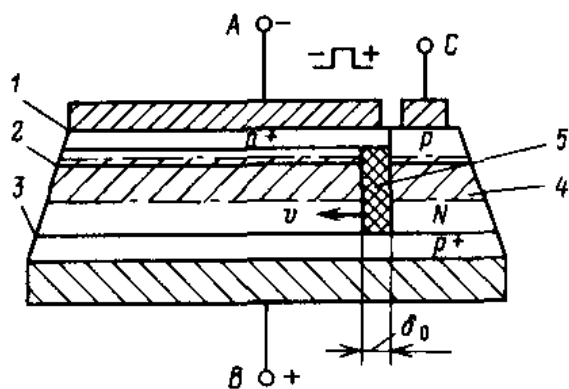


Рис. 3. 8. Конструкция полупроводниковой структуры тиристора: 1, 3 – эмиттерные переходы, 2 – коллекторный переход, 4 – область объемного заряда (ООЗ), 5 – область первоначального включения

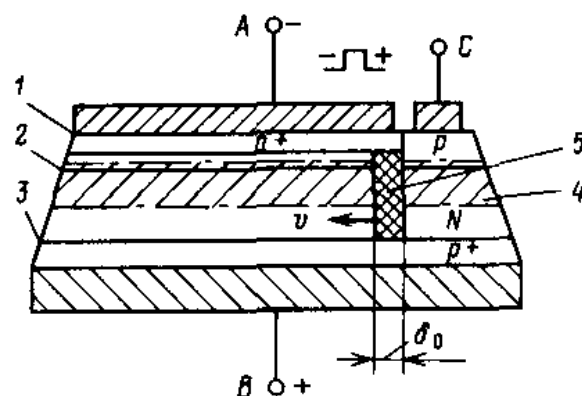


Рис. 3. 9. Тиристор с регенеративным управлением: 1 – вспомогательный тиристор, 2 – область первоначального включения, 3 – основной тиристор

Для увеличения коммутируемой мощности нужно увеличить площадь ОПВ. Единственный путь – увеличение длины границы эмиттерного n<sup>+</sup>-слоя с управляющим электродом (до  $L = 5-50$  см), при этом плотность управляющего тока должна быть высока – более  $3$  А/см. Для решения возникающей

проблемы роста мощности запускающего импульса используют регенеративное управление (рис. 3. 9). Вначале пускается вспомогательный тиристор (1) в области (2). Анодный ток этого тиристора (ограничиваемый сопротивлением р-базы) является током управлением основного тиристора (3). Тиристоры позволяют коммутировать импульсы, длительность которых больше времени распространения включенного состояния на всю площадь прибора (до 80–100 мкс). Достигнутые параметры 5кА при 2кВ и  $dI/dt = 1\text{кА/мкс}$  (табл. 3. 8).

Таблица 3. 8

### Параметры быстродействующих тиристоров

Тип	Напря- жение, кВ	Сред- ний ток, А	Импульс- ный ток, кА	Скорость нараста- ния тока, А/мкс	Время включе- ния, мкс	Время выключе- ния, мкс
ТБ253-800	1, 4	800	20	800	4	32–63
ТБ253-1000	1, 4	1000	21	800	4	32–63
ТБК-143-320	2, 4	320	5, 5	1000	4	40
ТЧИ-100	0, 9	100	2	800	1, 3	20
6RT-500 (США)	2. 5	-	220	2	-	-
5STH20Y450 1 (Швейцария)	4. 5	-	80	18 000	-	-
РВД	2, 5	-	250	60 000	-	-

Важнейшими характеристиками тиристора являются рабочее напряжение, ток и скорость нарастания тока.

**Реверсивно-включаемый динистор (РВД)** представляет собой силовую интегральную схему, состоящую из несколько десятков тысяч чередующихся тиристорных и транзисторных секций с характерным размером 100 мкм. Секции имеют общий высоковольтный р<sup>+</sup>-п-переход, являющийся коллектором тиристорных секций и блокирующий внешнее напряжение (рис. 3. 10). Для включения РВД, находящегося под напряжением прямого смещения (для тиристорных секций), к нему на короткое время прикладывается импульс противоположной полярности. При этом низковольтный п<sup>+</sup>-р – переход пробивается и через транзисторные секции протекает импульс тока накопления  $I_{ac}$ , т. е. идет инжекция ЭДП в базовые области транзисторных и расположенных рядом тиристорных секций.

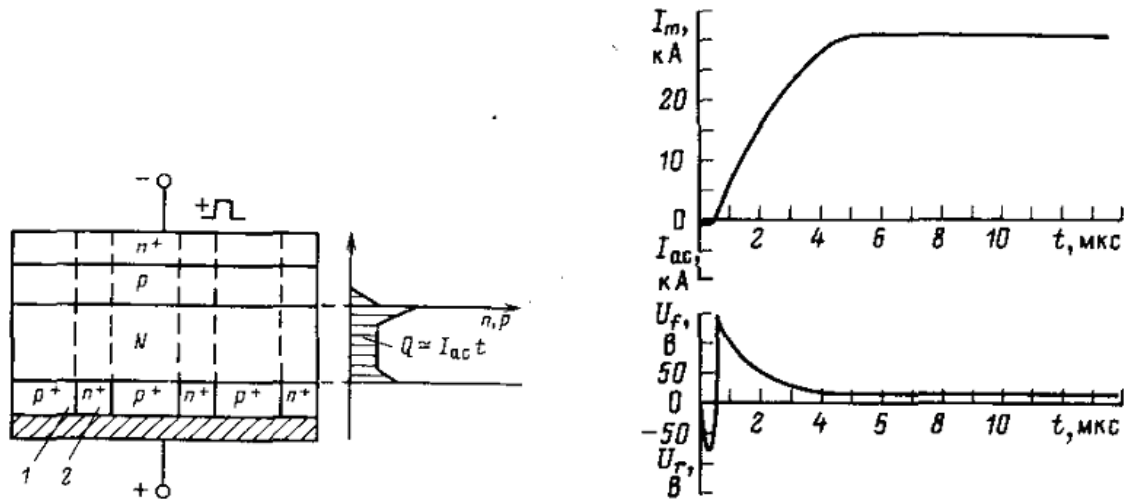


Рис. 3. 10. Конструкция реверсивно включаемого динистора (слева): 1 тиристорные секции, 2- транзисторные секции; осциллограммы тока (сверху) и напряжения при включении РВД

Второй путь – это использование, как правило, излучения неодимового лазера (1.06 мкм – близко к ширине зоны кремния для ионизации – рис. 3. 11). Оптотиристоры позволяют получать ЭДП практически мгновенно и на большой площади, с фронтом тока до 10 нс при токе до 25 кА. Оптотиристоры легко синхронизируются и их можно устанавливать последовательно и параллельно. Основной недостаток – сложность конструкции, дороговизна и ненадежность лазера.

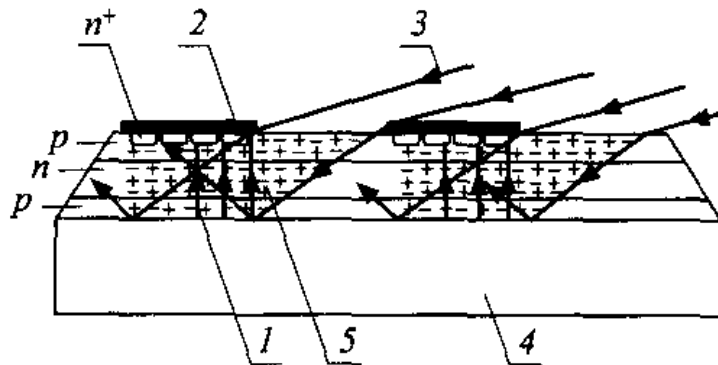


Рис. 3. 11. Схема оптотиристора:  
1 – путь тока, 2 – катод, 3 – поляризованное излучение лазера 4 – анод, 5 – ЭДП

### 3. 3. 4 Магнитный ключ

Магнитный ключ представляет собой коммутатор, в котором используется эффект резкого уменьшения индуктивности магнитного дросселя при насыщении его сердечника. Дроссель (Др) звена магнитного



сжатия (рис. 3. 12) может находиться в двух состояниях: разомкнуто – когда происходит зарядка конденсатора  $C1$  и замкнуто – когда идет передача энергии из  $C1$  в  $C2$  ( $C1=C2$ ). Наибольший коэффициент сжатия будет при минимальной индуктивности дросселя в состоянии замкнуто и достигает 2–4 на одно звено. Звенья можно ставить последовательно, увеличивая степень сжатия энергии. Обычно бывает 3-4 ступени (магнитный компрессор), так как при большем числе каскадов становятся существенными потери энергии в материале сердечников, особенно при субмикросекундных временах. На входе магнитного компрессора обычно ставится ЕНЭ с коммутатором на тиристоре или тиратроне.

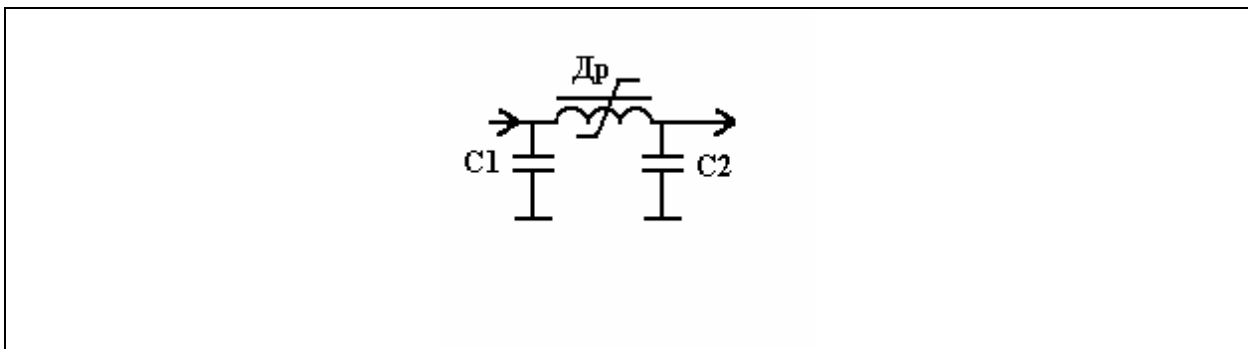


Рис. 3. 12. Звено магнитного сжатия энергии

При расчете магнитного ключа используют соотношения:

1.  $S_{сер} * n = U_{C1} * t1 / 2 * \Delta B$  (вольт-секундный интеграл), где  $S_{сер}$  – площадь поперечного сечения сердечника ИТ;  $n$  – число витков обмотки Др;  $\Delta B \approx 2 B_s$  – максимальное приращение индукции;  $B_s$  – магнитная индукция насыщения материала сердечника,  $t1$  – время зарядки емкости  $C1$  (линейном или 1-COS законе нарастания напряжения).

2.  $L_H = \mu_0 * \mu_H * S_{ОБ} * n^2 / l_s$ , (определяет внутренний импеданс) где  $L_H$  – индуктивности дросселя в состоянии замкнуто,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $\mu_H$  – магнитная проницаемость сердечника в положении замкнуто (определяется экспериментально, находится для пермалоев в диапазоне 1, 5–2, 5);  $S_{ОБ}$  – площадь поперечного сечения обмотки Др;  $l_s$  – длина средней силовой линии магнитного поля.

3.  $W_C = \Delta B * (2 * H_c + 2 * B_s * \sigma^2 / (12 * \rho * t_{пр}))$ , где  $W_C$  – удельные потери в сердечнике связаны с потерями на перемагничивание,  $H_c$  – коэрцитивная сила,  $\sigma$  и  $\rho$  – толщина и удельное сопротивление материала сердечника.

Для успешной работы магнитного ключа сердечник должен иметь большую  $B_s$ , малые  $H_c$ ,  $\mu_H$  и  $W_C$ . Кроме того, нужна прямоугольная петля гистерезиса. В качестве материала сердечника используют ферриты, железоникелевые сплавы (пермалои) и аморфные сплавы (табл. 3. 9).

Ферриты имеют высокое удельное сопротивление, т. е. малые потери на вихревые токи, и могут использоваться в наносекундном диапазоне, но обладают малой индукцией насыщения и низкой температурой точки Кюри (до 200°C). Имеются проблемы с производством сердечников размером более 300 мм.

Пермаллой имеет хорошие характеристики (точка Кюри 400–700), но обладает низким сопротивлением. Это приводит к необходимости изготовления сердечников из ленты с межвитковой изоляцией, снижающей коэффициент заполнения сердечника. При временах менее 100 нс потери энергии становятся неразумными.

Таблица 3. 9

### Параметры материалов для сердечников

Марка материала	$B_s$ , Тл	$\rho$ , мкОм*м	Толщина $\Delta$ , мм	$H_c$ , А/м
Пермаллой 50 НП	1,5	0,45	0,05	24
Пермаллой 50 НП	1,47	0,45	0,01	40
Пермаллой 34НКМП	1,55	0,52	0,02	20
Пермаллой 34НКМП	1,55	0,52	0,005	52
Феррит 600НН	0,35	$10^8$	-	35
Феррит 600НН	0,46	$10^{12}$	-	50
МЕТGLASS 2605СО	1,8	1,23	0,005	3.2

Аморфные сплавы имеют примерно в 3 раза большее удельное сопротивление и коэрцитивную силу, что позволяет уменьшить потери при временах менее 300 нс за счет потерь по вихревым токам. Однако они дороже.

При магнитной компрессии происходит некоторое снижение напряжения, что не всегда допустимо. Для одновременного сжатия во времени и повышения выходного напряжения имеется специальная схема Рукина (рис. 3. 13). Основное отличие состоит в том, что емкость каждого звена сжатия выполнена из двух одинаковых конденсаторов. При этом выход каждого предыдущего звена присоединен к средней точке следующего звена, а нижние конденсаторы зашунтированы магнитными ключами (МК). К достоинствам схемы относится автоматическое перемагничивание всех сердечников.

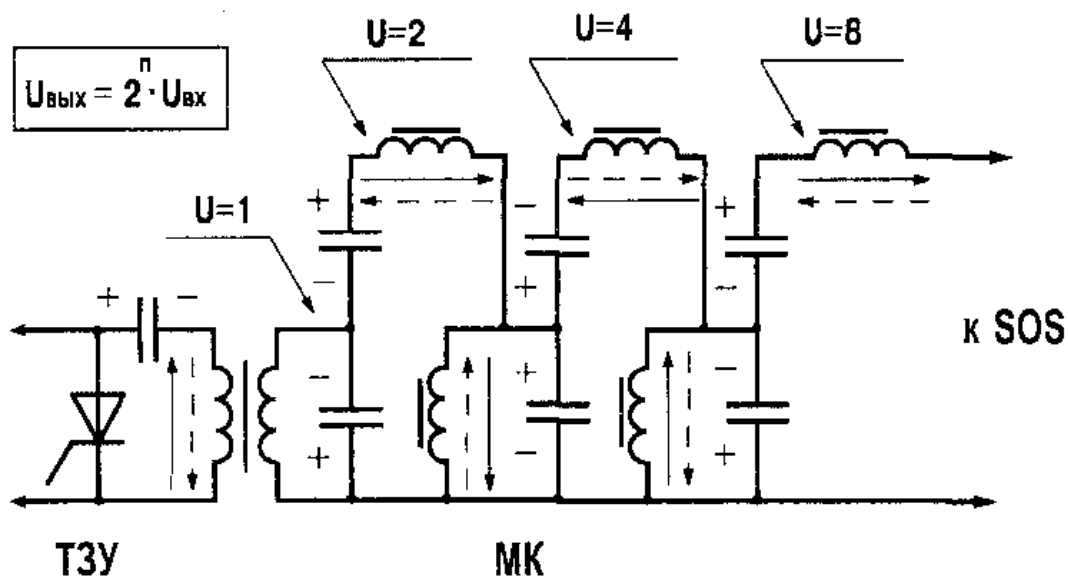


Рис. 3. 13. Схема магнитного компрессора с удвоением напряжения в каждой ячейке сжатия энергии (зарядные токи пунктирные стрелки – разрядные – сплошные)

Схема работает следующим образом. От тиристорно-зарядного устройства через импульсный трансформатор происходит зарядка конденсаторов первого звена с одновременным перемагничиванием сердечников МК – разделительного и нижнего конденсатора второго звена. По окончании зарядки сердечник ИТ насыщается, и происходит перезарядка нижнего конденсатора в контуре вторичной обмотки ИТ. Это приводит к удвоению суммарного напряжения на конденсаторах первой ступени. К моменту окончанию перезарядки происходит насыщение сердечника разделительного МК, и энергия из конденсаторов первой ступени передается во вторую, с одновременным перемагничиванием сердечников МК – разделительного и нижнего конденсатора третьего звена и т. д.

### 3. 3. 5. Полупроводниковые ключи

Из всех типов существующих прерывателей тока только полупроводниковые прерыватели способны принципиально работать в частотном режиме. У прерывателя есть две стадии работы: стадия накачки, в течение которой происходит запасание энергии в соленоиде, и стадия прерывания тока. У ПП прерывателей обрыв тока производится подачей импульса тока противоположного направления. В настоящее время существуют следующие типы ПП прерывателей (кроме экзотических – с управление электронных пучком):

1. Диоды с накоплением заряда, принцип действия которых основан на существовании встроенного тормозящего поля в базе диффузионного диода, образованного градиентом концентрации донорных атомов. Это поле

препятствует распространению дырок в глубь базы на стадии прямой накачки и удерживает заряд вблизи р-п –перехода. За счет этого при прохождении обратного тока практически весь заряд успевает выйти из базы диода на стадии высокой проводимости. Малая величина остаточного заряда в базе к моменту образования объемного заряда у р-п –перехода приводит к резкому обрыву тока. Поэтому уровень инжекции низкий, а легирование высокое. Характерные токи 0,1 А при 50 В, времена обрывов  $10^{-9}$ – $10^{-10}$  с.

2. Дрейфовые диоды с резким восстановлением (ДДРВ), созданные академиком Греховым на основе р<sup>+</sup>-р'-n-n<sup>+</sup> –структуры, имеют сильнооточный режим работы (до 200 А/см<sup>2</sup>) с напряжением м 1–2 кВ и временем обрыва 2 нс. Принцип их работы следующий. Коротким импульсом прямого тока создается резко неоднородное распределение инжектированной ЭДП, так чтобы 75 % ее было в р'-слое. Затем пропускается импульс обратного тока, протекающий за счет выноса носителей из плазмы, р' и n-областях формируются резкие плазменные фронты, движущиеся навстречу к р-п –переходу. После их встречи на переходе – протекание тока идет за счет выноса основных носителей в противоположные стороны от р-п –перехода. На р' -n –переходе формируется ООЗ, напряжение возрастает – ток прерывается.

3. SOS-ключ, открытый в ИЭФ УрО РАН группой Рукина, позволяет обрывать токи плотностью до  $10^4$  А/см<sup>2</sup>, напряжением до 1 МВ при временах коммутации  $10^{-8}$ – $10^{-10}$  с.

Схема включения SOS-ключа и осциллограммы его работы приведены на рис. 3. 14.

Принцип работы SOS-ключа основан на создании электронно-дырочной плазмы во время прямой накачки, когда р-п-переход включен в прямом направлении и под действием возникающего электрического поля дырки из р-области дрейфуют в базу диода, а электроны из n-области перемещаются в обратном направлении и постепенно заполняют р-область структуры. При прямой накачке основной вклад в общее сопротивление прерывателя вносит базовая область р<sup>+</sup>-р-n-n<sup>+</sup>-структуры, поскольку концентрация носителей в ней минимальна. На начальной стадии накачки нарастание плотности тока через диод происходит быстрее, чем падение сопротивления базы, что приводит к появлению положительного всплеска напряжения на SOS-ключе, а в базе возникает область сильного электрического поля. Затем сопротивление р<sup>+</sup>-р-n-n<sup>+</sup>-структуры становится меньше волнового сопротивления контура, вплоть до момента обрыва тока, и сопротивление через него определяется внешним контуром. К моменту завершения накачки подавляющая часть накопленного заряда сосредоточена в высоколегированных областях структуры: электроны в р-области, дырки в n<sup>+</sup>-области. Минимум концентрации плазмы расположен в базе и имеет величину порядка  $10^{16}$  см<sup>-3</sup> (рис. 3. 15, а)

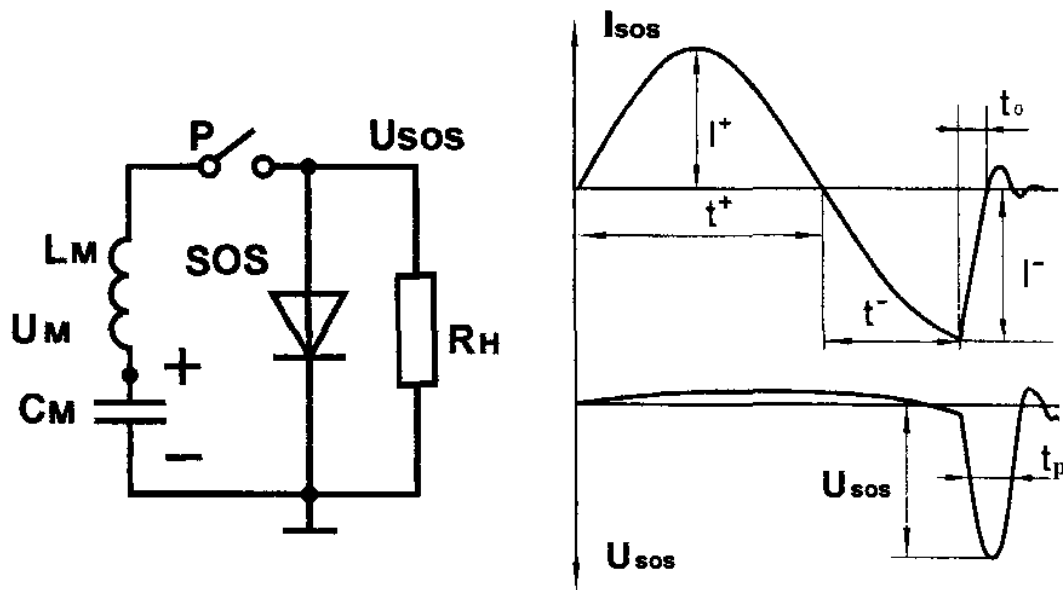


Рис. 3. 14. Схема включения SOS-ключа и осциллограммы его работы

После прохождения тока через ноль, во время обратного направления тока, плазма изменяет направление своего движения и начинает возвращаться к плоскости р-п-перехода. На этой стадии концентрация неравновесных носителей соответствует высокому уровню инжекции, и основная плазма движется медленнее, чем ее фронт. В результате происходит обострение фронтов профиля плазмы сначала в р-области, а затем и п-области структуры (рис. 3. 15, б).

После образования резких фронтов в пространственном распределении плазмы области  $p^+p-n-n^+$ -структуры, расположенные за фронтами, оказываются практически полностью свободными от инжектированных носителей заряда. В этих областях перенос тока осуществляется только основными носителями, концентрация которых минимальна на внешней стороне фронтов плазмы. При приближении фронтов к точкам, где плотность тока, текущего через структуру, станет равна плотности тока насыщения основных носителей, абсолютная величина поля на фронтах плазмы резко увеличивается, скорость дрейфа носителей приближается к скорости насыщения, а их подвижность падает. Уменьшение подвижности носителей означает, что в области фронтов образуются участки структуры с высоким эффективным сопротивлением. Это приводит к снижению тока через прерыватель. Амплитуда напряженности поля за фронтом плазмы ограничивается процессами генерации электронно-дырочных пар в результате ударной ионизации. При этом дополнительные носители обеспечивают прохождение тока через область с низкой концентрацией плазмы. В результате в полупроводниковой структуре возникает характерная область сильного поля (рис. 2. 15, в) с четко выраженными границами. Внешняя граница области, занятой полем, соответствует точке, где выполняется условие насыщения тока, и практически неподвижна, а внутренняя совпадает

с положением фронта плазмы. Поскольку фронт плазмы продолжает перемещаться в сторону базы, размер области, в которой существует сильное поле, увеличивается, отрицательное поле на структуре растет, а на прерывателе формируется фронт импульса напряжения.

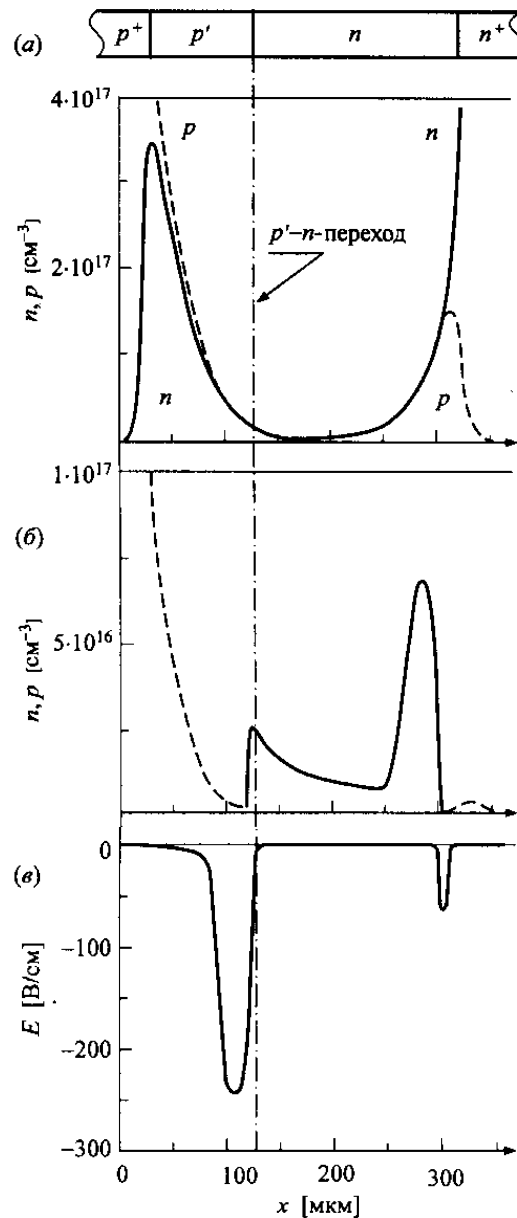


Рис. 3. 15. SOS-ключ: а) распределение плазмы в конце прямой накачки, б) положение плазменных фронтов при максимуме напряжения при обрыве тока, в) распределение поля при обрыве тока

Параметры диодов для изготовления SOS-ключа приведены в табл. 3. 10. Диоды можно собирать последовательно и параллельно на большие токи и напряжения. На основе SOS-ключа создан ряд генераторов и ускорителей

(табл. 3. 11). Для включения SOS-ключа обычно используется (схема на рис. 3. 14 – экспериментальная):

1) двухконтурная схема с режимом усиления обратного тока. В качестве источника энергии прямой накачки и для зарядки конденсатора обратной накачки использовался магнитный компрессор энергии, а обратная накачка производилась разрядом конденсатора обратной накачки после срабатывания магнитного ключа обратной накачки (рис. 3. 16);

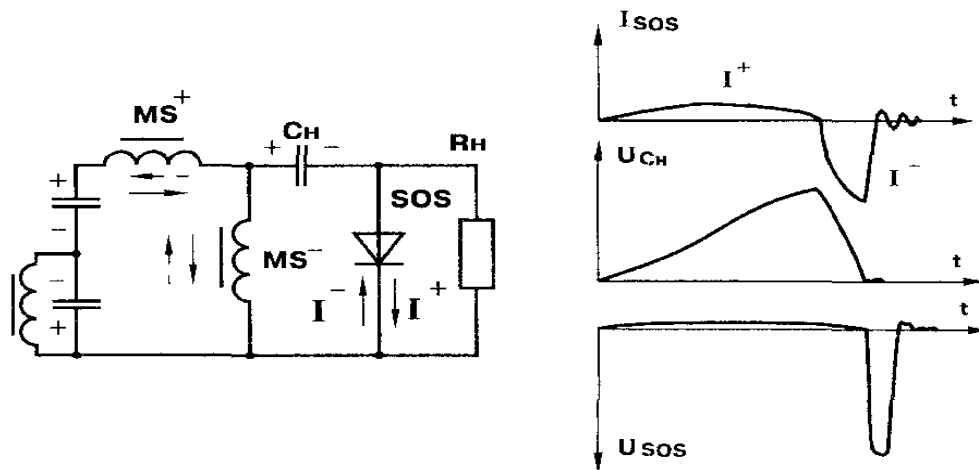


Рис. 3. 16. Схема согласования магнитного ключа и SOS-ключа и эюры токов и напряжений в этой схеме

2) двухконтурная схема с режимом усиления обратного тока с насыщаемым импульсным трансформатором вместо магнитного ключа обратной накачки. Примером может служить ускоритель УРТ (рис. 3. 17), который работает следующим образом. Источник высокого напряжения (ИВН) заряжает конденсатор первого контура  $C_0$ . Блок управления формирует импульс запуска тиратрона, частота подачи управляющих импульсов определяет частоту работы ускорителя  $f$  и его мощность на выбранном ускоряющем напряжении. Конденсатор  $C_0$  разряжается на первичную обмотку трансформатора, происходит зарядка конденсатора  $C_1$  с одновременной накачкой током полупроводникового прерывателя тока в прямом направлении. По окончании зарядки сердечник трансформатора насыщается и происходит разряд  $C_1$  в контуре с ППТ. При достижении значения тока, близкого к максимуму, ток в контуре прерывается и формируется импульс напряжения, который прикладывается к вакуумному диоду.

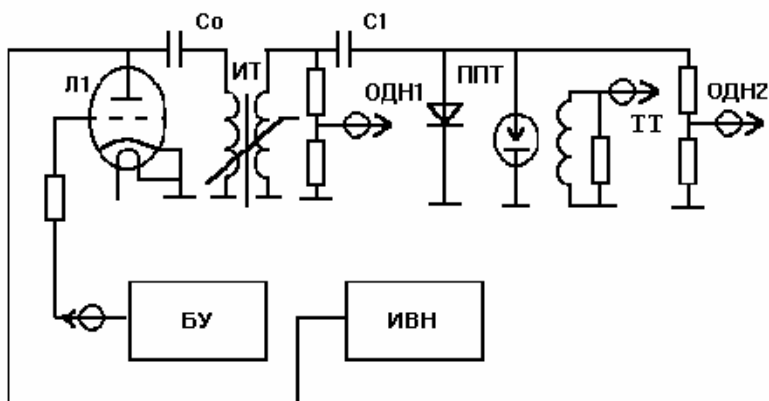


Рис. 3. 17. Схема ускорителя УРТ

Таблица 3. 10

### Параметры диодов для SOS-ключа

Тип диода	Плотность тока прямой накачки $J^+$ , кА/см <sup>2</sup>	Плотность тока обратной накачки $J^-$ , кА/см <sup>2</sup>	Площадь структуры $S_{д}$ , см <sup>2</sup>	Времен прямой накачки $t^+$ , нс	Времен обратной накачки $t^-$ , нс	Рабочее напряжение, кВ
Диоды серии КЦ105	10–60	10–60	~0, 02	100–200	50–100	15–30
Диоды серии СДЛ	1–10	1–10	~0, 2	200–800	50–200	80–160
SOS диоды	0, 4–2	2–10	0, 25–4	300–600	40–150	60–250



Таблица 3. 10

**Параметры разработанных в ИЭФ УрО РАН генераторов и ускорителей электронов с SOS-ключом**

Установка	Система сжатия импульса	U, кВ	W, Дж	t <sub>и</sub> , нс	Частота следования импульсов, Гц постоянно/(в режиме пачки)
<b>Генераторы</b>					
Сибирь	ПТСК	1000	300	100	150
СМ-1Н	ПТСК	250	8	24	100/(1000)
СМ-3Н	ПТСК	450	10	40	300/(2000)
СМ-4Н	ПТСК	150	0,9	18	10/(100)
С-5Н	ПТСК	1000	60	50	500/(1000)
<b>Ускорители</b>					
Малахит	ПТСК	250	3	50	300 (3 000)
Технологический	ПТСК	350	7	25	100
Контроль	ПТСК	30-120	0,2	15-20	100/(10 000)
УРТ-0,2	Тиратрон+ППТ	200	1,75	35	250
УРТ-0,5	Тиратрон+ППТ	500	6,25	50	200
УРТ-1	Тиратрон+ППТ	900	25	60	50
Б/н	ПТСК	400	7	40	200

Примечание: ПТСК – установка с полностью твердотельной системой коммутации; U – максимальное или ускоряющее напряжение; W – энергия в импульсе на нагрузке (в пучке электронов); T<sub>и</sub> – длительность импульса на полувысоте; Б/н – без названия.

### 3. 4. Критерии выбора элементов схем формирования импульсов

Все критерии условно можно разделить на 2 группы: технические и экономические. Под экономическими критериями понимаются не только стоимость элемента, но и затраты, возникающие при применении и эксплуатации. Например, если использование более дешевого, но не экономичного или с малым ресурсом, элемента оправдано при создании экспериментального макета, то при промышленной эксплуатации могут стать более существенными затраты на потребляемые ресурсы – например: электроэнергию.

Таблица 3. 11

## Параметры коммутаторов

Тип коммутатора	Предельный ток, кА	Предельное напряжение, кВ	Частота работы, (Гц)	Коммутируемая средняя мощность (кВт)	Ресурс	Схема включения	Стоимость
Искровые* разрядники	35	50	Средняя (50)	Малая	Низкий (2000 Кл)	Простая	Средняя
Вакуумные разрядники*	400	60	Низкая (0,02-1)	Малая	Средний ( $10^5$ Кл)	Простая	Высокая
Тиратроны*	5	50 (100)	Высокая (700)	Средняя (50)	Средний (1000 ч)	Простая	Средняя
Тиратроны с холодным катодом*	10 (150)	500(100)	Средняя (100)	Малая (10)	Средний ( $10^6$ Кл)	Средней сложности	Средняя
Тиристоры*	20	2,5	Высокая (1000)	Высокая ( $\approx 100$ )	Очень высокий	Средней сложности	Средняя
РВД*	250	2,5(10)	Средняя (250)	Очень высокая ( $\approx 1000$ )	Очень высокий	Сложная	Высокая
Магнитный ключ	1 000	2 500	Высокая (1000)	Очень высокая ( $\approx 1000$ )	Очень высокий	Сложная	Очень высокая
ЭВП	1 000	6 000	Низкая (0,02-1)	Малая (10)	Однократный	Простая	Низкая
SOS-ключ	10	1 000	Высокая (1000)	Средняя (50)	Очень высокий	Средней сложности	Средняя
Плазменный	10 000	4 000	Низкая (0,02-1)	Малая (10)	низкий	Очень сложная	Очень высокая

\* - выпускаются промышленностью

## 4. Применение генераторов импульсов тока и напряжения

### 4. 1. Электрофизические методы обработки

Генераторы тока и напряжения имеют разные применения, в первых используется физический эффект от протекающего тока, а во вторых, от амплитуды напряжения. Все применения генераторов можно разделить на следующие области:

1. Электрофизические методы обработки конструкционных материалов:
  - a. электроэрозионная обработка;
  - b. электромеханическая обработка;
  - c. электропластическая обработка;
  - d. эручая обработка (лазерным, электронным или ионным пучком);
  - e. элазменная обработка.
2. Электрофизические методы получения новых материалов:
  - f. получение порошков ЭФ методами: ЭВП; лазерным, электронными и ионным пучками;
  - g. компактирование материалов электроштамповкой;
  - h. получение новых материалов взрывом.
3. Электрофизические технологии в различных областях науки и техники:
  - i. обработка воды разрядом;
  - j. генерация озона;
  - k. плазмохимия и очистка газов в разряде;
  - l. электроимпульсная дезинтеграция материалов.

Электрофизические обработки (ЭФО) – общее название методов обработки конструкционных материалов непосредственно электрическим током, электролизом и их сочетанием с механическим воздействием. В ЭФ включают также методы ультразвуковые, плазменные и ряд других методов.

С разработкой и внедрением в производство этих методов сделан принципиально новый шаг в технологии обработки материалов – электрическая энергия из вспомогательного средства при механической обработке (осуществление движения заготовки, инструмента) стала рабочим агентом. Всё более широкое использование ЭФО в промышленности обусловлено их высокой производительностью, возможностью выполнять технологические операции, недоступные механическим методам обработки.

### 4. 2. Электроэрозионная обработка

Электроэрозионная обработка основана на вырывании частиц материала с поверхности импульсом электрического разряда. Если задано напряжение (расстояние) между электродами, погруженными в жидкий диэлектрик, то при их сближении (увеличении напряжения) происходит пробой диэлектрика –

возникает электрический разряд, в канале которого образуется плазма с высокой температурой.

Так как длительность электрических импульсов не превышает 10 мс, выделяющееся тепло не успевает распространиться в глубь материала и даже незначительной энергии оказывается достаточно, чтобы разогреть, расплавить и испарить небольшое количество вещества. Кроме того, давление, развиваемое частицами плазмы при ударе об электрод, способствует выбросу (эрозии) не только расплавленного, но и просто разогретого вещества. Поскольку электрический пробой, как правило, происходит по кратчайшему пути, то прежде всего разрушаются наиболее близко расположенные участки электродов. Таким образом, при приближении одного электрода заданной формы (инструмента) к другому (заготовке) поверхность последнего примет форму поверхности первого (рис. 4. 1). Производительность процесса, качество получаемой поверхности в основном определяются параметрами электрических импульсов (их длительностью, частотой следования, энергией в импульсе). Электроэрозионный метод обработки объединил электроискровой и электроимпульсный методы.

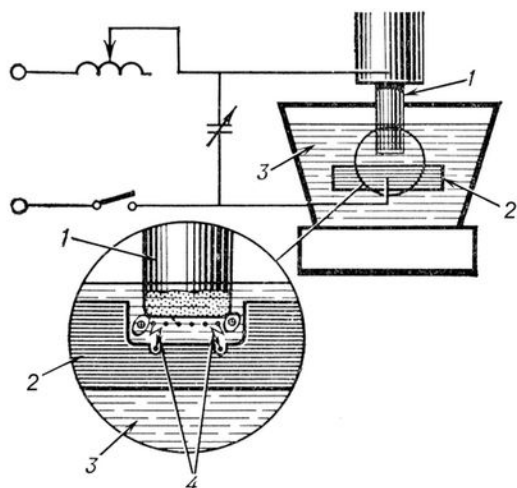


Рис. 4. 1. Схема электроэрозионного метода обработки:

1 – инструмент; 2 – заготовка; 3 – жидкий диэлектрик; 4 – электрические разряды

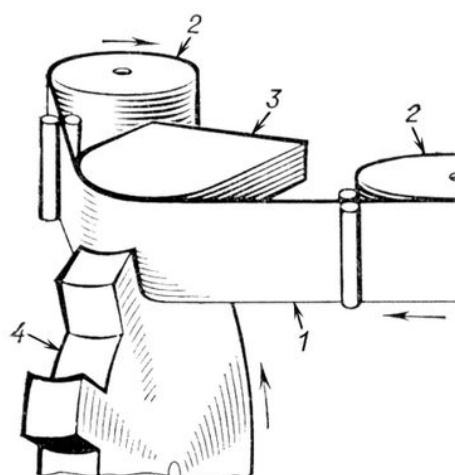


Рис. 4. 2. Схема обработки пазов ленточным электродом:

1 – лента; 2 – катушки; 3 – копир; 4 – заготовка.

Электроискровая обработка была предложена советскими учёными Н. И. и Б. Р. Лазаренко в 1943 г. Она основана на использовании искрового разряда. При этом в канале разряда температура достигает 10000 °С, развиваются значительные гидродинамические силы, но сами импульсы относительно короткие и, следовательно, содержат мало энергии, поэтому воздействие каждого импульса на поверхность материала невелико. Метод позволяет получить хорошую поверхность, но не обладает достаточной производительностью. Кроме того, при этом методе износ инструмента относительно велик (достигает 100 % от объёма снятого материала). Метод используется в основном при прецизионной обработке небольших деталей,

мелких отверстий, вырезке контуров твердосплавных штампов проволочным электродом.

Электроимпульсная обработка основана на использовании импульсов дугового разряда. Предложена советским специалистом М. М. Писаревским в 1948 г. В отличие от искрового, дуговой разряд имеет температуру плазмы ниже (4000–5000°С), что позволяет увеличивать длительность импульсов, уменьшать промежутки между ними и таким образом вводить в зону обработки значительные мощности (10–50 кВт), т. е. увеличивать производительность обработки. Характерное для дугового разряда преимущественно разрушение катода приводит к тому, что износ инструмента (в этом случае он подключается к аноду) ниже, чем при электроискровой обработке, составляя 0,05–0,3 % от объёма снятого материала (иногда инструмент вообще не изнашивается). Более экономичный электроимпульсный метод используется в основном для черновой обработки и для трёхкоординатной обработки фасонных поверхностей. Оба метода (электроискровой и электроимпульсный) дополняют друг друга.

Электроэрозионные методы (ЭЭМ) особенно эффективны при обработке твёрдых материалов и сложных фасонных изделий. При обработке твёрдых материалов механическими способами большое значение приобретает износ инструмента. Преимущество ЭЭМ состоит в том, что для изготовления инструмента используются более дешёвые, легко обрабатываемые материалы. Часто при этом износ инструментов незначителен. Например, при изготовлении некоторых типов штампов механическими способами более 50% технологической стоимости обработки составляет стоимость используемого инструмента. При обработке этих же штампов электроэрозионными методами стоимость инструмента не превышает 3,5 %. Условно технологические приёмы электроэрозионной обработки можно разделить на прошивание и копирование. Прошиванием удаётся получать отверстия диаметром менее 0,3 мм, что невозможно сделать механическими методами. В этом случае инструментом служит тонкая проволока. Этот приём на 20–70 % сократил затраты на изготовление отверстий в фильерах, в том числе алмазных. Более того, электроэрозионные методы позволяют изготавливать спиральные отверстия. При копировании получила распространение обработка ленточным электродом (рис. 4. 2). Лента, перематываясь с катушки на катушку, огибает копир, повторяющий форму зуба. На грубых режимах лента «прорезает» заготовку на требуемую глубину, после чего вращением заготовки щель расширяется на нужную ширину. Более распространена обработка проволочным электродом (лента заменяется проволокой). Этим способом например, можно получать из единого куска материала одновременно пуансон и матрицу штампа, причём их соответствие практически идеально.

В качестве рабочей жидкости при ЭЭМ используют технические масла, керосин и т. п. Гидронасос служит для прокачивания жидкости через

межэлектродный промежуток. Для очистки жидкости от продуктов эрозии служит фильтр.

Электроимпульсный станок отличается от электроискрового практически только генератором импульсов. Например, у генератора ШГИ-125–100 диапазон частот следования импульсов 0, 1–100 кГц, длительность импульсов 3–9000 мксек, максимальная мощность 7, 5 кВт, номинальная сила тока 125 а. Диапазон рабочих напряжений, вырабатываемых для электроискровой обработки, 60–200 в, а для электроимпульсной 20–60 в.

### 4. 3. Электромеханическая обработка

Электромеханическая, в том числе магнитоимпульсная и электрогидравлическая обработки (штамповки), применяется для пластического деформирования металлов и сплавов (обжатие и раздача труб, формовка трубчатых и листовых заготовок, калибровка и т. п.) и основана на непосредственном преобразовании энергии меняющегося с большой скоростью магнитного поля, возбуждаемого например, при разряде батареи мощных конденсаторов на индуктор, в механическую работу при взаимодействии с проводником (заготовкой) (рис. 4. 3).

Энергия магнитного поля расходуется на полезную механическую работу деформации заготовки, ее нагревание и потери пропорционально индуктивностям (конденсаторов, ошиновки, коммутатора, соленоида), при этом полезный расход – только в соленоиде.

В оптимальном режиме давление  $P$  на заготовку равно плотности энергии магнитного поля в объеме между индуктором и заготовкой и определяется как:  $P=10^{-6} \cdot B^2 / (8\pi)$  (кг/см<sup>2</sup>), где  $B$  – индукция магнитного поля в зазоре между индуктором и заготовкой. Например, при 1 МГц – 40т/см<sup>2</sup>.

Однако при больших временах необходимо учитывать проникновение магнитного поля за заготовку, создающего противодействие и тогда:  $P=(B^2 - B_1^2) / (8\pi)$ , где  $B_1$  – индукция магнитного поля за заготовкой.

Преимущества метода: отсутствие движущихся и трущихся частей в установках, высокая надёжность и производительность, лёгкость управления и компактность, наличие лишь одного инструмента – матрицы или пуансона (роль другого выполняет поле), возможность получения достаточно больших механических усилий в установках небольших габаритов и др.

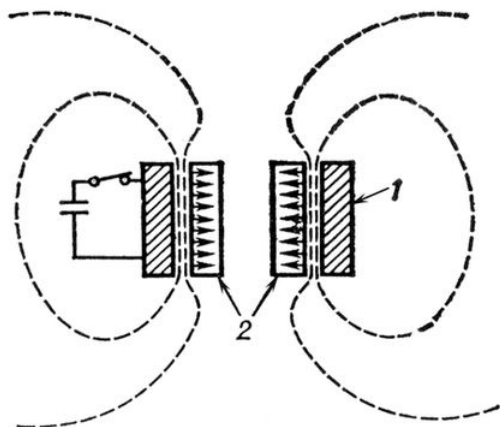


Рис. 4. 3. Схема магнито-импульсной обработки: 1 – индуктор; 2 – заготовка. Пунктиром показаны магнитные силовые линии; жирными стрелками – механические силы

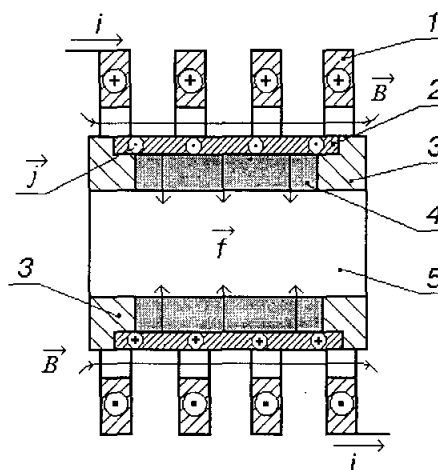


Рис. 4. 4. Схема индукционного магнито-импульсного прессования: 1 – индуктор, 2 – деформирующаяся электропроводящая оболочка, 3 – заглушки, 4 – порошок, 5 – оправка, стрелка – направление механических сил

Недостатки — относительно невысокий кпд, затруднительность обработки заготовок с отверстиями или пазами (мешающими протеканию тока) и большой толщины.

Недостаток контакта изделия с индуктором ликвидирован в индукционном магнито-импульсном прессовании (рис. 4. 4).

Этот способ используется для компактирования порошков, в том числе наноразмерных, при усилии до 850кН (85т) и давлении до 2ГПа ( $2 \cdot 10^4$ ати). При этом величина тока в индукторе достигает 5–60кА при напряжении до 5кВ и длительности 300–600 мкс. Для коммутации используется разрядник РВУ-3.

Электрогидравлическая обработка (главным образом штамповка) основана на использовании энергии гидравлического удара при мощном электрическом (искровом) разряде в жидком диэлектрике (рис. 4. 5). При этом необходимо вакуумирование полости между заготовкой и матрицей, поскольку из-за огромных скоростей движения заготовки к матрице воздух не успевает уйти из полости и препятствует плотному прилеганию заготовки к матрице. Метод прост, надёжен, но обладает небольшим кпд, требует высоких электрических напряжений и не всегда даёт воспроизводимые результаты.

Главным условием, определяющим зажигание разряда в промежутке 1, является напряженность электрического поля в зазоре. Высокие напряженности легко достигаются в неоднородных промежутках типа «острие-плоскость»:

$$E \sim 2 \cdot U / (r \cdot \ln(4 \cdot l / r)) \text{ или «острие-острие»};$$

$$E \sim U / (r \cdot \ln(2 \cdot l / r)), \text{ } r \text{ – радиус электрода.}$$

Для снижения электрической прочности используют эффект полярности,

состоящий в том, что скорость развития разряда при положительной полярности выше, чем при отрицательной, особенно для полярных жидкостей, в том числе воды, которая широко используется в этой технологии. Часто используют схему из двух генераторов, один из которых формирует высоковольтный импульс пробоя канал, а второй, с меньшим напряжением, для ввода необходимой энергии в канал пробоя.

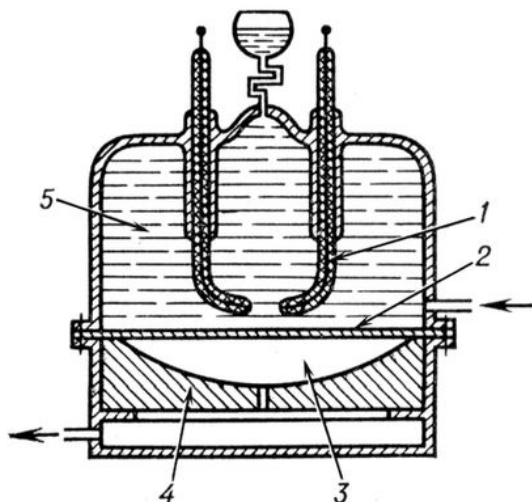


Рис. 4. 5. Схема устройства для электрогидравлической штамповки:  
1 – электроды; 2 – заготовка; 3 – вакуумная полость матрицы; 4 – матрица; 5 – рабочая жидкость

Электропластическая обработка основана на электропластическом эффекте (ЭПЭ), который состоит в снижении сопротивления металлических кристаллов деформированию под влиянием тока высокой плотности ( $\sim 10^5 \text{ А/см}^2$ ) в импульсном режиме ( $\sim 10^{-4}$  с). При пропускании такого импульса образцы длиной 16 мм удлиняются без теплового нагрева на 10 мкм. Физика процесса еще не достаточно ясна, но имеющиеся гипотезы состоят в том, что электроны проводимости влияют (передают импульсы силы и энергии) на дислокации и другие дефекты структуры, участвующие в пластическом течении металла, за счет электрон-фононного увлечения.

Это позволяет повысить пластичность металлов и обрабатывать трудно деформируемые и хрупкие материалы. Например, при волочении медной проволоки диаметром  $\sim 100$  мкм снижение усилия волочения достигает 25 % при мощности энергозатрат в десятки Вт, уменьшаются обрывы проволоки, а получаемый продукт более пластичен. При волочении нержавеющей проволоки (12Х18Н10Т) эффект усиливается до 40 %, а на вольфрамовой до 50 %.



#### 4. 4. Электроимпульсная дезинтеграция материалов

Электроимпульсная дезинтеграция материалов (ЭДМ) появилась из наблюдения за природой: разрушением ударом молнии различных объектов. Реализована ЭДМ в ТПИ (Томск) по идее А. А. Воробьева. Суть процесса состоит в том, что на кусок породы устанавливают металлические электроды и подают на них импульс напряжения, достаточный для электрического пробоя. Энергия, выделяющаяся в канале разряда, действует на материал подобно взрывчатому веществу и разрушает его.

Особенность состоит в том, что выбираются условия пробоя: среду и соотношение расстояний между электродами по поверхности массива  $L_d$  и на сквозной пробой  $L_s$ .

Обычно электрическая прочность твердых материалов выше, чем прочность жидкостей или газов, поэтому соотношение должно быть:  $L_d/L_s \gg 1$ , чтобы имел место пробой в толще материала, а не по поверхности. При этом чем выше электрическая прочность среды (трансформаторное масло), тем проще побить (внедриться) твердый материал.

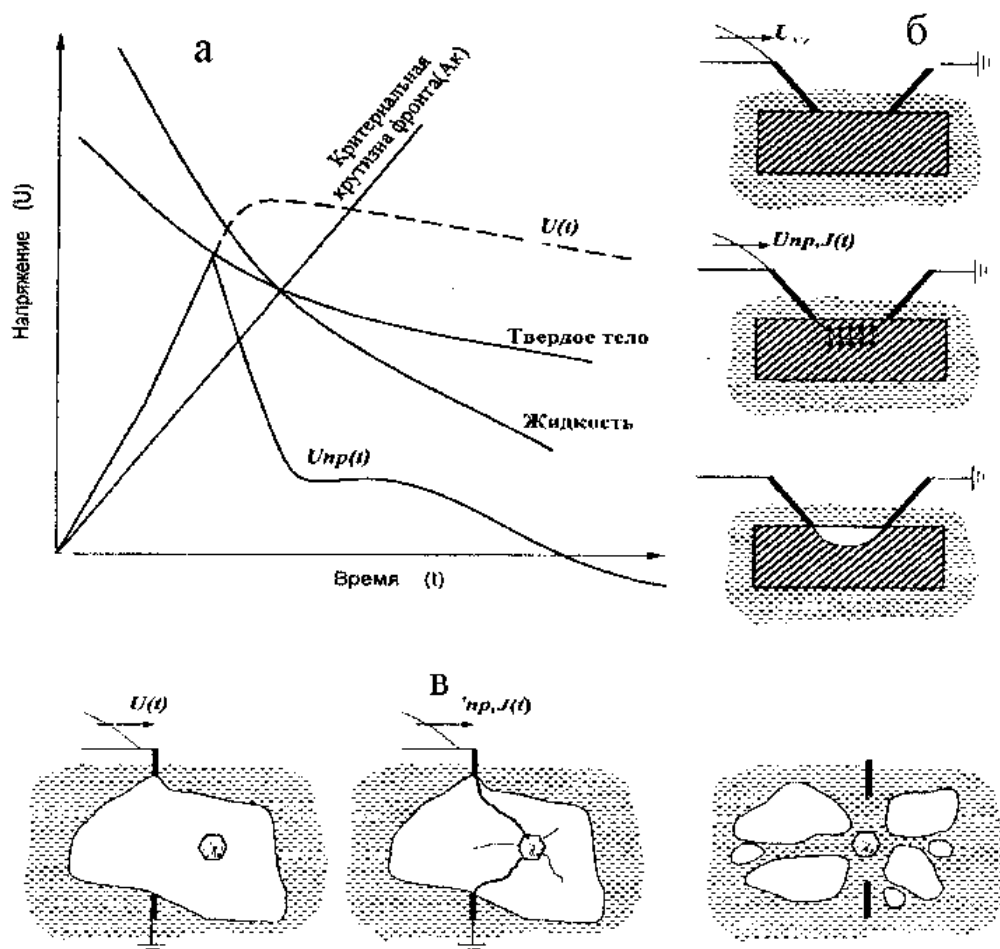


Рис. 4. 6. Принцип электроимпульсного разрушения: а) ВСХ различных сред; б) последовательность пробоя и разрушения в системе с одной свободной поверхностью; в) последовательно пробоя и разрушения фрагментов материала

Основная сложность при создании технологии ЭДМ состояла в создании условий, приводящих к разрушению не отдельных кусков, а монолита – т. е. в системе с одной свободной поверхностью (рис. 4. 6, б). Исследования вольт-секундных характеристик материалов (ВСХ), т. е. зависимость напряжения на образце до пробоя от времени воздействующего импульса (рис. 4. 6, а), позволили установить, что в области времен менее мкс электрическая прочность жидкостей нарастает быстрее, чем твердых тел. Точка пересечения ВСХ–Ак соответствует равенству электрических прочностей и вероятности пробоя жидкости и твердого тела, справа от Ак – прочнее твердое тело. Например при 1мкс горная порода электрически слабее трансформаторного масла, а 200 нс – технической воды.

После внедрения разряда в породу происходит (рис. 4. 6, б) протекание разрядного тока в канале разряда – микровзрыв с образованием воронки или фрагментация крупного блока (рис. 4. 6, в). Окружающая среда не только обеспечивает изоляцию, но служит рабочим телом для удаления продуктов разрушения породы.

Основные применения ЭДМ (рис. 4. 7):

- 1) бурение;
- 2) резание;
- 3) дробление;
- 4) разрушение железобетонных изделий;
- 5) очистка труб.

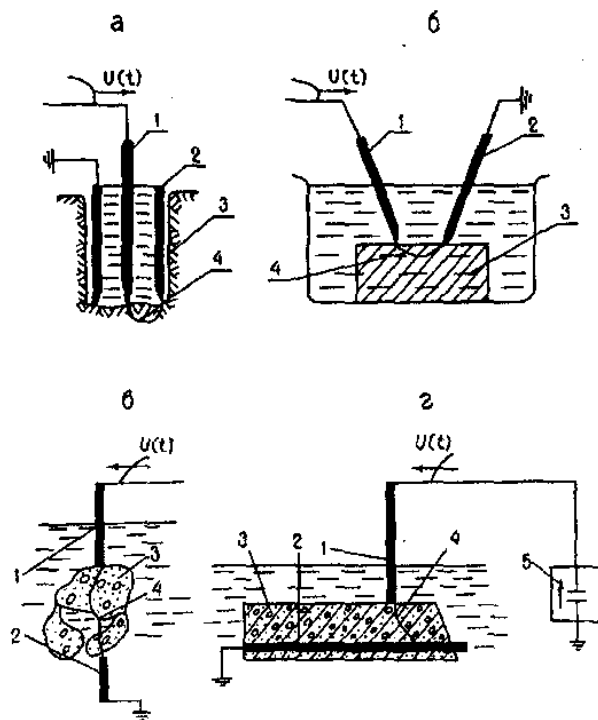


Рис. 4. 7. Схемы технологических процессов применения ЭДМ:

а) – бурение, б) резание, в) дробление, г) разрушение ЖБИ; 1, 2- высоковольтный и земляной электроды, 3 – разрушаемая порода, 4- искровой канал, 5- генератор импульсов

Наиболее интересное применение – бурение (рис. 4. 8). Принцип не требует вращения буровой колонки, износ бура минимален – за счет электроэрозии и абразивный от шлама. Вынос шлама – по традиционной схеме для промывки скважины. ЭДМ бурение хорошо подходит для бурения скважин больших диаметров (проверено до 1200мм).

Скорость бурения выше (от 0, 3 до 1, 5 пог.м/час при частоте 1Гц), чем при традиционных методах, при этом увеличивается при увеличении диаметра, что противоречит традиционной технологии. Это связано с тем, что появляется возможность увеличить число зазоров и ввести больше энергии.

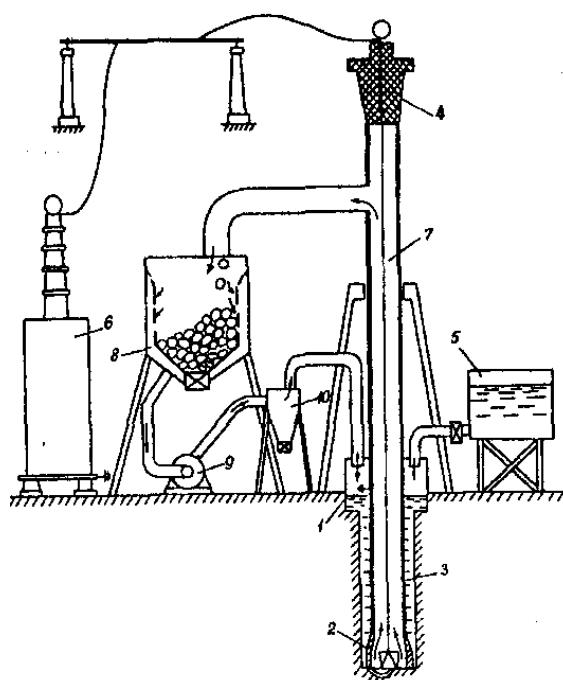


Рис. 4. 8.Схема бурения ЭДМ:

1 – кондуктор, 2 – буровая коронка, 3 – а) колонна буровых штанг, 4 – высоковольтный ввод, 5 – емкость с промывочной жидкостью, 6 – генератор, 7 – электроды, 8 – шламособорник, 9 – насос, 10 – гидроциклон

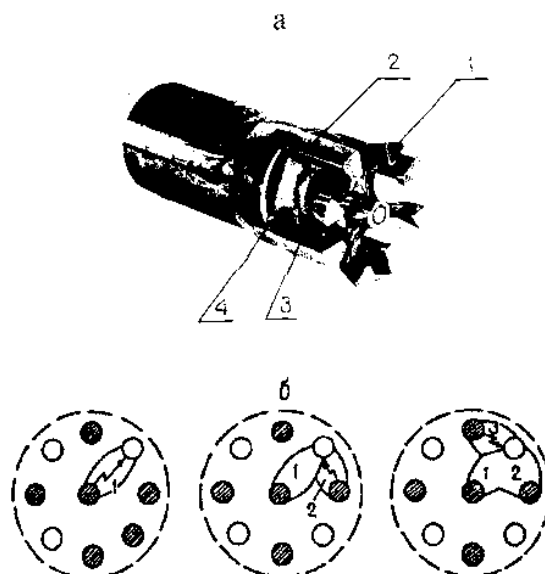


Рис. 4. 9. Буровой наконечник:

Установка «Волна» предназначена для очистки от твердых отложений, накипи, ржавчины и других загрязнений внутренних полостей металлических трубопроводов, в том числе в котлах от накипи, водопроводов, канализации и т. п.

Использование ударной волны, порождаемой электрическим разрядом в жидкости, позволяющей разрушать застойные зоны, отслаивать отложения со стенок труб. Диаметр труб – 80–200мм.

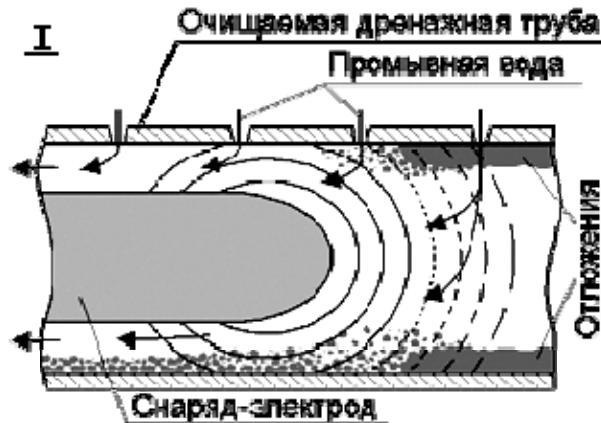


Рис. 4. 10. Технология очистки труб

#### 4. 5. Электроимпульсная обработка воды

Разряд в воде может быть использован для очистки воды. Механизм очистки воды – химический. В канале разряда при высокой температуре за счет разложения воды и примесей образуются различные соединения (озон, атомарный кислород, радикалы  $\text{OH}$ , перекись водорода) и УФ-излучения, генерируемые непосредственно в расплывённом водо-воздушном потоке, которые химически очень активны и вступают во взаимодействие с примесями. Недостатком является то, что большая часть воды остается вне канала разряда и имеется паразитный гидроудар.

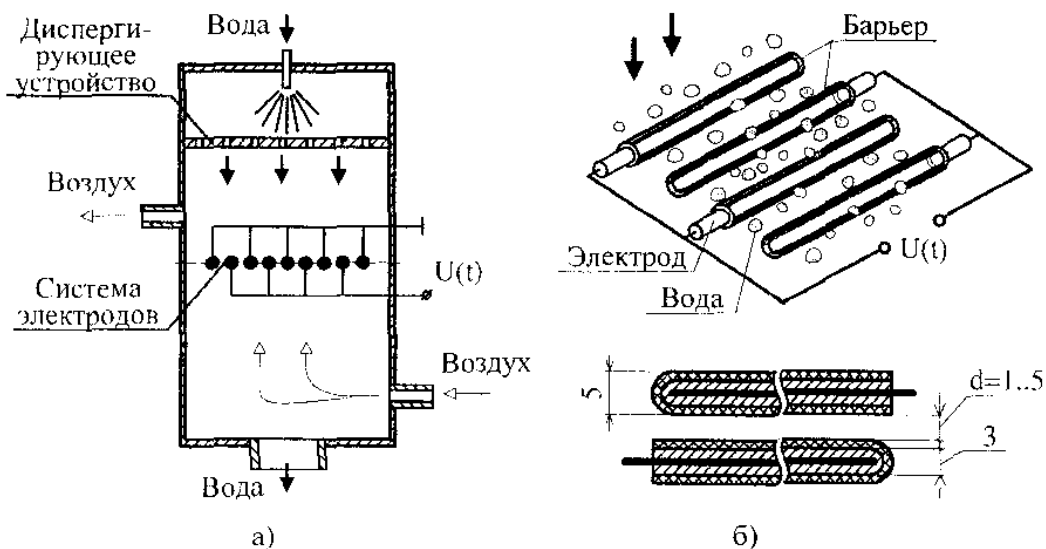


Рис. 4. 11. Реактор и система электродов электроимпульсной обработки воды

Использование разрядов с малым током (рис. 4. 11) позволяет вкладывать энергию в активизацию среды, т. е. образование химически активных частиц. Для этого используется стримерный коронный или барьерный разряд, однако последний позволяет повысить площадь обработки за счет взаимодействия не только по поверхности, но и в межэлектродном объеме. Для генерации импульсов служит магнитотиристорный генератор с энергией в импульсе 0, 5 Дж, напряжением 5–30 кВ, длительностью 0, 3–2, 5 мкс, частотой 50–1100 Гц.

На основе этой технологии создан водоочистной комплекс «Импульс» (НИИВН, Томск) предназначен для получения из подземных источников питьевой воды, соответствующей нормативным требованиям (рис. 4. 12 и 4. 13). Комплекс может использоваться для доочистки и обеззараживания речной воды и предварительно очищенных стоков. До соответствия требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода и водоснабжение населённых мест». Высокая эффективность очистки наблюдается по металлам (железо, марганец, свинец и т.д.) и органике (фенол, метанол, трихлорэтилена и т. д.). Причем, фенол разлагается до углекислого газа и воды без образования промежуточных продуктов.

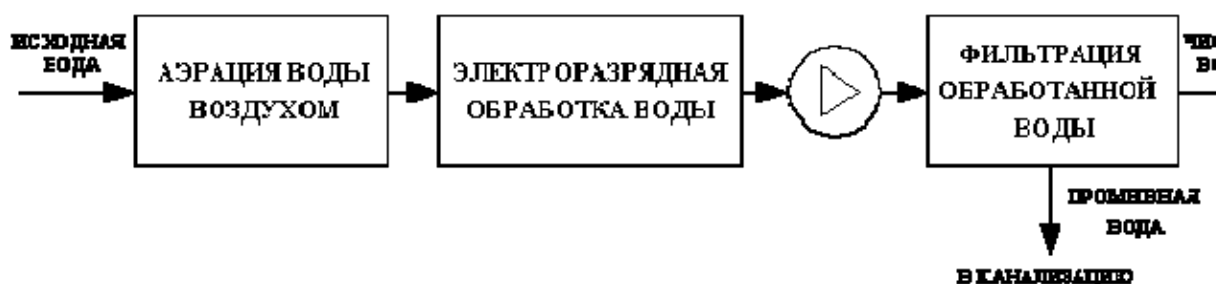


Рис. 4. 12. Технологическая схема водоочистки

Установка «ИМПУЛЬС» не изменяет солевого состава питьевой воды и не производит азотсодержащих соединений (нитратов, нитритов) и формальдегидов. Используемая технологическая схема (рис. 4. 12) очистки воды позволяет отказаться от применения хлорирования в технологии водоочистки. Электроразрядная обработка воды обеспечивает надёжное обеззараживание. Хлорирование необходимо только для обеззараживания сетей водоснабжения.

В качестве аэратора используется противопоточная вентиляционная градирня, предназначенная для окисления кислородом воздуха легко окисляемых примесей, очистки воды от органо-лептических загрязнений и удаления растворённых в воде газов (оксида углерода, сероводорода, метана и т. д.). Производительность от 10 до 150 м<sup>3</sup>/ч.



Рис. 4. 13. Внешний вид установки «Импульс»

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, МИТ прошла длинный путь и достигла высокой степени развития. МИТ не является альтернативой обычной энергетике с переменным или постоянным током. Эта техника предназначена для решения других задач, она работает на принципиально другие нагрузки.

Развитие этой экзотической энергетике потребовало создания всех элементов, имеющих аналоги в обычной энергетике, таких, как генераторы импульсов, коммутаторы, трансформаторы, линии для передачи энергии, системы для преобразования формы импульсов и т. д. Естественно, что все эти элементы работают на иных физических принципах, чем в обычной энергетике. Главное отличие состоит в том, что все элементы МИТ должны работать в наносекундном и субмикросекундном диапазонах времени.

Спектр гармоник наносекундных импульсов распространяется вплоть до сверхвысоких частот, поэтому для генерирования и передачи таких импульсов необходимо, чтобы аппаратура обеспечивала широкую полосу пропускания частот и в то же время могла выдерживать без пробоя высокие напряжения.

Для получения таких коротких времен в активных элементах МИТ используются самые различные физические явления, такие, как электрический разряд в газе, вакууме, жидких и твердых диэлектриках, электрический взрыв проводников, эффекты быстрого перемещения ферромагнетиков, быстропротекающие процессы в полупроводниках, неустойчивости в плазме, переходные процессы в линиях и т. д.

Развитие МИТ продолжается в настоящее время, при этом она находит свое применение не только в обычных для нее областях науки и техники, связанных с фундаментальными и оборонными исследованиями, но и прикладных задачах широкого применения, что открывает дальнейшие перспективы развития МИТ.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Абрамян Е. А. Промышленные ускорители электронов / Абрамян Е. А. М. : Энергоатомиздат, 1986.
2. Бурцев В. А. / Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / Бурцев В. А., Калинин Н. В. Лучинский А. В. М. : Энергоатомиздат, 1990.
3. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов / Вдовин С. С. Л. : Энергия, 1971.
4. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока // Под ред. В. Е. Фортова. М. : Наука, 2002.
5. Диденко А. И. Мощные электронные пучки и их применение / Диденко А. И., Григорьев В. П., Усов Ю.П. М. : Атомиздат, 1977.
6. Кацнельсон Б. В. Электровакуумные электронные и газоразрядные приборы: Справочник / Кацнельсон Б. В., Калугин А. М., Ларионов А. С. М. : Радио и связь, 1985.
7. Лукьянов С. Ю. Горячая плазма и управляемый термоядерный синтез / Лукьянов С. Ю. М. : Наука, 1975с.
8. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника / Месяц Г. А. М. : Наука, 2004.
9. Сильноточные электронные пучки в технологии. Новосибирск : Наука, 1983. С. 159–163.
10. Смирнов В. П. Получение сильноточных пучков электронов / Смирнов В. П. ПТЭ. №2. 1977. С. 2–31.
11. Физика и техника мощных импульсных систем / под ред. Е. П. Велихова. М. : 1986. С. 237–253.
12. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: справочник / под ред. Г.С. Кучинского. М. : Энергоатомиздат, 1987.



**Учебное электронное текстовое издание**

**Соковнин Сергей Юрьевич**

**МОЩНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА**

**Редактор**

*К.Б. Позднякова*

**Компьютерная верстка**

*авторская*

**Рекомендовано РИС ГОУ ВПО УГТУ-УПИ**

**Разрешен к публикации 04. 04. 09.**

**Электронный формат – pdf**

**Формат 60x90 1/8**

**Издательство ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ**

**620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19**

**Информационный портал  
ГОУ ВПО УГТУ-УПИ**

**<http://www.ustu.ru>**