

Исследование режимов работы ГИТ

Общие сведения

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

- малое внутреннее сопротивление ($10 \cdot 10^{-3}$ Ом),
- малая индуктивность ($1 \cdot 10^{-9}$ Г).

Это позволяет обеспечить малое время разряда (0,01-100 мкс), высокую эффективность передачи энергии в нагрузку, возможность достижения рекордных значений мощности (до 10^{13} Вт) и скорости нарастания тока (10^{13} А/с).

Кроме того, емкостные накопители обладают рядом эксплуатационных удобств (отсутствие движущихся элементов, простота обслуживания, модульный принцип исполнения, позволяющий отключать и легко заменять элементы при случайных повреждениях).

Недостатки: низкая плотность энергии по сравнению с другими типами накопителей (0,1-0,5 МДж/м³), при этом у крупных емкостных накопителей среднее значение плотности энергии (в расчете на весь объем) в 2-2,5 раза меньше. Поэтому емкостные накопители с энергией (10^6 - 10^7) Дж представляют собой крупные сооружения, занимающие залы и здания.

Емкостные накопители энергии классифицируются по следующим признакам:

- по зарядному напряжению (низкого напряжения - 10 кВ, среднего напряжения - до 100 кВ, высокого напряжения - свыше 100 кВ),
- по запасаемой энергии (малой-до 100 кДж, средней – до 1000 кДж, большой- свыше 1000 кДж),
- по длительности импульса (миллисекундного, микросекундного, наносекундного диапазонов).

Кроме того, ЕНЭ следует различать по типу конструкции и способов соединения элементов. Все большее развитие получают накопители в виде формирующих линий. Это, как правило, многокаскадные емкостные накопители высокого напряжения (10^5 - 10^6) В, работающие в наносекундном диапазоне времени, главная особенность которых состоит в том, что энергия в последних каскадах запасается в электрическом поле полосковых или коаксиальных линиях. В режиме короткого замыкания разряд линии происходит в волновом режиме, если произведение частоты собственных колебаний конденсатора на время пробега электромагнитной волны в диэлектрике последнего больше 1.

Рассмотрим ЕНЭ конденсаторного типа, выполненные по схеме параллельного соединения конденсаторов (ГИТ) (рис.1).

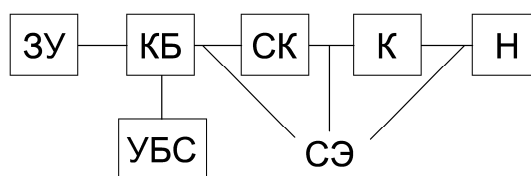


Рис.1. Блок-схема ГИТ

Энергия, запасается в конденсаторной батарее КБ, которая заряжается до заданного напряжения с помощью зарядного устройства ЗУ и разряжается на нагрузку через систему коммутации СК, состоящую из коммутаторов и устройств управления ими. Ток от конденсаторов к разрядникам и далее к нагрузке подводится с помощью соединительных элементов СЭ (кабелей или шин). Накопители с энергией 100 кДж и выше создают в виде однотипных модулей, состоящих из отдельных конденсаторов или групп конденсаторов с общим коммутатором. Энергия, запасаемая в одном модуле, ограничена значением, не приводящим к взрыву при пробое одного из конденсаторов и разряде на него всех конденсаторов модуля, обычно она не превышает 10-50 кДж и лишь при использовании специальных мер защиты может быть увеличена до 100-200 кДж. Каждый модуль может быть независимо подключен к нагрузке. Если цепи разряда отдельных модулей электрически не связаны (например, при питании устройств для накачки лазеров), то ГИТ представляет собой совокупность независимых элементов, включаемых одновременно или со сдвигом во времени.

Более типичны накопители, в которых ток от всех модулей должен быть передан в общую нагрузку, при этом используется дополнительная сборная шина К, к которой подводится ток от модулей и присоединяется нагрузка Н. Обязательным элементом накопителей являются устройства управления, блокировки и синхронизации УБС, обеспечивающие нормальную и безопасную работу.

Если ГИТ служит лишь как источник энергии, то к ним предъявляются следующие основные требования:

- надежность работы накопителя,
- отсутствие пробоев конденсаторов и изоляции,
- отсутствие самопроизвольного срабатывания коммутаторов,
- синхронность работы модулей.

К этой группе ГИТ относятся накопители с рекордно большим энергозапасом для питания лазеров, большинство ЕНЭ низкого напряжения, предназначенных для создания магнитного поля в больших многовитковых соленоидах, используемых для транспортировки плазменных сгустков и электронных пучков.

Такие же требования предъявляются к ГИТ, предназначенных для получения больших импульсных токов в малоиндуктивной нагрузке, и еще дополнительные требования, связанные с обеспечением высокой эффективности передачи энергии в нагрузку и высокой скорости нарастания тока. Эти требования могут быть выполнены в ГИТ, собственная

индуктивность которых мала. В ГИТ, питающих малоиндуктивную нагрузку, собственную индуктивность можно снизить путем уменьшения ее составляющих: конденсаторов (L_C), соединительных элементов отдельных модулей (L_M), коммутаторов (L_P), проводников, соединяющих модули с нагрузкой (L_m), и коллектора (L_K).

Собственная индуктивность

$$L_0 = \left(\frac{L_C}{N_{CM}} + L_M + L_P \right) \frac{1}{N_M} + L_m + L_K$$

Где N_{CM} - число конденсаторов в модуле;

N_M - Число модулей (полное число конденсаторов $N_C = N_{CM} \cdot N_M$).

Собственная индуктивность L_0 сама по себе мало характеризует качество конструкции ГИТ, так как этот показатель не является удельным показателем, Более удобно сравнивать ГИТ разной энергии по параметру $L_0 W_0$: чем он меньше, тем совершеннее конструкция ГИТ по обеспечению малой индуктивности. Задача минимизации собственной индуктивности ГИТ- комплексная. Разумный уровень требований к L_0 определяется параметрами нагрузки (нет смысла добиваться значения L_0 меньших, чем $(0,1-0,2)L_H$), а требования к индуктивности элементов цепи должны диктоваться вкладом этих элементов в общую индуктивность. Вместе с тем важны конструктивные и экономические соображения, в частности простота конструкции ГИТ, удобство их монтажа и обслуживания, а также стоимость ГИТ, включая стоимость монтажных работ.

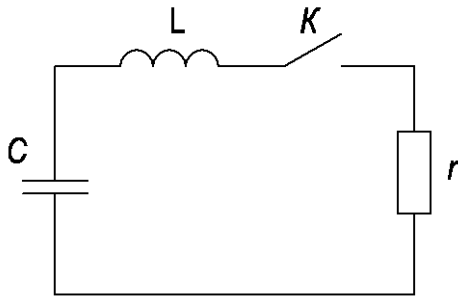
При разработке ГИТ возникают следующие основные проблемы:

- создание конденсаторов с повышенной удельной энергией,
- разработка системы коммутации с требуемой пропускной способностью,
- разработка соединительных элементов.

Разрядные процессы в ГИТ

Различные схемы разрядных контуров можно представить в виде последовательно соединенных C, L, r, K (рис 2). Параметры L и r включают в себя индуктивности и активные сопротивления нагрузки L_H и r_H , дуги разрядного устройства (L_D и r_D), конденсаторов накопителя C (L_C и r_C), токоведущих шин или кабелей (L_m и r_m), соединительных элементов (L_M и r_M).

В общем случае параметры $L(I)$ и $r(I)$ являются переменными, зависящими от разрядного тока, причем зависимости могут быть нелинейными. Нелинейность определяется электромагнитными процессами в разрядных устройствах и нагрузке. В данной работе для простоты расчетов L и r будем считать постоянными величинами.



Значения тока $i(t)$ и напряжения $U(t)$ в начальный момент времени $t = 0$ равны:

$$i_0 = 0, U_0 = U_C = \frac{q_0}{C}$$

Уравнение Кирхгофа для разрядной цепи после замыкания ключа **К**:

$$U_L + U_r + U_C = 0$$

Рис.2. Разрядная схема ГИТ

Подставив значения напряжений на элементах цепи, запишем:

$$L \frac{di}{dt} + ri + \frac{q}{C} = 0,$$

Взяв производную по времени от этого уравнения, получим:

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + r \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0.$$

Характеристическим уравнением полученного дифференциального уравнения будет уравнение:

$$P^2 + \frac{r}{L}P + \frac{1}{LC} = 0,$$

корни которого имеют вид: $P_{1,2} = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$.

В зависимости от соотношения активного и волнового сопротивления контура (соотношения между параметрами r , L , C), характеристическое уравнение может иметь различные решения (вещественные или комплексные корни).

Существует 3 случая решения характеристического уравнения и, соответственно, 3 типа переходного процесса:

1. Случай, когда $r > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, (или $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 > \frac{1}{LC}$), тогда характеристическое уравнение имеет два вещественных корня. Ток найдется из уравнения:

$$i = \frac{U_0}{2L \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}} (e^{P_1 t} - e^{P_2 t}). \quad (1)$$

Причем $P_{1,2} < 0$, кроме того $|P_2| > |P_1|$, поэтому при изменении t от 0 до ∞ величины $e^{P_1 t}$ и $e^{P_2 t}$ убывают от 1 до 0, притом разность $e^{P_1 t} - e^{P_2 t}$ всегда положительна, следовательно, ток не меняет своего направления, т.е. конденсатор все время разряжается. Поэтому такой переходный процесс называется **апериодическим**.

Ток в данном случае имеет единственный максимум. Время максимума тока – t_{im} найдется из уравнения: $t_m = \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)/(P_1 - P_2)$

Амплитуда тока в момент времени максимума тока: $I_m = i(t_m)$.

2. Случай, когда $r = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, (или $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}$), тогда характеристическое уравнение имеет один вещественный корень и для тока справедливо уравнение:

$$i = -\frac{U_0}{L} t e^{-\frac{r}{2L}t} \quad (2)$$

Анализируя выражение (2) можно прийти к аналогичным с предыдущим случаем выводам, т.е. ток не меняет своего направления, и разряд конденсатора имеет апериодический характер. При дальнейшем уменьшении r разряд конденсатора переходит в колебательный, следовательно, случай $r = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ является **предельным случаем апериодического переходного процесса**.

Время максимума тока t_{im} в этом случае найдется как: $t_m = 2\frac{L}{r}$.

3. Случай, когда $r < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, (или $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 < \frac{1}{LC}$), тогда характеристическое уравнение имеет два комплексно-сопряженных корня с отрицательной вещественной частью. Значения тока со временем будут регулярно повторяться, поэтому такой переходный процесс называется **колебательным**. Ток найдется из уравнения:

$$i = -\frac{U_0}{\omega' L} \cdot \sin \omega' t \cdot e^{-\frac{r}{2L}t}, \quad (3)$$

где:

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{r^2 C}{4L}} \quad (4)$$

где: ω' – угловая частота колебаний контура,

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – угловая частота собственных незатухающих колебаний контура при $r = 0$;

Период колебаний тока:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2}} \quad (5)$$

При $r = 0$ время достижения первого максимума тока совпадает с $1/4$ периода собственных незатухающих колебаний $t_{01} = T_0/4$, где $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$, а

при наличии активного сопротивления в разрядной цепи ГИТ максимальное значение тока в цепи I_m достигается к моменту времени:

$$t_m = (\frac{\pi}{2} - \text{arctg}(\frac{r}{2\omega'L})) / \omega'$$

Из анализа формул (1) – (3) следует, что для увеличения тока ГИТ необходимо увеличивать емкость накопителя и всемерно уменьшать индуктивность и активное сопротивление разрядного контура. Наибольшая амплитуда разрядного тока будет в контуре без потерь ($r = 0$)

$$i = I \cdot \text{Sin} \omega t \quad I = \frac{U_0}{\omega L}; \quad (6)$$

Один из путей определения значений L и r разрядного контура по экспериментально полученным осциллограммам является определение L и r контура по затуханию кривой тока. В этом случае по осциллограмме тока определяют амплитуды первой и третьей полуволны и период колебания (рис.3). Затем определяют значение декремента затухания кривой тока.

$$\Delta = \frac{I_1}{I_3} = e^{\frac{r}{2L} T_1} \quad \text{или} \quad \ln \Delta = \frac{r}{2L} \cdot T_1. \quad (7)$$

Тогда, с учетом (7), индуктивность разрядного контура можно определить из соотношения (4)

$$L = \frac{T_1^2}{C(4\pi^2 + (\ln \Delta)^2)} \quad (8)$$

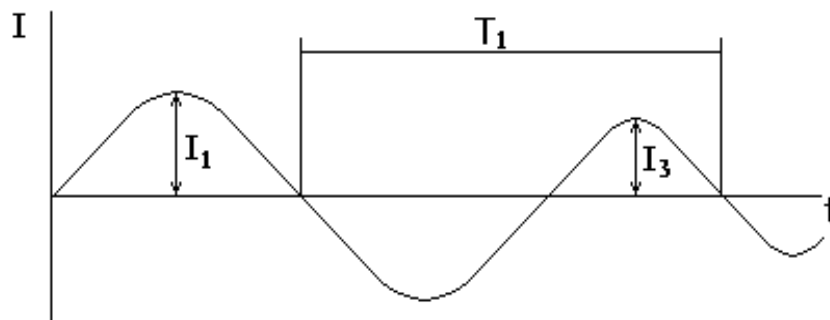


Рис.3. Кривая разрядного тока ГИТ

Сопротивление разрядного контура можно определить, воспользовавшись соотношением (7)

$$r = \frac{2L \cdot \ln(\Delta)}{T_1} \quad (9)$$

В том случае, если отношение $r / \sqrt{\frac{L}{C}}$ пренебрежимо мало, можно воспользоваться более простыми формулами

$$L = \frac{T_1^2}{4\pi^2 \cdot C} \quad \text{и} \quad r = \frac{T_1 \cdot \ln \Delta}{2\pi^2 \cdot C}. \quad (10)$$

Амплитуду разрядного тока можно рассчитать по соотношению:

$$I_{max} = I I * k_{от}, \quad (11)$$

где I - амплитуда тока на осциллограмме, В
 $k_{от}$ - коэффициент преобразования сигнала датчика тока.

Описание экспериментальной установки

Принципиальная электрическая схема установки представлена на рис.4. Емкостный накопитель ГИТ $C_3 \div C_{10}$ собран из 8 конденсаторов ИК-25-12. Модульная конструкция накопителя позволяет менять емкость батареи ГИТ от 12 до 96 мкФ.

Батарея заряжается от зарядного устройства. Для коммутации используется псевдоискровой разрядник (импульсный тиратрон) ТДИ-150/25, запуск которого осуществляется от двухканального генератора ГЗ.

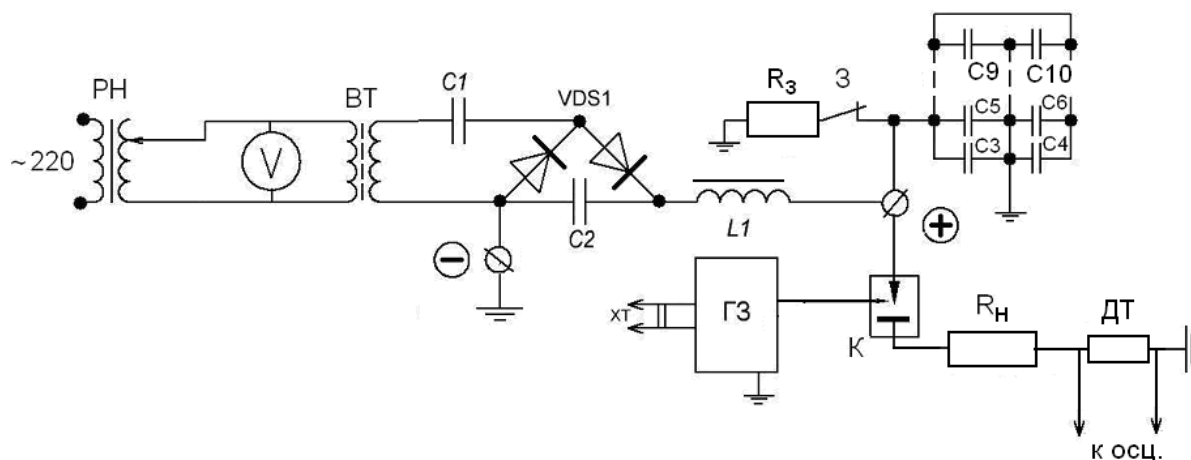


Рис.4. Принципиальная электрическая схема установки

Для регистрации тока в контуре используется активный шунт или импульсный трансформатор тока (Пояс Роговского). Сигнал с датчика тока (ДТ) подается на осциллограф.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с принципом работы, устройством ГИТ и мерами, обеспечивающими безопасность проведения работы.
2. Ознакомиться с используемыми для регистрации тока элементами и их характеристиками.
3. Подготовить осциллограф к работе.

4. Провести регистрацию кривой разрядного тока для разных параметров ГИТ (изменение емкости батареи).
5. По осциллограммам тока определит период колебания, декремент затухания и амплитуду тока. По полученным значениям рассчитать параметры r и L разрядного контура по формулам (8)-(10), импеданс Z генератора, максимальную амплитуду тока, занести данные в таблицу.
6. Смоделировать разрядный контур ГИТ в любом пакете программ для анализа электрических схем. Параметры контура (R , L , C) выбираются из экспериментальных данных. Получить осциллограмму тока в контуре.
7. Проанализировать полученные результаты, сравнить результаты компьютерного моделирования режимов работы ГИТ и экспериментальные результаты.

Контрольные вопросы

1. Принцип действия ГИТ.
2. Области применения сильных импульсных токов.
3. Какое влияние оказывает сопротивление разрядной цепи и нагрузки на параметры разрядного тока?
4. Чем опасен пробой одного из конденсаторов накопителя ГИТ в процессе его работы?