

Федеральное агентство по образованию
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ю. Н. Бочаров Г.А.Шнеерсон Э. И. Янчус

Генератор импульсных токов

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2012

УДК 621.373 (075.8)

Генератор импульсных токов: Учеб. пособие / Ю.Н. Бочаров, Г.А. Шнеерсон, Э.И. Янчус. СПб, 2012. 100 с.

Пособие соответствует государственному образовательному стандарту магистерской и инженерной подготовки направлений 140400 “Электроэнергетика и электротехника” по программе “Техника и физика высоких напряжений” и 140200 “Электроэнергетика” по специальности 140201 “Высоковольтная электроэнергетика и электротехника”.

Рассмотрены вопросы проектирования высоковольтных импульсных установок для получения больших импульсных токов. Учебное пособие содержит принципиальные схемы и способы компоновки установок различного технологического назначения, а также справочный материал по выбору для них оборудования и изоляции. Приведены расчетные формулы для определения индуктивности и переходного сопротивления токоведущих элементов при резко выраженном поверхностном эффекте. Рассмотрены электродинамические усилия и механический расчет токоведущих шин.

Пособие предназначено для студентов 5-го курса, изучающих дисциплину “Проектирование источников питания”.

© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2012

ВВЕДЕНИЕ

В высоковольтной импульсной технике для получения большой импульсной мощности широко используются емкостные накопители энергии, представляющие собой батарею конденсаторов, которая после зарядки с помощью коммутирующих приборов разряжается на нагрузку. Типичным представителем этого класса установок является генератор импульсных токов (ГИТ).

Мощные импульсные установки применяются в электротехнологии для магнитно-импульсной штамповки деталей, сепарации размельченного металлолома в импульсном магнитном поле, обработки деталей с помощью электрогидравлического эффекта, для питания мощных импульсных лазеров, получения сильных магнитных полей в физических исследованиях и т.д.

Один из наиболее важных показателей ГИТ - удельная энергоемкость - энергия, запасаемая в единице объема накопителя, или единице массы. Для импульсных конденсаторов этот показатель составляет 50 - 100 кДж/м³ (30 - 70 Дж/кг), для батареи в целом, с учетом других элементов ГИТ, он в несколько раз ниже. При заданной энергии батареи $W = \frac{1}{2} CU^2$ импульсная мощность пропорциональна U^2/R в случае питания активной нагрузки с сопротивлением $R > 2\sqrt{L_0/C}$, где L_0 - собственная индуктивность ГИТ, и пропорциональна $U \sqrt{\frac{W}{L_0 + L_H}} \cdot \left(\frac{L_H}{L_0 + L_H} \right)$ - в случае питания индуктивной нагрузки L_H .

Отсюда следует, что для получения максимальной импульсной мощности при заданной энергии, с одной стороны, можно увеличивать рабочее напряжение U , а с другой стороны, необходимо уменьшать L_0 - собственную индуктивность ГИТ. Однако эти два условия несовместимы. При возрастании рабочего напряжения увеличиваются толщина изоляции и длина всех изоляционных промежутков, а вследствие этого и собственная индуктивность ГИТ. Причем в процентном отношении рост индуктивности значительно превышает рост напряжения, особенно при напряжении выше 50 кВ. Поэтому рабочее напряжение ГИТ обычно не выше указанного значения. Уменьшение собственной индуктивности ГИТ достигается параллельным включением специальных малоиндуктивных конденсаторов с высокой удельной энергоемкостью, использованием плоской или коаксиальной ошиновки с малой толщиной изоляции, параллельным включением большого числа малоиндуктивных кабелей, а также за

счет применения малоиндуктивных коммутаторов и сокращения длин всех изоляционных промежутков. Использование энергоемких конденсаторов позволяет сократить размеры установки и тем самым уменьшить длину токоведущих элементов а, следовательно, их индуктивность.

При проектировании ГИТ выбор принципиальной схемы во многом определяется техническими характеристиками коммутирующих приборов, их пропускной способностью по току, индуктивностью, пусковыми характеристиками. Чертежи некоторых типов коммутирующих приборов приведены в приложении, точные размеры на чертежах не указаны. Выбор размеров электродов, рабочих искровых промежутков и конструкции изоляторов производят на основе данных по электрической прочности газов в однородных и неоднородных электрических полях, а также электрической прочности газовых промежутков при развитии разряда по поверхности диэлектриков. Длины изоляционных промежутков выбирают таким образом, чтобы вероятность перекрытия изоляции не превышала $10^{-5} - 10^{-6}$, то есть, например, при коэффициенте вариации $\sigma/\bar{U}_p \cong 0,1$ рабочее напряжение должно быть примерно в 1,8 - 2 раза ниже среднего пробивного (разрядного \bar{U}_p).

Большие трудности вызывает обеспечение надежной работы коммутаторов, особенно при их большом количестве. Пусковые характеристики и обеспечение параллельной работы коммутаторов рассмотрены в учебном пособии [5].

Расчет параметров ГИТ рекомендуется производить поэтапно. Вначале необходимо сделать грубую оценку собственной индуктивности ГИТ, исходя

из коэффициента использования $\eta = \frac{L_H}{L_0 + L_H}$, который обычно выбирается

0,6 - 0,9 и, выбрав основное оборудование и вариант компоновки, рассмотреть возможный вклад в эту индуктивность отдельных участков цепи разряда. После такой оценки можно внести изменения в принятое решение, сделать окончательный выбор оборудования и компоновки ГИТ, рассмотреть конструкцию отдельных узлов.

Расчет электродинамических усилий и механический расчет конструкции рекомендуется проводить для тех узлов установки, в которых протекает большой ток, в основном это центральные шины и нагрузка. Однако при необходимости такой расчет полезно провести для шин ячеек, отдельных разделок кабелей, разрядников.

Авторы выражают благодарность студентам кафедры ИЭ и ТВН А. Андрееву, Р. Андрееву, Н. Камковой, М. Максимова, О. Мартыновой и И. Степанову за помощь в оформлении иллюстраций.

1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ, РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ

Генератор импульсных токов (ГИТ) представляет собой батарею конденсаторов, число, зарядное напряжение и емкость которых определяют его энергию. После зарядки от выпрямительного устройства батарея разряжается на нагрузку с помощью управляемых коммутаторов. Ток от конденсаторов к коммутаторам и далее к нагрузке подводится с помощью соединительных плоских шин или кабелей. Как правило, накопители с энергией 10^5 Дж и выше создают в виде однотипных модулей (ячеек), состоящих из одного или нескольких конденсаторов с общим коммутатором. Энергия одного модуля исходя из условий взрывобезопасности и пропускной способности коммутатора по току выбирается равной 10 - 50 кДж, и лишь в отдельных случаях может быть увеличена до 50 - 100 кДж. Все модули работают синхронно, параллельно на общую нагрузку. При этом возникает необходимость в дополнительных сборных шинах (коллекторов), к которым подводится ток от модулей и присоединяется нагрузка. Принципиальная схема ГИТ на большую энергию, состоящего из N модулей (ячеек), показана на рис.1.1, где C_1, C_2, \dots, C_N - емкости конденсаторов модулей; S_1, S_2, \dots, S_N - коммутаторы; C_K - емкость одного конденсатора. На основании принципиальной схемы ГИТ можно составить эквивалентную схему (рис. 1.2), где емкость модуля

$$C_M = n_M C_M;$$

n_M - количество конденсаторов модуля; L_M и R_M - индуктивность и сопротивление модуля; L_S и R_S - индуктивность и сопротивление коммутатора; $L_{л}$ и $R_{л}$ - индуктивность и сопротивление передающей линии одного модуля; $L_{цш}$ и $R_{цш}$ - индуктивность и сопротивление центральных шин; L_H и R_H - индуктивность и сопротивление нагрузки.

Эта схема приводится к простейшей схеме (рис. 1.3), где

$$C_{\Gamma} = C_M N, \quad L_{\Gamma} = \frac{L_M}{N} + \frac{L_S}{N} + \frac{L_N}{N} + L_{цш}, \quad R_{\Gamma} = \frac{R_M}{N} + \frac{R_S}{N} + \frac{R_N}{N} + R_{цш},$$

и затем к схеме рис. 1.4, где $C = C_{\Gamma}$, $L = L_{\Gamma} + L_H$, $R = R_{\Gamma} + R_H$.

Дифференциальное уравнение контура имеет вид [1]

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0,$$

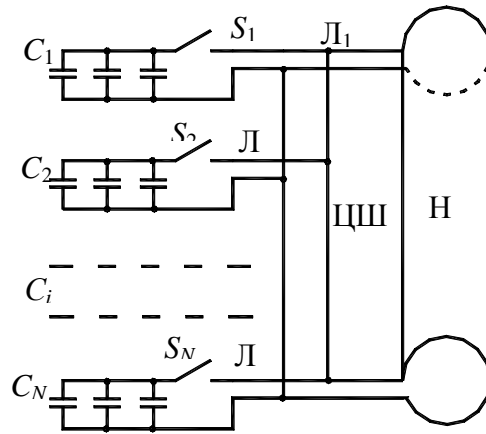


Рис.1.1. Принципиальная схема ГИТ

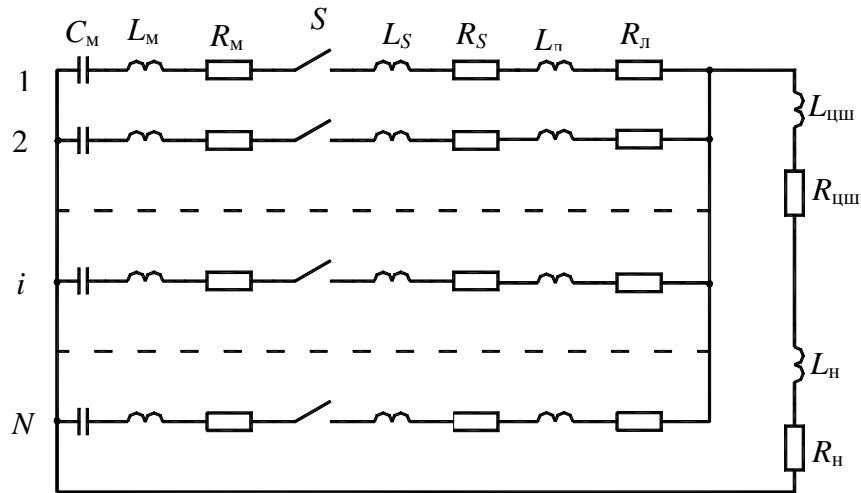


Рис.1.2. Эквивалентная схема ГИТ

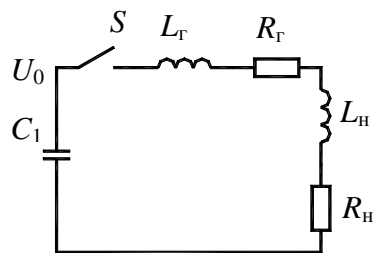


Рис.1.3. Одноконтурная эквивалентная схема ГИТ

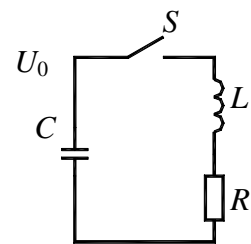


Рис.1.4. Простейшая схема замещения ГИТ

Обозначив $R/L = 2\delta$, $1/LC = \omega_0^2$, получим

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + 2\delta \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0.$$

Характеристическое уравнение $\alpha^2 + 2\delta\alpha + \omega_0^2 = 0$ имеет два корня

$$\alpha_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}.$$

В начальный момент времени $t=0$ ток в контуре $i(0)=0$, конденсатор C заряжен $U_{C(0)} = U_0$. В этом случае выражение для тока представим в виде

$$i(t) = \frac{U_0}{L(\alpha_1 - \alpha_2)} [\exp(\alpha_1 t) - \exp(\alpha_2 t)].$$

Известны три режима разряда конденсатора.

1. *Апериодический режим* разряда имеет место при $\delta > \omega_0$, то есть $R > 2\sqrt{L/C}$. Ток в контуре изменяется по закону

$$i(t) = (U_0/\beta L) \exp(-\delta t) \operatorname{sh}(\beta t),$$

где $\beta = \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$.

2. *Критический режим* возникает при $\delta = \omega_0$, то есть при $R = 2\sqrt{L/C}$.

Корни характеристического уравнения $\alpha_1 = \alpha_2 = \delta$.

Выражение для тока получит вид

$$i(t) = \frac{U_0}{L} t \exp(-\delta t).$$

Максимум тока будет при $t = 1/\delta$:

$$I_{max} = 2U_0/eR.$$

3. Колебательный режим разряда при $\delta < \omega_0$, то есть $R < 2\sqrt{L/C}$, частота колебаний

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Соответственно период затухающих колебаний

$$T' = 2\pi/\omega' = 2\pi / \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}.$$

Ток в контуре

$$i(t) = \frac{U_0}{\omega' L} \exp(-\delta t) \sin(\omega' t) = I_{m0} \exp(-\delta t) \sin(\omega' t).$$

Первая амплитуда тока

$$I_{m1} = \frac{U}{\omega' L} \exp(-\delta T' / 4).$$

Затухание тока принято характеризовать декрементом колебаний: $\Delta = \exp(\delta T')$. При малом затухании $\Delta \leq 1,4 - 1,5$ $T' \approx T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$.

Для получения импульсов тока униполярной формы в цепь разряда ГИТ включают резисторы с нелинейным сопротивлением (рис. 1.5), например, из вилита или тервита [2].

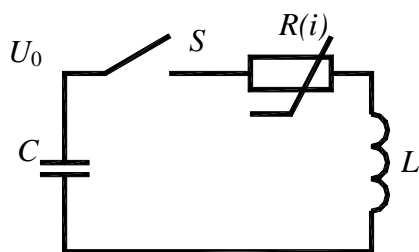


Рис.1.5. Эквивалентная схема ГИТ с нелинейным резистором

Указанные материалы характеризуются тем, что их удельное сопротивление резко уменьшается с увеличением протекающего через них тока. Эта зависимость может быть представлена в виде $\rho = a_0 j^{\alpha-1}$. Для вилита $\alpha = 0,13 - 0,15$; для тервита $\alpha = 0,18 - 0,22$, a_0 имеет размерность $B \cdot A^{-\alpha} \cdot cM^{2\alpha-1}$.

Напряженность электрического поля в нелинейном сопротивлении связана с плотностью протекающего через него тока:

$$E = j\rho = a_0 j^\alpha \cdot \text{sign}(j) , \quad (1.1)$$

где $\text{sign}(j)$ - знак направления тока, $\alpha_0 = 800 - 1200 \text{ В см}^{-1} (\text{А} / \text{см}^2)^{-\alpha}$.
Падение напряжения на нелинейном сопротивлении равно:

$$U_R = Eh = a_0 h \left| \frac{i}{S} \right|^\alpha \text{sign}(i) , \quad (1.2)$$

где h - полная высота дисков нелинейных сопротивлений; S - площадь поперечного сечения дисков.

Дифференциальное уравнение, описывающее процесс разряда ГИТ с нелинейным сопротивлением,

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{L} \frac{dU_R}{dt} + \frac{i}{LC} = 0. \quad (1.3)$$

Подставляя (1.2) в (1.3), получаем:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \left(\frac{\alpha_0 h \alpha}{L S^\alpha} \right) |i|^{\alpha-1} \frac{di}{dt} + \frac{i}{LC} = 0.$$

Начальные условия имеют вид:

$$i(0) = 0 ; \quad \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U_0}{L} ,$$

где U_0 - начальное напряжение на батареи конденсаторов.

Введем безразмерные переменные:

$$\tau = \omega t = \frac{t}{\sqrt{LC}} ; \quad J = i \left(\frac{Z S^\alpha}{a_0 h \alpha} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} ,$$

где $Z = \sqrt{L/C}$ - волновое сопротивление контура. При этом уравнение (1.3) и начальные условия преобразуются к виду

$$\frac{d^2 i}{d\tau^2} + |J|^{\alpha-1} \frac{dJ}{d\tau} + J = 0;$$

$$J(0) = 0; \quad \left. \frac{dJ}{d\tau} \right|_{t=0} = \frac{U_0}{Z} \left(\frac{ZS^\alpha}{a_0 h \alpha} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} = A. \quad (1.4)$$

Следует отметить, что величина $\frac{J}{A} = \frac{iZ}{U_0} = \frac{i(t)}{I_{m0}}$ - отношение мгновенного значения тока $i(t)$ в контуре с нелинейным сопротивлением к амплитуде тока I_{m0} при незатухающих колебаниях.

Нелинейное уравнение (1.3) решено численно на ЭВМ для резисторов с различными значениями $\alpha = 0,14; 0,18; 0,22$ и различными начальными условиями $10 \leq A \leq 120$. Результаты решения приведены на рис.1.6 для

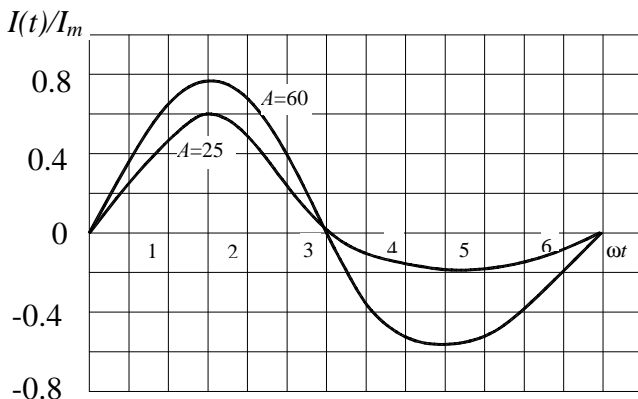


Рис.1.6. Функция $J/A=i(t)/I_{m0}=F(\omega t)$ для вилитовых дисков с параметром $\alpha=0.18$

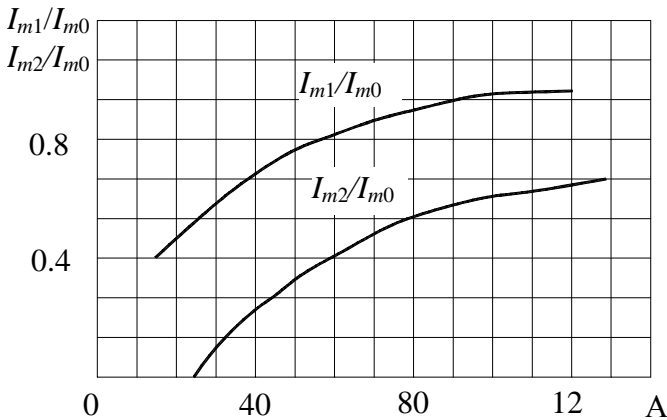


Рис.1.7. Зависимость $I_{m1}/I_{m0}=F_1(A)$ и $I_{m2}/I_{m0}=F_2(A)$ для $\alpha=0.18$

$\alpha = 0,18$ при $A=25$ и $A=60$, а на рис. 1.7 приведены зависимости $f_1(A)$ - отношение первой амплитуды тока к I_{m0} и $f_2(A)$ - отношение второй (отрицательной) амплитуды тока к I_{m0} :

$$f_1(A) = \frac{J_{m1}}{A} = \frac{I_{m1}}{I_{m0}}$$

$$\text{и } f_2(A) = \frac{J_{m2}}{A} = \frac{I_{m2}}{I_{m0}}. \quad (1.5)$$

Результаты численного расчета позволяют выбрать для колебательного контура с произвольными параметрами (C, U_0, L) нелинейное сопротивление, обеспечивающее получение униполярного импульса тока с желаемым отношением I_{m1}/I_{m0} и I_{m2}/I_{m0} . Для этого, задавшись соотношениями (1.5), надо по кривым рис. 1.7 найти параметр A и подставить его в формулу (1.4). Если пара-

метры контура разряда C , U_0 , L и Z известны, то, выбрав материал дисков с определенными значениями α_0 и α , из формулы (1.4) можно найти отношение h/S^α . При этом основной определяемой величиной является высота дисков h , поскольку площадь их поперечного сечения весьма мало влияет на величину сопротивления (так как она входит в степени α) и определяется пропускной способностью материала, из которого изготовлены диски. Оптимальным является $A=30 - 40$. При этом первая амплитуда тока составляет 65-75% максимального значения $I_{m0} = U_0/Z$.

Как показал опыт эксплуатации вилитовых дисков в генераторах импульсных токов, они могут многократно пропускать импульсные токи с плотностью до 1 кА/см^2 и длительностью импульса около 10 мкс. Напряженность электрического поля в дисках не должна превышать 3 кВ/см .

Другой способ получения униполярных импульсов тока - закорачивание нагрузки в момент максимума тока (метод кроубар), или после первого полупериода тока (метод отсечки). Эквивалентная схема контура для этого случая показана на рис. 1.8.

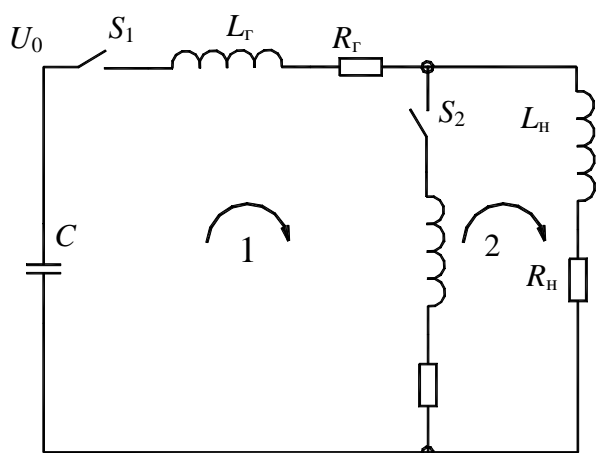


Рис.1.8. Эквивалентная схема ГИТ с системой "Кроубар"

При включении основного ключа S_1 ток в контуре ГИТ и в нагрузке изменяется по закону $i = I_{m0} \exp(-\delta_1 t) \sin(\omega_1 t)$,

где

$$I_{m0} = U_0 \sqrt{\frac{C}{L_G + L_H}},$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{C(L_G + L_H)}}, \quad \delta_1 = \frac{R_G + R_H}{2(L_G + L_H)}.$$

К моменту максимума тока энергия из конденсаторов ГИТ переходит в энергию магнитного поля нагрузки $W_H = L_H I_m^2 / 2$ и индуктивности контура ГИТ $W_G = L_G I_m^2 / 2$.

При включении ключа S_2 в момент максимума тока $t_1 = T_1/4$, где $T_1 = 2\pi\sqrt{(L_G + L_H)C}$, образуются два связанных контура (1 и 2) и возникает переходный процесс, в результате которого энергия, запасенная в нагрузке W_H и в индуктивности ГИТ W_G , рассеивается в активных сопротивлениях цепей. Формы импульсов тока в отдельных ветвях цепи i_1 , i_2 и i_H представлены на рис. 1.9. Ток нагрузки равен сумме двух составляющих:

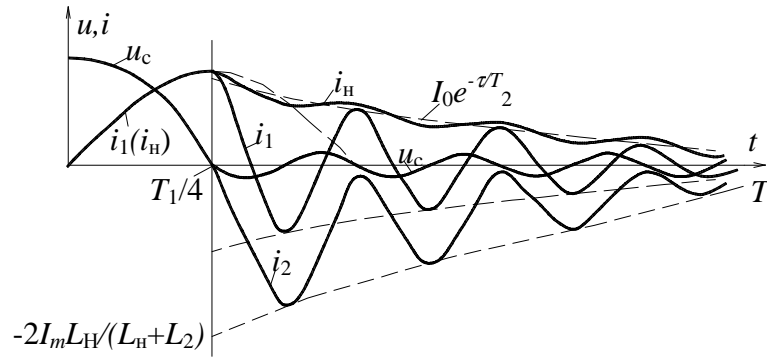


Рис.1.9. Осциллограммы импульсов напряжений и токов с системой “Кроубар” в различных цепях ГИТ

$$i_H = I_0 \exp(-\tau/T_2) + I_m \frac{L_2}{L_2 + L_H} \exp(-\delta \tau) \cos(\omega \tau), \quad (1.6)$$

где $\tau = t - T_1/4$. Первая составляющая - ток разряда индуктивности нагрузки L_H , заряженной током I_m , через ключ S_2 . Он спадает по экспоненциальному закону с постоянной времени контура 2: $T_2 = \frac{L_H + L_2}{R_H + R_2}$. Амплитуда тока

$I_0 = I_m \frac{L_H}{L_H + L_2}$ находится из условия равенства потокоцеплений для контура 2 до включения ключа S_2 и после его включения

$$L_H I_m = (L_H + L_2) I_0.$$

Вторая составляющая тока связана с разрядом индуктивности L_T в колебательном режиме через емкость конденсаторной батареи C и параллельно включенные цепи нагрузки и ключа S_2 . Ток в индуктивности L_T и емкости C равен

$$i = I_m \exp(-\delta \tau) \cos(\omega \tau),$$

где

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C \left(L_T + \frac{L_H L_2}{L_H + L_2} \right)}}; \quad \delta = \frac{R_T + \frac{R_2 R_H}{R_2 + R_H}}{2 \left(L_T + \frac{L_2 L_H}{L_2 + L_H} \right)}.$$

Между ветвями цепи с ключом S_2 и нагрузкой этот ток делится обратно пропорционально индуктивностям. Поэтому через нагрузку протекает часть этого тока

$$I_m \frac{L_2}{L_2 + L_H} \exp(-\delta\tau) \cos(\omega\tau).$$

Таким образом, ток нагрузки при $t > T_1/4$ описывается выражением (1.6). Как видно из (1.6), амплитуда колебаний на вершине импульса пропорциональна $L_2/(L_2 + L_H)$, то есть для уменьшения амплитуды колебаний надо уменьшать L_2 так, чтобы соблюдалось условие $L_2 \ll L_H$. При наличии затухания в контуре ключ S_2 выгоднее включать не в момент максимума тока, а несколько позже, когда напряжение на конденсаторах ГИТ равно нулю, то есть выполняется условие

$$L \frac{di}{dt} + Ri = 0, \quad (1.7)$$

где $L = L_\Gamma + L_H$, $R = R_\Gamma + R_H$.

Если $i_1 = I_m \exp(-\delta_1\tau) \cos(\omega_1\tau)$, то условие (1.7) можно записать в виде

$$L[-\delta_1 \cos(\omega_1\tau) - \omega_1 \sin(\omega_1\tau)] + R \cos(\omega_1\tau) = 0.$$

Оно выполняется при $\tau = \tau_1$, которое отсюда можно найти

$$\operatorname{tg}(\omega_1\tau_1) = \frac{-L\delta_1 + R}{\omega_1 L_1} = \left(-\frac{\delta_1}{\omega_1} + \frac{R}{\omega_1 L} \right), \text{ или } \operatorname{tg}(\omega_1\tau_1) = \frac{R}{2\omega_1 L_1},$$

τ_1 - искомый момент включения S .

При включении ключа S_2 в момент максимума тока напряжение на нагрузке и на ключе S_2 близко к нулю. Поэтому при выборе коммутатора, используемого в качестве ключа S_2 , необходимо иметь в виду, что сначала при включении S_1 он должен выдерживать полное рабочее напряжение батареи U_0 , а его включение должно производиться, когда напряжение на нем близко к нулю. Таким образом, коммутатор должен иметь пределы срабатывания по напряжению: от почти нулевого напряжения до номинального напряжения установки.

2. ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ИЗОЛЯЦИЯ ГИТ

2.1. Импульсные конденсаторы

Вопросы расчета и проектирования конденсаторов изложены в работе [3]. Сведения об импульсных конденсаторах, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в справочной книге [4], основные технические характеристики некоторых типов конденсаторов даны в табл. 2.1 и 2.2.

При выборе конденсаторов для высоковольтной импульсной установки на первый план обычно выдвигается требование малой индуктивности и высокой удельной энергоемкости. Использование конденсаторов с высокой удельной энергоемкостью позволяет не только уменьшить габариты установки при заданной энергии, но уменьшить и ее индуктивность. Это объясняется тем, что при малых габаритах сокращается длина токоведущих шин и, следовательно, снижается индуктивность установки в целом. Внутренняя индуктивность конденсаторов, используемых в ГИТ, по возможности должна быть мала. Однако в крупных ГИТ (более 100 кДж) использовать слишком малоиндуктивные конденсаторы нет особой необходимости. Вполне достаточно, чтобы их общая индуктивность L_K не превышала 10 % индуктивности L_T контура генератора в

Параметры и номинальный режим работы конденсаторов

Т а б л и ц а 2.1

N п/п	Конденсатор	$U_{\text{номп.}}$ кВ	C_n мкФ	W_n Дж	w Дж/дм ³	L нГн	Режим разряда			Ресурс 10 ³ , имп.
							$I_{\text{нм.}}$ кА	Δ	f Гц	
1	ИК-6-150	6	150	2700	98	60	40	2	0,01	10
2	ИК-25-12	25	12	3750	57	40	200		0,01	3
3	ИКМ-25-12	25	12	3750	57	25	250	1,5	0,05	3
4	ИК-40-5	40	5	4000	60	40	200	1,5	0,01	3
5	ИК-50-3	50	3	3750	57	40	200	1,5	0,01	3
6	ИК-100-0,25	100	0,25	1250	56	150	50	1,5	0,05	5
7	ИК-100-0,4	100	0,4	2000	90	150	50	1,5	0,05	2
8	КМК-30-10	30	10	4500	65	10	300	1,4	0,1	10
9	КМК-40-6	40	6	4800	55	10	300	1,4	0,1	10
10	КМКИ-50-0,1	50	0,1	125	30,6	20	80	1,4	0,1	10
11	КМВД-50-0,1	50	0,1	125	8	15	80	1,2	1,0	10000
12	КМК-50-4	50	4	5000	64	15	4000	1,4	0,1	10
13	КМКИ-60-2	60	2	3600	160	20	300	25	0,004	1,0
14	КМКИ1-100-0,1	100	0,1	500	23	30	80	25	1,0	100
15	КМКИ-100-0,5	100	0,5	2500	110	20	150	25	0,02	100
16	КК-100-1,3	100	1,3	6500	54	-	150	1,4	0,1	10

П р и м е ч а н и е. Ресурс указан при номинальном напряжении и колебательной форме тока разряда с указанным в таблице декрементом колебаний Δ .

Данные по конструкции и изоляции конденсаторов.

Т а б л и ц а 2.2

N п/п	Конденсатор	Масса, кг	Габариты, мм	Диэлектрик, корпус	$E_{ном.}$ кВ/мм	$tg\delta$ $f=50$ Гц	$tg\delta$ $f=1000$ Гц
1	2	3	4	5	6	7	8
1	ИК-6-150	50	310*150*590	Б+К,М	86	0,6	-
2	ИК-25-12	108	314*314*670	Б+К,М	70	1,0	-
3	ИКМ-25-12	110	314*314*670	Б+К,М	67	1,0	-
4	ИК-40-5	106	314*314*670	Б+К,М	72	1,0	-
5	ИК-50-3	108	314*314*670	Б+К,М	70	1,0	-
6	ИК-100-0,25	32	455*150*326	Б+К,Д	70	0,6	-
7	ИК-100-0,4	32	455*150*326	Б+К,Д	87	0,6	-
8	КМК-30-10	95	675*160*640	Б+К,М	75	-	0,6
9	КМК-40-6	132	380*360*630	Б+К,М	72	-	0,6
10	КМКИ-50-0,1	6	230*70*230	Б+К,Д	80	-	0,6
11	КМВД-50-0,1	22	326*131*320	Б+ПЭ+КМ,Д	56	-	0,1
12	КМК-50-4	98	520*225*650	Б+К,М	78	-	0,6
13	КМКИ-60-2	32	455*150*326	Б+ПФ+К,Д	140	-	0,5
14	КМКИ1-100-0,1	28	390*172*325	Б+ПФ+К,Д	73	-	0,1
15	КМКИ-100-0,5	23	450*150*326	Б+ПФ+К,Д	115	-	0,5
16	КК-100-1,3	200	510*280*810	Б+К,М	77	-	0,6

Примечания: 1. Тип изоляции: Б - конденсаторная бумага; ПЭ - полиэтиленовая пленка; ПФ - лавсановая пленка; К - касторовое масло; КМ - конденсаторное нефтяное масло. 2. Тип корпуса: М - корпус металлический; Д - корпус из диэлектрического материала.

режиме короткого замыкания. В импульсных конденсаторах в качестве изоляции используется конденсаторная бумага, пропитанная растительным или минеральным маслом. Рабочая напряженность электрического поля в таких конденсаторах может достигать 70 - 80 кВ/мм. Энергия, запасаемая в единице объема (удельная энергоемкость), для таких конденсаторов может составлять 100 Дж/дм³. Конденсаторы с бумажно-масляной изоляцией на частоте 10⁴ - 10⁵ Гц имеют добротность 10 - 15 и применяются для работы в режиме одиночных импульсов. Они могут быть использованы при небольшой частоте повторения импульсов (1 - 2 импульса в минуту), но при этом импульс тока разряда должен иметь апериодическую форму или колебательную форму с большим декрементом колебаний 2 - 10 и более.

Повышение добротности конденсаторов достигается за счет уменьшения потерь в обкладках (фольгах) секций и в выводах конденсатора путем равномерного распределения тока между выводами секций. Для уменьшения потерь в изоляции секций используются синтетические пленки из неполярных диэлектриков (полиэтилен, полипропилен, лавсан, фторопласт-4). Такая изоляция имеет низкий $tg\delta$ при частоте приложенного напряжения вплоть до 10⁷ Гц. В

качестве пропитывающей среды при высоких частотах могут использоваться фтороорганические жидкости. Конденсаторы с комбинированной пленочно-бумажной изоляцией (табл.2.2, тип изоляции Б+ПЭ+К и Б+ПЭТФ+К) могут иметь достаточно высокую добротность 20 - 50. Их можно использовать в схемах с частотой напряжения до 3 - 5 МГц при импульсах колебательной формы с малым декрементом колебаний. Рабочая напряженность электрического поля в таких конденсаторах может достичь 100 -120 кВ/мм, удельная энергоемкость - 120 Дж/дм³ (0,12 МДж/м³). При сниженной рабочей напряженности поля до 30 кВ/мм они могут работать с частотой повторения импульсов несколько герц.

Высоковольтные импульсные конденсаторы (рис.2.1) выпускаются или в металлических корпусах, или в корпусах из изоляционного материала. Последние удобнее использовать там, где требуется изоляция между конденсаторами

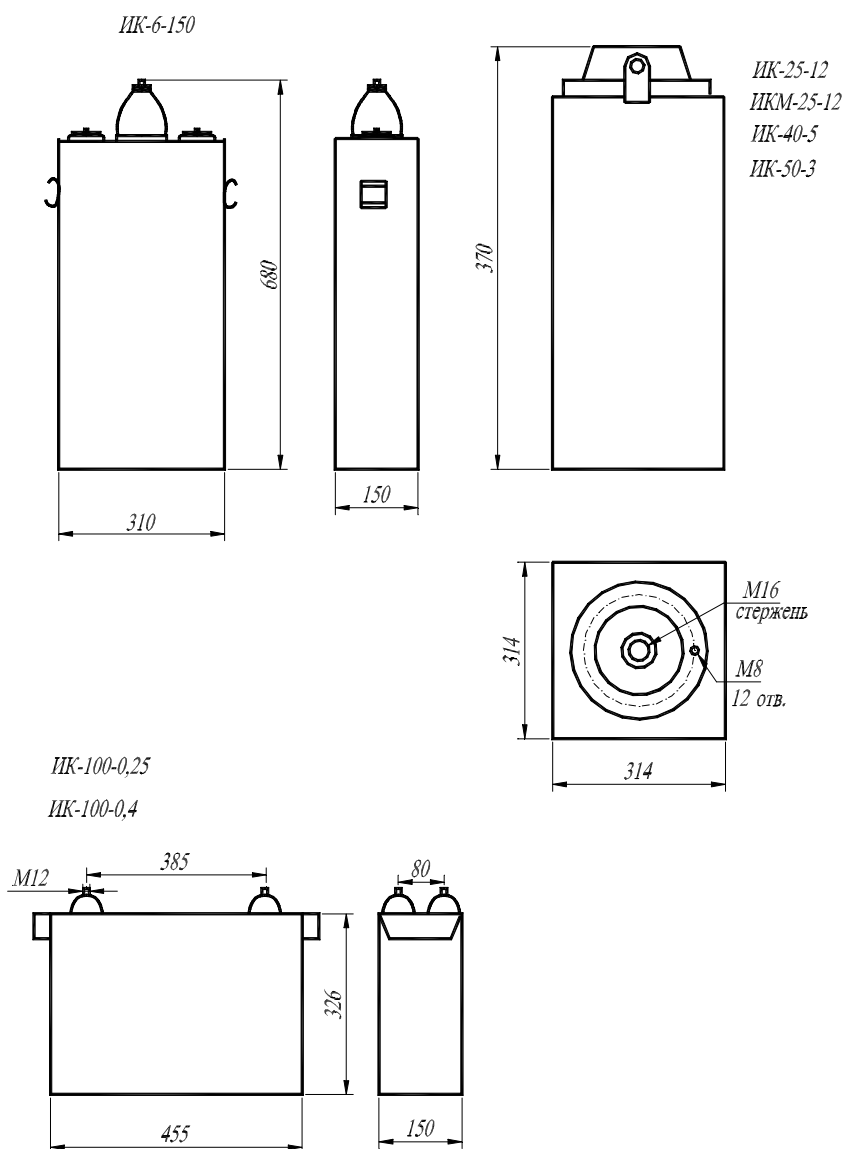


Рис.2.1. Конструктивные размеры конденсаторов

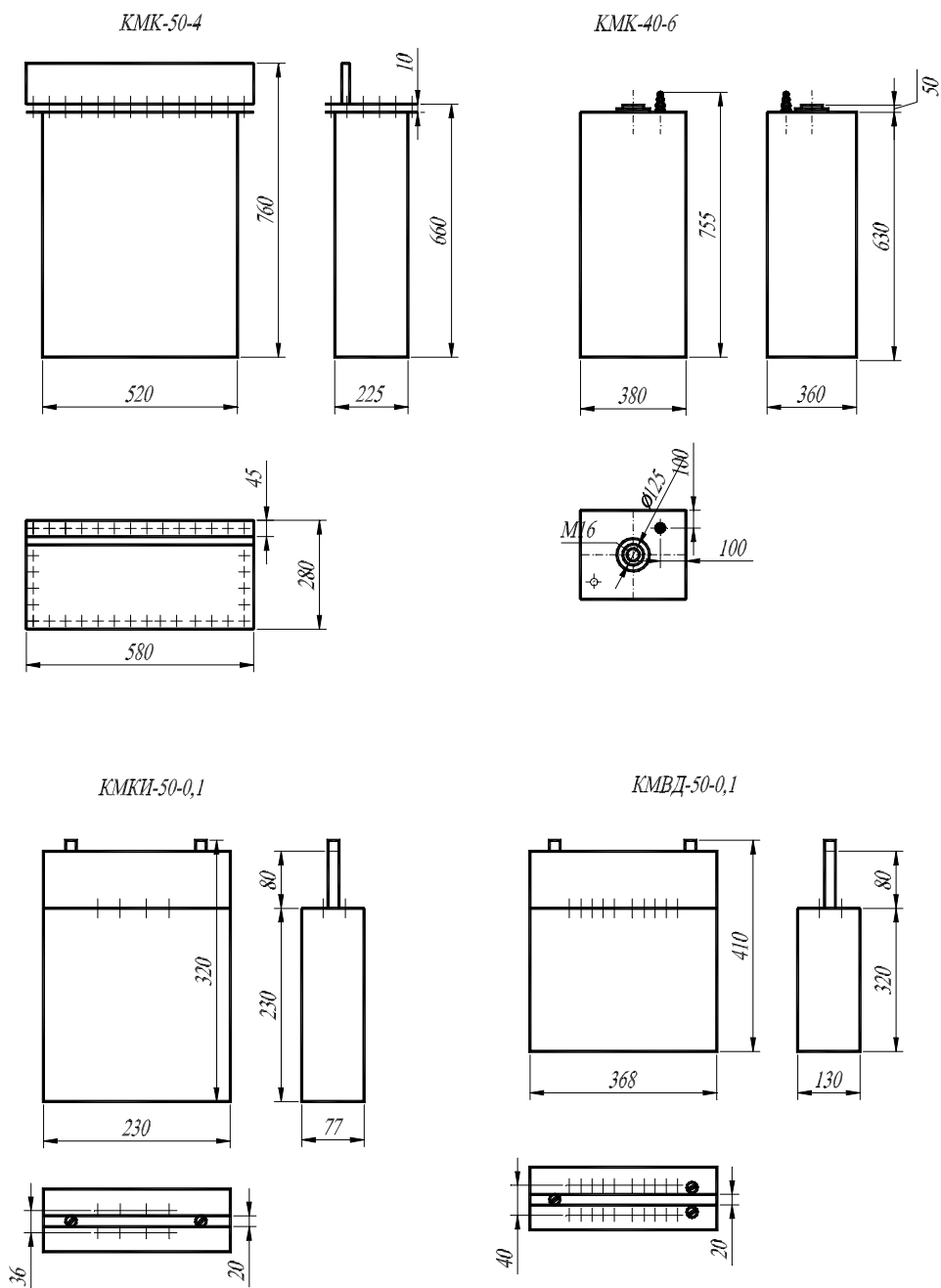


Рис.2.1 (продолжение)

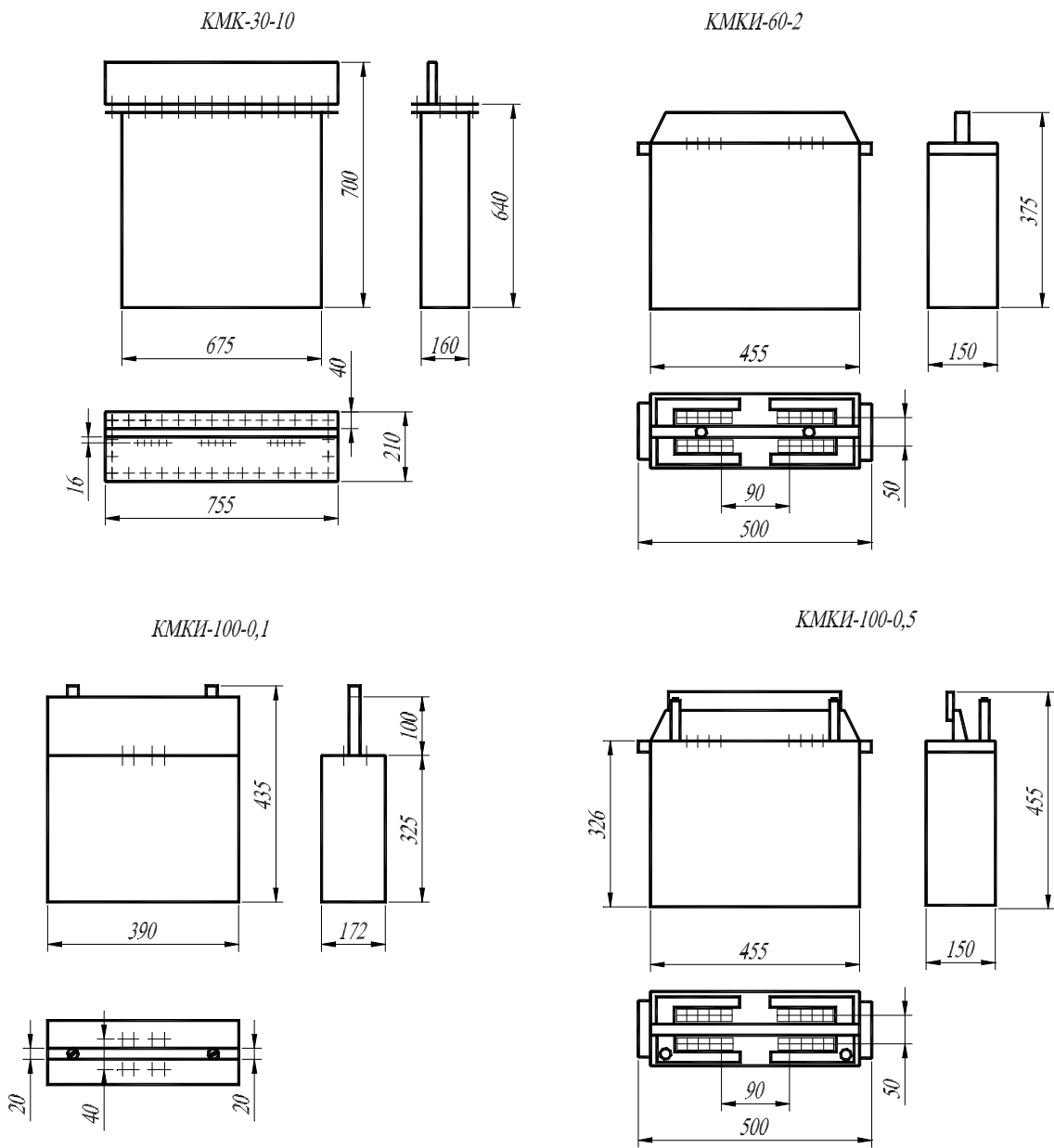


Рис. 2.1 (продолжение)

КК-100-1,3

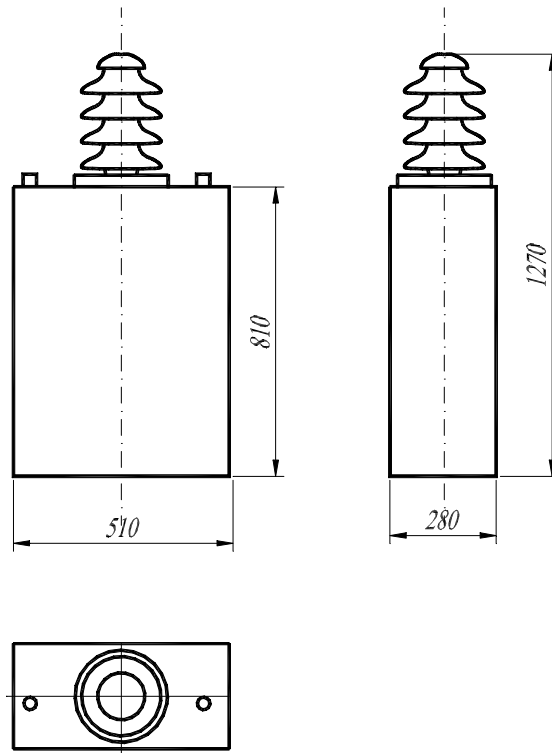


Рис.2.1 (продолжение)

или группами конденсаторов, то есть конденсаторы находятся под разными потенциалами, как, например, в схемах ГИН. Конденсаторы на рабочее напряжение 100 кВ и более чаще выполняются в изоляционных корпусах. Большинство малоиндуктивных конденсаторов выполняются в металлическом баке с изоляционной крышкой, имеющей выводы в виде двух рядов болтов, разделенных изоляционной перегородкой (КМК-30-10, КМК-50-4 на рис.2.1), либо с металлической крышкой, имеющей специальный малоиндуктивный коаксиальный вывод. Другим выводом конденсатора является металлический корпус (ИК-25-12, ИК-50-3). Конденсаторы в изоляционном корпусе обычно имеют выводы в виде двух рядов шпилек, разделенных изоляционной перегородкой (КМКИ и КМВД), или разнесенных на расстояние, обеспечивающее необходимую электрическую прочность между выводами противоположной полярности

напряжения (ИК-100-0,25, ИК-100-0,4). Конструкция выводов малоиндуктивных конденсаторов позволяет производить малоиндуктивное соединение их со сборными шинами соединительными кабелями или коммутирующими разрядниками. Выводы, а также внутренние соединения секций конденсаторов должны обладать высокой динамической устойчивостью при воздействии больших импульсных токов. В некоторых случаях высоковольтные импульсные установки проектируются для работы на нагрузку, не обладающую слишком малой индуктивностью. Не требуется малой индуктивности и от конденсаторов. Промышленностью такие конденсаторы выпускаются в металлическом корпусе с выводами в виде изоляторов проходного типа (КК-100-1,3 на рис.2.1).

2.2. Коммутирующие приборы

Физические основы, принципы работы и основные технические характеристики высоковольтных импульсных коммутирующих приборов рассмотрены в учебном пособии [5]. В генераторах импульсных токов используются вакуумные, игнитронные, искровые и твердотельные разрядники, а также мощные импульсные тиристоры. Вакуумные, искровые и твердотельные разрядники на большие напряжения и токи серийно промышленностью не выпускаются. Поэтому в каждом случае их приходится разрабатывать исходя из конкретных условий. Примеры конструкций таких разрядников приведены в приложении .

Возможность использования того или иного коммутирующего прибора в конкретной установке определяется его техническими характеристиками. Основными из них являются: номинальное рабочее напряжение U_n , максимальное амплитудное значение коммутируемого тока I_m , допустимая длительность импульса t_n . Последние два параметра I_m и t_n , как правило, взаимосвязаны: при уменьшении амплитуды тока длительность импульса может быть увеличена, и наоборот. Поэтому более общей характеристикой является допустимое количество электричества

$$Q = \int_0^{t_n} i dt ,$$

протекающее через прибор за импульс. Электрическая прочность управляемого коммутирующего прибора должна быть выше его номинального рабочего напряжения. Для разрядников это напряжение статического пробоя U_{oc} при плавном подъеме выпрямленного напряжения ($U_{oc} > U_n$). Вероятность самопроизвольного (неуправляемого) пробоя при напряжении на коммутаторе

меньше U_n должна быть очень мала, а иногда и вообще недопустима, так как при этом нарушается нормальный режим работы установки. В крупных установках, например, в генераторах импульсных токов, где используется большое количество параллельно работающих коммутаторов (N разрядников), вероятность самопроизвольного срабатывания хотя бы одного из них допускается не более $0,1 - 0,01$, а для каждого разрядника в отдельности в N раз меньше.

Коммутирующий прибор должен надежно срабатывать от управляющего импульса. Амплитуда управляющего импульса напряжения обычно меньше номинального напряжения U_n коммутирующего прибора. Для вакуумных и искровых разрядников управляющего импульса напряжения $U_{\text{п}} \approx (0,5 - 1)U_n$. Энергия управляющего импульса должна быть достаточна для формирования высокопроводящего канала в промежутке между управляющим и одним из основных электродов. В некоторых случаях, например, в искровых разрядниках с искажением поля, весьма жесткие требования предъявляются к длительности фронта пускового импульса, которая не должна превышать $5 - 15$ нс. Параметры пускового импульса выбираются таким образом, чтобы коммутирующий прибор работал в широком диапазоне напряжения, начиная от некоторого минимального $U_{\text{р min}}$ до номинального U_n и имел приемлемые пусковые характеристики. Время запаздывания срабатывания t_3 коммутирующего прибора определяется как интервал времени от момента подачи пускового импульса до момента быстрого нарастания тока (рис. 2.2). Время t_3 является статистической величиной с законом распределения, близким к нормальному. Оно характеризуется средним временем запаздывания срабатывания t_3 и его дисперсией $\bar{\sigma}^2$.

Коэффициент вариации t_3 (отношение $\bar{\sigma}/\bar{t}_3$) обычно составляет $0,05 - 0,2$. При номинальном рабочем напряжении t_3 и $\bar{\sigma}$, как правило, имеют минимальные значения, а при уменьшении напряжения увеличиваются. Требования к t_3 и $\bar{\sigma}$ могут быть разные. Особенно жесткие требования предъявляются к пусковым характеристикам приборов, работающих синхронно на общую нагрузку, а также, когда необходимо с высокой точностью обеспечить заданные задержки времени между импульсами разных источников питания.

В вакуумных разрядниках время запаздывания срабатывания t_3 в основном определяется временем коммутации, которое зависит от скорости поступления в разрядный промежуток десорбированных газов, продуктов испарения металла электродов и диэлектрических стенок изоляции. Время ионизации га-

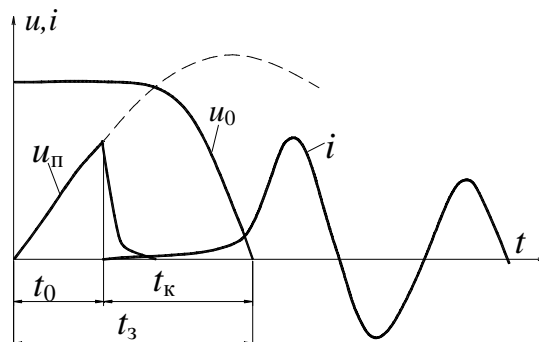


Рис.2.2. К определению времени t_k и времени запаздывания t_3

зов весьма мало, однако поступление паров и газов в промежуток - процесс газодинамический и по сравнению с электрическими процессами протекает медленно. Поэтому время коммутации вакуумных разрядников сравнительно велико и составляет приблизительно 100 - 500 нс. Оно зависит от давления остаточного газа, расстояния между электродами, величины тока поджига, материала изолирующей втулки поджига и места поджига. При поджиге на катоде время коммутации в 3-5 раз меньше, чем при поджиге на аноде. Пусковые характеристики вакуумных разрядников рассмотрены в [5].

Минимальное напряжение срабатывания вакуумных разрядников $U_{p \min}$ весьма мало, при мощном поджиге на катоде оно не превышает 500 - 1000 В, поэтому их удобно использовать в ГИТ в качестве закорачивающего разрядника (в режиме "кроубар").

В искровых разрядниках время запаздывания срабатывания $t_3 = t_0 + t_c + t_\phi + t_k$, где t_0 - время, за которое напряженность электрического поля в газовом промежутке достигает значения, достаточного для возникновения ионизационных процессов, это время зависит от крутизны фронта пускового импульса; t_c - статистическое время ожидания первого электрона, способного образовать лавину; t_ϕ - время формирования стримера; t_k - время коммутации, то есть время перехода стримера в искровой канал, имеющий достаточно высокую проводимость, так что сопротивление канала становится меньше переходного сопротивления коммутируемой цепи.

Составляющие t_c , t_ϕ , и t_k зависят от длины промежутка, от уровня перенапряжения, рода газа и давления.

После формирования стримера начинается нагрев канала разряда и увеличение его проводимости. В соответствии с теорией Ромпе - Вайцеля [5] сопротивление канала искры изменяется следующим образом:

$$R = \frac{S_0}{\sqrt{2\alpha p^{-1} \int_0^t i^2 dt}}, \quad (2.1)$$

где S_0 - длина искрового промежутка, см; p - давление газа в камере разрядника, атм; α - постоянная для данного рода газа, атм·см²/(В²·с), для воздуха и азота $\alpha = 1$ атм см²/(В² с), для аргона $\alpha = 20$ атм см²/(В² с).

Время коммутации - время спада напряжения на разряднике от $0,9U_0$ до $0,1U_0$:

$$t_k = 21 \frac{pS_0^2}{aU_0^2} + \frac{L_k}{R_H}, \quad (2.2)$$

где L_k - индуктивность канала искры - определяется как индуктивность проводника длиной S_0 , R_H - сопротивление нагрузки, если нагрузка активная, или $\sqrt{L/C}$ - характеристическое сопротивление контура разряда, если нагрузка индуктивная.

Формулу (2.2) рекомендуется использовать при амплитуде импульсов тока $I_m \leq 10$ кА.

По теории С.И. Брагинского сопротивление канала искры [5] рассчитывается по формуле

$$R = \frac{S_0}{\left(4\pi\sigma^2 / \rho_0 \xi\right)^{1/3} \int_0^t i^{2/3} dt} \quad (2.3)$$

где S_0 - длина искрового канала в метрах, σ - электропроводность плазмы искрового канала, принимается равной $\sigma = (2,5 - 3)10^4$ (Ом м)⁻¹; ρ_0 - плотность газа в камере разрядника, для воздуха при нормальных атмосферных условиях $\rho_0 = 1,29$ кг/м³; $\xi = 3,5 - 4,5$ - безразмерный коэффициент.

Ввиду того, что в формулу (2.3) σ входит в степени 2/3, а ξ - в степени 1/3, некоторая неопределенность выбора этих параметров не дает большой погрешности в определении R . Формулу можно использовать не только для искры в газах, но и для искры в жидкости и в твердых диэлектриках.

Время коммутации искрового разрядника по теории С.И. Брагинского:

$$t_k = 11,4(\rho_0 \xi I / 4\pi\sigma^2 E_0^3)^{1/3} + L_k / R_H. \quad (2.4)$$

Здесь обозначения те же, что и в формуле (2.3), E_0 - средняя напряженность электрического поля между основными электродами разрядника, В/м; все другие параметры в формулу (2.4) также подставляются в системе СИ. Формула применима при импульсах тока с амплитудой 10 - 150 кА.

В силу ряда допущений, принятых в теориях Ромпе - Вайцеля и С.И.Брагинского, формулы (2.2) и (2.4) не обладают высокой точностью. Эти формулы дают приблизительное значение t_k , которое может отличаться от истинного в два-три раза.

Из многочисленных экспериментальных данных известно, что после первого максимума тока сопротивление канала искры изменяется весьма слабо, и его можно считать квазистационарным. При скорости нарастания тока $di/dt = 1 - 20$ кА/мкс градиент напряжения в канале искры составляет 150 - 250 В/см, если амплитуда тока не превышает 250 кА. Сумма катодного и анодного падения потенциала $U_{ак}$ составляет 40 - 80 В. Исходя из этих цифр можно определить падение напряжения на разряднике и, поделив на I_{m1} , сделать грубую оценку его сопротивления к моменту первого максимума тока:

$$R_{\text{раз}} = U/I_{m1}, \quad (2.5)$$

где $U = U_{\text{ак}} + E_{\text{к}}S_0$.

В последующий период при спаде тока сопротивление канала искры изменяется слабо. Примерно такие же значения $U_{\text{ак}}$ и $E_{\text{к}}$ имеют место в вакуумных разрядниках. При малой скорости нарастания тока в электрической цепи $di/dt \leq 0,1$ кА/мкс ; $I_m/t_{\text{и}} \leq 0,05$ кА/мкс гидродинамическое расширение канала разряда имеет место только в начале импульса, затем основную роль в расширении канала играют тепловые процессы, то есть разряд переходит в дуговую стадию. При этом как в искровых, так и в вакуумных разрядниках $U_{\text{ак}}$ падает до 20 В, а градиент напряжения в канале $E_{\text{к}}$ - до 80 В/см.

Изоляция разрядников обычно выполняется из оргстекла или других полимерных материалов, например, блочного капролона, полиэтилена, фторопласта. Размеры изоляторов выбираются таким образом, чтобы обеспечить электрическую прочность по внутренней и внешней поверхности изоляции. Для увеличения поверхностной прочности изоляторы имеют оребрение.

2.3. Кабели

Высоковольтные импульсные кабели выпускаются промышленностью в изоляции из синтетических материалов - полиэтилена, фторопласта. Жилу кабеля выполняют из алюминиевого прутка или жгута медной проволоки, а в малоиндуктивных кабелях - в виде оплетки, наложенной на центральный полиэтиленовый стержень. Внешний токоведущий слой также сделан в виде оплетки из медной проволоки или слоя лент. Внешняя проводящая оболочка кабеля (оплетки) покрывается дополнительным защитным слоем из полиэтилена. В некоторых типах кабелей в области основной изоляции переход от диэлектрика к жиле и к оплетке осуществляется с помощью полупроводящих покрытий, слоя сажистого полиэтилена или сажистой бумаги. Основные характеристики кабелей приведены в табл. 2.3 и 2.4.

При использовании в высоковольтной установке куски кабелей на концах должны иметь разделки. Длины разделок кабелей должны выбираться так, чтобы вероятность перекрытия хотя бы одной разделки из общего количества разделок N была мала $\alpha_N = 10^{-3} - 10^{-2}$. При этом вероятность перекрытия каждой одной разделки α_1 должна быть еще меньше. Если при данном напряжении вероятность перекрытия одной разделки α_1 , то вероятность перекрытия N параллельно включенных разделок $\alpha_N = 1 - (1 - \alpha_1)^N$. Отсюда, задаваясь значением α_N , необходимо найти α_1 и по таблицам нормального закона распределения определить доверительный интервал δ . Рабочее напряжение должно быть не выше $U_{0,5} - \delta \sigma$.

Размеры импульсных высоковольтных кабелей

Т а б л и ц а 2.3

N п/п	Тип кабеля	Диаметры, мм				Толщина изоляции, мм	Радиус изгиба, мм	Конст- рукция
		жилы	изоляции	оплетки	внешний			
1	ВК-50-11-13	3,5	11,0	12,6	14,2	3,75	225	ЦЖ
2	КВП 1/50	4,1	10,1	13,1	16,6	2,5	225	ЦЖ
3	КВП 1/60	4,1	13,1	16,1	21,6	4,0	225	ЦЖ
4	КВП 1/75	15,6	33,6	36,8	45,0	8,0	450	ЦЖ
5	КВП 1/300	12,7	43,9	46,1	54,5	14,4	560	ЦЖ
6	КПВМ 1/30	17,4	23,6	25,4	32,0	2,0	300	Д
7	МКПВМ 1/30	7,3	11,0	12,6	16,0	1,3	155	Д
8	АКПВМ 1/50	9,0	13,0	14,4	20,0	2,0	190	ЖА
9	КПВМГ 1/50	14,6	27,0	29,2	36,5	5,0	350	Д
10	КВИМ	7,5	14,5	16,0	18,1	2,5	200	Д
11	КВИ-120	2,6	12,2	12,6	15,0	4,0	250	ЖО
12	ФКП	9,9	12,6	13,8	15,4	1,2	-	Д

П р и м е ч а н и е. Конструкция: ЦЖ- с центральной жилой и оплеткой, Д- двухоплеточный, ЖА- жила из алюминия, ЖО- жила и оплетка.

Электрические характеристики кабелей

Т а б л и ц а 2.4

N п/п	Тип кабеля	L , нГн/м	C , пФ/м	Z , Ом	U_p , кВ	$U_{исп}$, кВ	Ресурс имп.
1	ВК-50-11-13	250	100	50	50	100	10^4
2	КВП 1/50	238	110	47	50	75	10^4
3	КВП 1/60	270	95	53	60	100	10^4
4	КВП 1/75	170	142	35	75	200	10^6
5	КВП 1/300	260	100	51	300	600	$5 \cdot 10^4$
6	КПВМ 1/30	100	340	17,2	30	60	$5 \cdot 10^4$
7	МКПВМ 1/30	110	234	22	30	50	10^4
8	АКПВМ 1/50	110	274	20	50	75	$3 \cdot 10^4$
9	КПВМГ 1/50	180	170	33	50	110	10_4
10	КВИМ	120	250	22	80	110	-
11	КВИ-120	315	77,5	64	60	120	-
12	ФКП	62	460	11,6	30-40	-	-

П р и м е ч а н и е: L , C - индуктивность и емкость на единицу длины, Z - волновое сопротивление, U_p - рабочее напряжение, $U_{исп}$ - испытательное напряжение постоянного тока.

Импульсные разрядные напряжения $U_{0,5}$ разделок некоторых типов кабелей приведены на рис. 2.3-2.6. Коэффициент вариации разрядных напряжений $\sigma/U_{0,5}$ для разделок кабелей составляет около 0,1. Способы увеличения электрической прочности разделок кабелей и изоляции на краях шин показаны на рис.2.7.

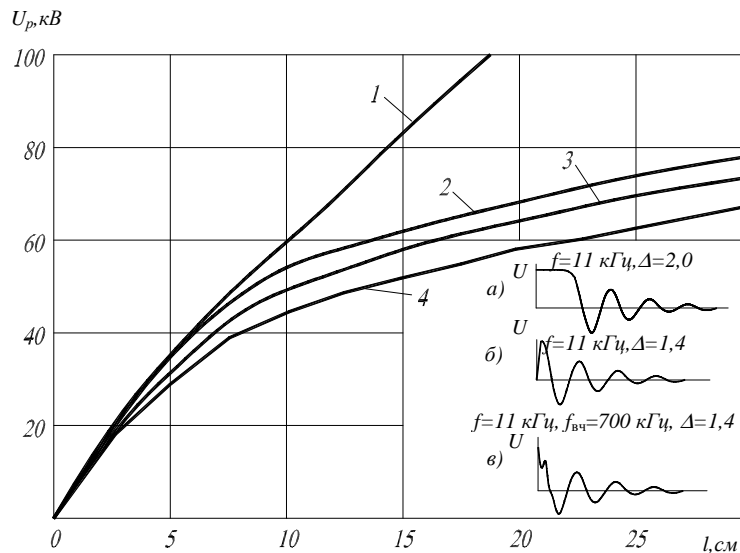


Рис.2.3. Зависимость среднего разрядного напряжения разделок кабеля РК-50-11-13 от длины кабеля при постоянном напряжении - 1 и 2, 3, 4 для форм а, б, в соответственно

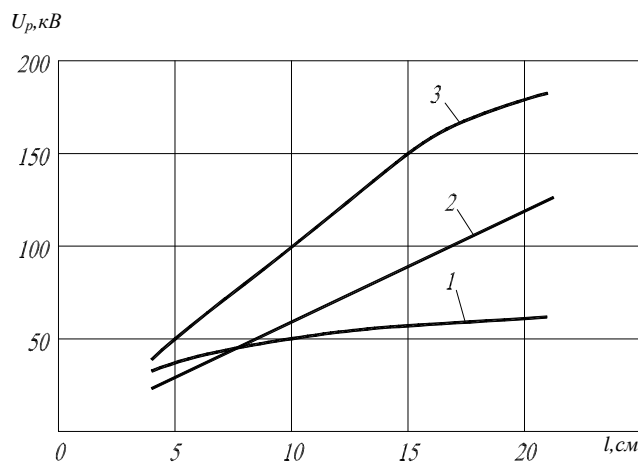


Рис.2.4. Зависимость разрядного напряжения разделки кабеля АКПВМ-1/50 с толщиной изоляции 4 мм от длины разделки: 1 - без полупроводящего покрытия, 2 - с полупроводящим покрытием $\rho_v=10^5$ Ом·см и 3 - с $\rho_v=10^6$ Ом·см. Импульс косинусоидальный с высокочастотным перенапряжением $k_n=1.65$, $f=10 - 20$ кГц, $\Delta=1.3 - 14$, $f_{вч}=0.7 - 1.0$ МГц

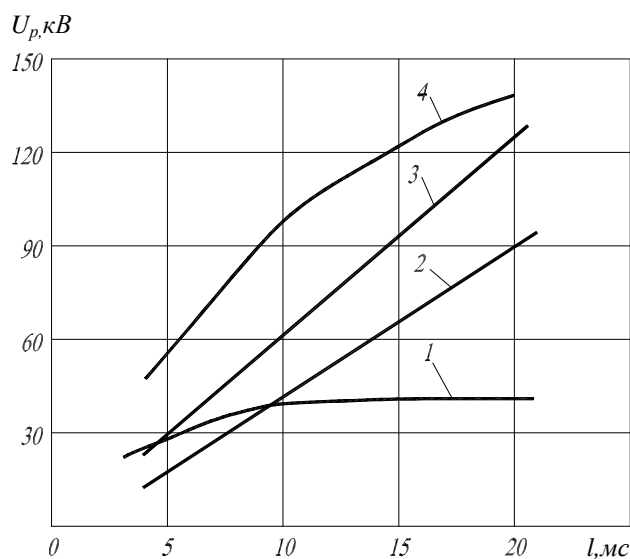


Рис.2.5. Зависимость разрядного напряжения разделки кабеля КВИМ с толщиной изоляции 2.5 мм от длины разделки: 1 - без покрытия; 2,3,4 - с покрытием: 2 - $\rho_v=10^5$ Ом·см, 3 - $\rho_v=10^6$ Ом·см, 4 - $\rho_v=10^8$ Ом·см. Импульс косинусоидальный $f=10 - 20$ кГц, $K_{II}=1.85$, $\Delta=1.3 - 1.4$, $f_{вч}=0.7 - 1.0$ МГц

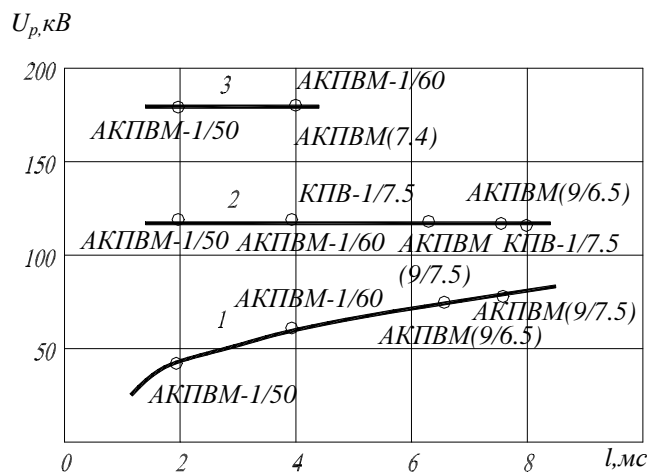


Рис.2.6. Зависимость разрядного напряжения разделки кабелей длиной 20 см от толщины изоляции: 1 - разделки без покрытия, 2 и 3 с покрытием: 2 - $\rho_v=10^5$ Ом·см, 3 - $\rho_v=10^5$ Ом·см, Импульс косинусоидальный с высокочастотной составляющей $f=10 - 20$ кГц, $K_{II}=1.65$, $\Delta=1.3 - 1.4$, $f_{вч}=0.7 - 1.0$ МГц

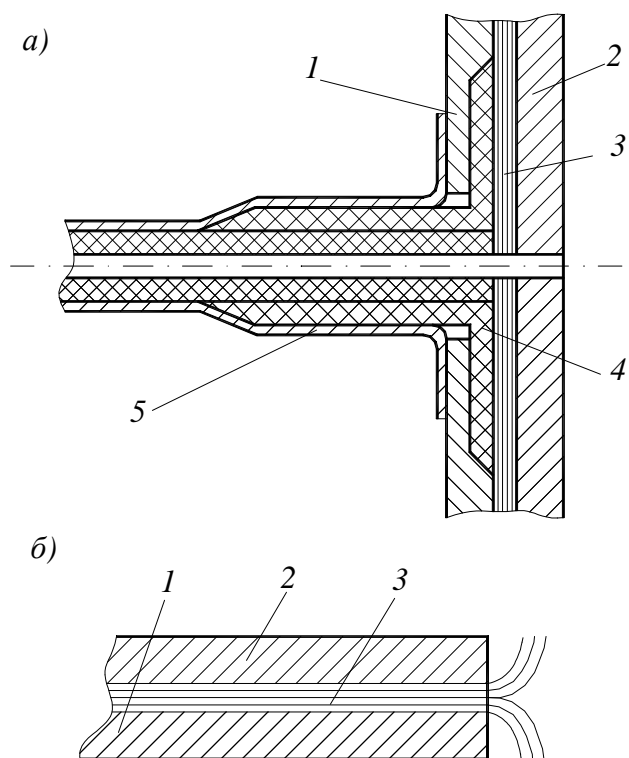


Рис.2.7. Способы увеличения электрической прочности разделок кабелей и изоляции на краях шин: 1,2 - шины, 3 - пленочная изоляция, 4 - изоляционное кольцо с конусом, 5 - оболочка кабеля

3. КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЕТ ГИТ

Общая компоновка конденсаторной батареи зависит от запасаемой энергии, характера нагрузки, ее формы и размеров. При получении сильных магнитных полей различного назначения, а также при возбуждении разряда в плазме индукционным способом, как, например, в системе тэта-пинч, нагрузка имеет преобладающе индуктивный характер. В этих случаях ток замыкается через обмотку соленоида и декремент колебаний в контуре ГИТ обычно не превышает 1,3 - 1,5. При питании систем с прямым разрядом ток батареи протекает через разрядную камеру, и режим разряда может быть колебательным с большим затуханием колебаний $\Delta=2 - 5$, а также критическим или апериодическим. Наибольшую сложность представляет подвод тока от конденсаторной

батареи к низкоиндуктивной, низкоомной нагрузке. Форма нагрузки определяет форму ее токоведущих шин. Наиболее часто встречаются системы с линейными (рис. 3.1) и коаксиальными (рис. 3.2) токоъемными шинами. Соответственно выполняются и коллекторные шины. Рабочее напряжение ГИТ не превышает 50 - 100 кВ. Если для питания нагрузки требуется более высокое напряжение, то используется схема тип ГИН или ГИН-ГИТ.

Выбор параметров ГИТ и рабочего напряжения производится исходя из параметров нагрузки и формы импульсов тока. В случае питания активной нагрузки ее сопротивление может быть больше критического $R > 2\sqrt{L/C}$, однако наиболее оптимальным является критический режим.

При этом достигается максимальная амплитуда тока. Коэффициент использования ГИТ при питании активной нагрузки $\eta = \frac{R_H}{R_0 + R_H}$ обычно

близок к единице, так как собственное сопротивление ГИТ R_0 достаточно мало.

При питании индуктивной нагрузки обычно заданы индуктивность нагрузки L_H , амплитуда I_m и форма импульса тока. В случае колебательного разряда задается период T или частота колебаний $f = 1/T$. Это значит, что заданы $\omega = 2\pi/T$ и скорость изменения тока di/dt в начальный момент времени:

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = I_{m0}\omega = \frac{U_0}{L_T + L_H}, \quad (3.1)$$

где U_0 - зарядное напряжение батареи. Коэффициент использования ГИТ желательно иметь близким к единице $\eta = 0,7 - 0,95$. Однако при нагрузке с очень низкой индуктивностью в некоторых случаях допустимо выбирать $\eta = 0,5 - 0,7$. Для получения в нагрузке заданного тока I_{m1} в конденсаторах ГИТ необходимо запасти энергию:

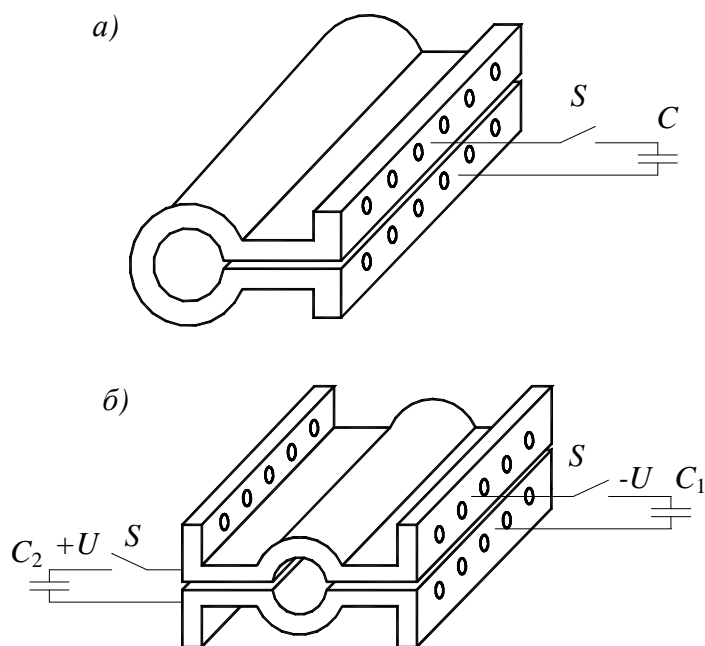


Рис.3.1. Нагрузка в виде одновиткового соленоида с линейным токопроводом

$$W = \frac{1}{2}(L_{\Gamma} + L_{\text{H}})I_{m1}^2 = \frac{1}{2} \frac{L_{\text{H}}}{\eta} I_{m1}^2. \quad (3.2)$$

Из (3.1) имеем:

$$U_0 = \frac{L_{\text{H}}}{\eta} \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = I_m \omega \frac{L_{\text{H}}}{\eta}. \quad (3.3)$$

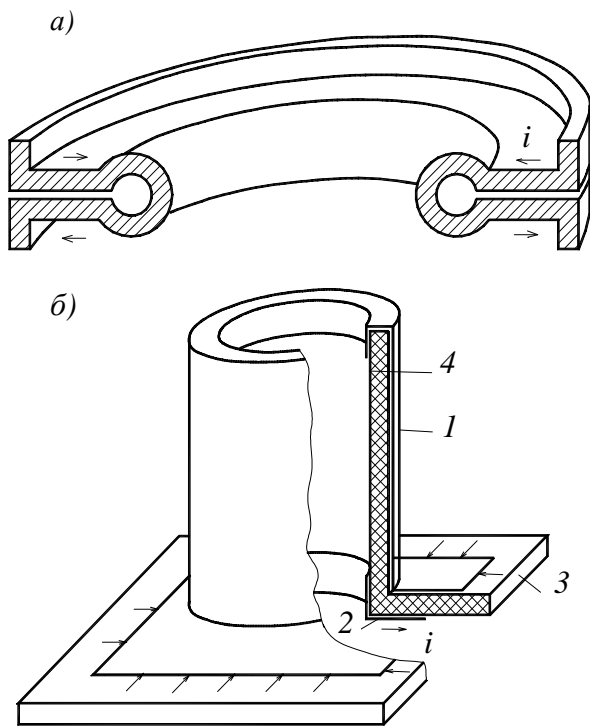


Рис.3.2. Примеры нагрузок с коаксиальным токопроводом: а - одновитковый соленоид и б - газоразрядная камера. 1, 2 - электроды, 3 - изоляция, 4 - поверхность разряда

Этим выражением можно воспользоваться для выбора зарядного напряжения батареи. Однако следует иметь в виду, что с ростом рабочего напряжения увеличивается собственная индуктивность ГИТ L_{Γ} , причем она растет не пропорционально U_0 , а пропорционально U_0^n , где $n > 1$. Это связано с тем, что с ростом напряжения неизбежно увеличиваются толщина изоляции d и длины всех изоляционных промежутков. Поэтому в (3.1), увеличивая U_0 в числителе, мы должны учитывать, что L_{Γ} увеличивается и в знаменателе. При этом, пока $L_{\Gamma} < L_{\text{H}}$, скорость нарастания тока $di/dt|_{t=0}$ и амплитуда тока I_m с ростом напряжения увеличива-

ются, но падает коэффициент использования ГИТ.

Емкость батареи можно найти из условия, что в момент максимума тока вся энергия переходит в индуктивность контура: $C = 2W_0/U_0$. Период колебаний $T = 2\pi\sqrt{(L_0 + L_{\text{H}})C}$.

Для получения импульсов тока униполярной формы в цепь разряда можно включить резисторы с нелинейным сопротивлением или использовать метод “кrouбар” (см. П1).

3.1. ГИТ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

ГИТ на энергию менее 50 - 75 кДж может быть выполнен в виде одной ячейки. В этом случае при пробое одного из конденсаторов в нем выделяется практически вся энергия ГИТ. Корпус конденсатора в результате взрыва может деформироваться, при этом не должны пострадать другие конденсаторы и оборудование. У конденсатора в металлическом корпусе наиболее слабым местом является изоляционная крышка, поэтому в конструкции ГИТ необходимо предусмотреть защиту от осколков при ее разрушении. Количество конденсаторов определяется энергией ГИТ и энергией одного конденсатора $W_0 = nW_k$. Импульсные конденсаторы выпускают массой до 500 кг с энергией до 10 кДж. Для уменьшения индуктивности ГИТ желательно иметь малоиндуктивные конденсаторы с большой удельной энергоемкостью. Чем выше удельная энергоемкость конденсаторов, тем меньше размеры ГИТ, меньше длина токоведущих шин и меньше индуктивность. Для создания малоиндуктивного контура ГИТ необходимо правильно выбрать индуктивности составляющих его элементов. В отличие от ГИТ больших энергий, где число параллельно соединенных элементов велико и суммарная индуктивность в основном определяется индуктивностью кабельно-коллекторной части, в ГИТ средних энергий все элементы вносят соизмеримый вклад в полную индуктивность. Индуктивность ГИТ, выполняемого в виде одной ячейки $L_G = L_H (1 - \eta) / \eta$, складывается из трех основных составляющих: индуктивности конденсаторов, индуктивности разрядника и индуктивности ошиновки. В предварительном расчете на каждую из этих составляющих можно положить около 30% от общей индуктивности L_G . Выбрав конденсаторы, необходимо решить еще два принципиальных вопроса: выбрать разрядники и разработать варианты компоновки ГИТ с учетом размеров и особенностей нагрузки. При современном развитии импульсной техники емкостной накопитель с энергией 10 - 50 кДж может работать на нагрузку с минимальной индуктивностью 5 - 10 нГн. При этом еще можно обеспечить достаточно высокий коэффициент использования ГИТ $\eta \geq 0,5$. Первая амплитуда тока $I_m = \sqrt{2W\eta/L_H}$ в таком ГИТ составляет 1 - 4 МА, исходя из этого выбирают разрядник. Искровые разрядники могут коммутировать токи до 250 кА на один канал. На ток 1 МА и больше необходимо использовать разрядник с многоканальной коммутацией (с несколькими параллельными каналами). В таком случае не имеет смысла делать ГИТ в виде одной ячейки. Для увеличения индуктивной развязки между каналами лучше на каждый канал включить отдельную группу конденсаторов, то есть использовать несколько параллельных ячеек (модулей).

Большие токи могут коммутировать вакуумные разрядники до 1 МА на канал. Щелевые вакуумные разрядники с несколькими параллельными поджи-

гами могут коммутировать токи до 5 МА. Для получения нескольких параллельных каналов не требуется индуктивной развязки. Кроме того, в комбинации с включающим вакуумным разрядником удобно использовать закорачивающий вакуумный разрядник при работе ГИТ в режиме "кроубар". Оба разрядника могут быть смонтированы в одном корпусе и иметь общую систему откачки. Поэтому, когда требуется обеспечить режим работы ГИТ с замыканием нагрузки в момент максимума тока, предпочтение можно отдать вакуумным разрядникам. Наряду с искровыми и вакуумными разрядниками в ГИТ средних энергий нередко используются твердотельные разрядники. Они требуют замены изоляции между электродами разрядника после каждого импульса. При небольших размерах установки это вполне приемлемо. Для уменьшения индуктивности подтекания тока к разряднику необходимо использовать не один канал, а несколько параллельных каналов. Их можно получить, используя электрический метод управления разрядником (см.[5, п.5]). Для запуска твердотельного кроубарного разрядника возможны другие методы разрушения диэлектрика, например, с помощью взрыва проводника. Следует отметить, что при использовании вакуумных и твердотельных разрядников ГИТ на энергию 50 - 75 кДж не обязательно делать в виде одной ячейки. Так же как и в случае использования искровых разрядников, из соображения взрывобезопасности его можно разбить на несколько параллельных ячеек. В небольших ГИТ, работающих в режиме повторяющихся импульсов, в качестве коммутатора могут использоваться игнитронные разрядники, а также полупроводниковые тиристоры. Учитывая, что наиболее мощные современные тиристоры имеют рабочее напряжение не более 2 кВ и допустимую амплитуду тока не более 5 - 10 кА, для увеличения импульсной мощности их собирают в группы последовательно-параллельно. Они применяются в генераторах тока микромиллисекундного диапазона при напряжении до 10 кВ. Примеры компоновки ГИТ средней энергии показаны на рис. 3.3 - 3.10. Нагрузкой ГИТ (рис.3.3) является одновитковый соленоид 1. Конденсаторы 7 расположены по периметру сборных шин 4, имеющих прямоугольную форму. Выводы конденсаторов выполнены под плоскую ошиновку в виде двух рядов шпилек с изоляционным гребешком между ними. К сборным шинам конденсаторы подсоединены отрезками плоских шин 6. Разрядник 2 включен между сборными шинами и нагрузкой. После него следует линейный участок шин, предназначенный для обеспечения равномерного подтекания тока к нагрузке на всей ее ширине b . Длина линейного участка l выбирается равной $(0,3 - 0,5)b$. Разрядник 2 на рис. 3.3 показан условно, однако ясно, что для уменьшения индуктивности системы он должен обеспечивать многоканальную коммутацию. Между шинами заложена пленочная изоляция (на рисунке не показана), у выводов конденсаторов она заходит за гребешки. Индуктивность ГИТ складывается из следующих составляющих:

$$L_{\Gamma} = \frac{L_{\text{к}}}{n_{\text{к}}} + \frac{L_{\text{п}}}{n_{\text{к}}} + L_{\text{ш}} + L_{\text{р}} + L_{\text{л}} ,$$

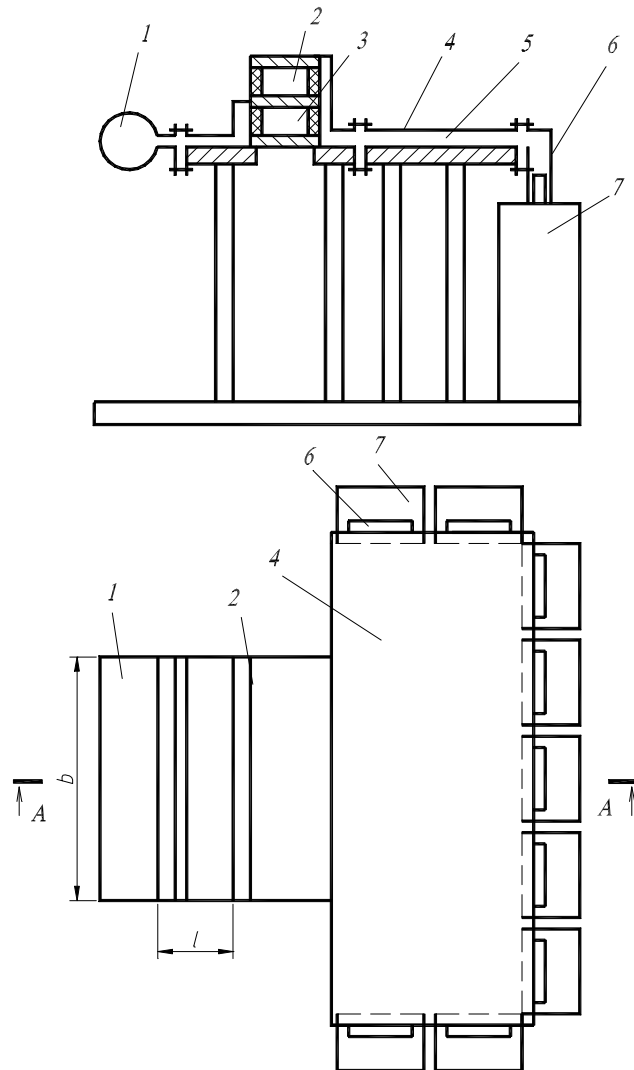


Рис.3.3. Малоиндуктивный ГИТ. 1 - нагрузка, 2 - основной и 3 - закорачивающий разрядники, 4 - сборные шины, 5 - междушинная изоляция, 6 - шины подключения конденсаторов, 7 - конденсатор

где $L_{\text{к}}, L_{\text{р}}, L_{\text{п}}, L_{\text{ш}}$, и $L_{\text{л}}$ - индуктивности конденсатора, разрядника подключения конденсатора к сборным шинам, сборных шин прямолинейного участка соответственно.

Вопросы расчета индуктивностей элементов ГИТ рассмотрены в разд.4. При проектировании ГИТ необходимо добиться оптимальной конфигурации сборных шин, при которой их индуктивность минимальна. Ширина токоподвода к нагрузке b задана. Ширина токоподвода к сборным шинам (от конденсаторов) определяется количеством конденсаторов и их размерами. С увеличе-

нием энергии ГИТ внешний периметр сборных шин, необходимый для подсоединения всех конденсаторов, увеличивается. Соответственно увеличивается индуктивность шин, которая в первом приближении пропорциональна $\ln(b_{\text{ш}}/b)$, где $b_{\text{ш}}$ - внешний периметр шин. Следовательно, конденсаторы необходимо располагать таким образом, чтобы периметр был минимальным.

Для подсоединения конденсаторов могут быть использованы "проткнутые" шины (рис. 3.4,*а*), к которым конденсаторы подсоединяют в несколько рядов. В этом случае используют конденсаторы с коаксиальными выводами

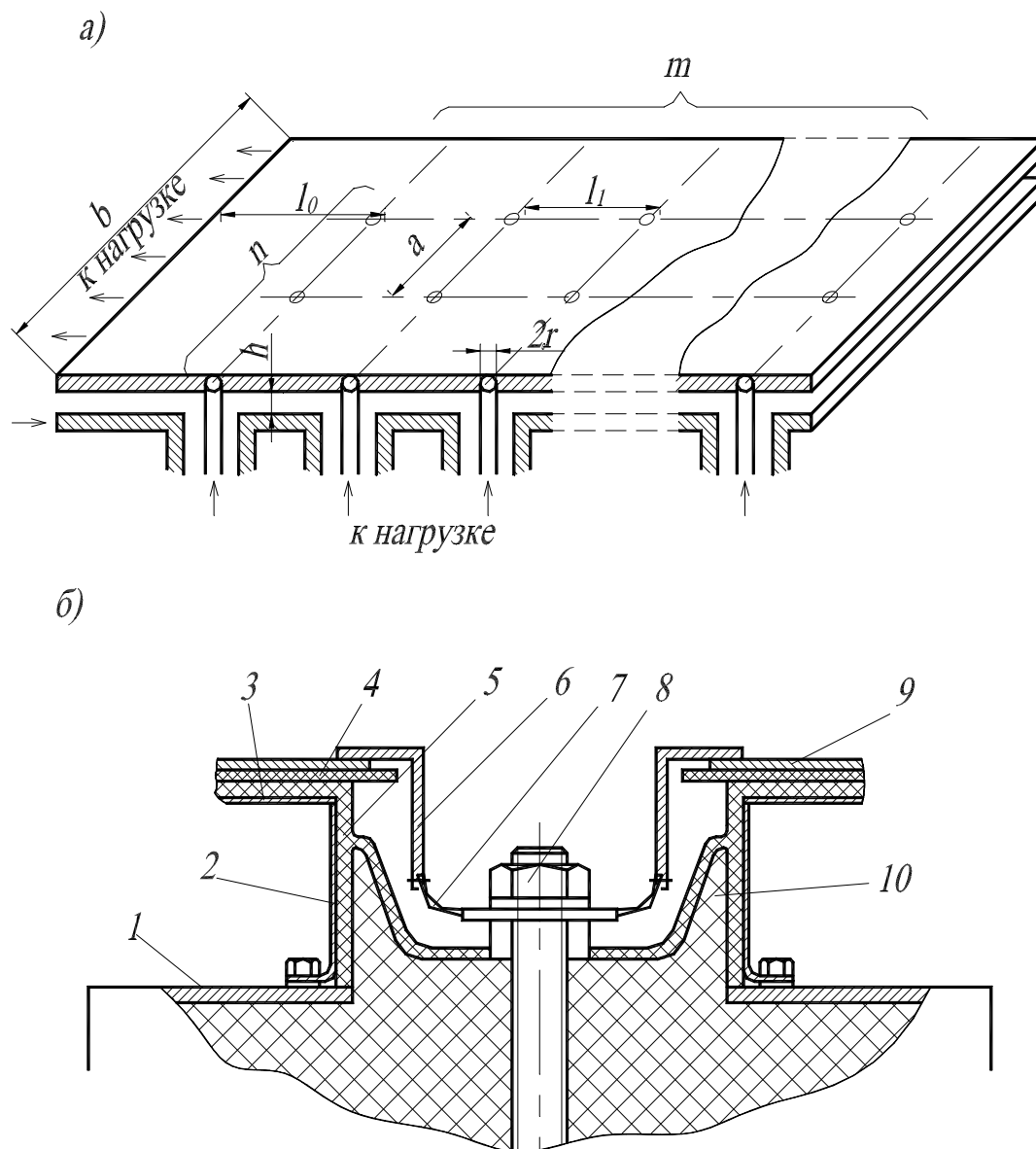


Рис.3.4. Подсоединение конденсаторов к сборным шинам: *а* - по всей плоскости шин, *б* - по каждому конденсатору. 1 - корпус конденсатора, 2 - цилиндр, 3 - нижняя шина, 4 - главная изоляция, 5 - изоляционная шайба, 6 - верхний стакан, 7 - гибкие контакты верхней шины, 8 - гайка, 9 - верхняя шина, 10 - проходной изолятор конденсатора

(рис. 3.4,б). Корпус конденсатора 1 с помощью цилиндра 2 крепится к нижней сборной шине 3, а высоковольтный вывод 8 цилиндром 6 - к верхней сборной шине 9. Изоляция обеспечивается фигурным проходным изолятором 10, установленным в корпусе конденсатора, главной междушинной изоляцией 4 и угловой шайбой 5. Вопрос расчета индуктивности "проткнутых" сборных шин рассмотрен в [9,10]. При условии $r_0 \ll a, l_0, l_1$; $l_0, l_1 \geq a$ (см. рис.3.4 а) их индуктивность

$$L_{ш} = \mu_0 h \left[\frac{l_0}{b} + \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{a}{2\pi r_0} + \frac{l_1}{b} \frac{1}{6m} (2m^2 - 3m + 1) \right].$$

Индуктивность подсоединения конденсатора к шинам может быть уменьшена за счет применения угловых шайб 5 (рис. 3.4,б) или изготовления герметизированных узлов сочленения конденсаторов с шинами, залитых маслом или заполненных электропрочным сжатым газом, например SF₆. Подсоединение разрядника к токоведущим шинам ГИТ должно быть малоиндуктивным, а внешняя изоляция разрядника должна удобно сочленяться с междушинной изоляцией. Для этой цели главный изолятор разрядника с внешней стороны может иметь гофрированную поверхность или оребрение. При необходимости узел сочленения разрядника с шинами ГИТ также делают герметизированным и заполняют маслом или сжатым газом.

При использовании одного разрядника вклад индуктивности разрядника в общую индуктивность ГИТ может оказаться преобладающим, особенно если в качестве коммутатора выбран одноканальный искровой разрядник. В этом случае целесообразно применять не один, а несколько параллельных разрядников. Пример конструкции малоиндуктивного ГИТ с использованием вакуумных разрядников щелевого типа (П1) показан на рис. 3.5. Массивная токоведущая шина 1 закреплена на опорной конструкции (на рисунке не показана) и является несущей. На ней смонтированы разрядники 2, верхняя токоведущая шина 3 и нагрузка 4. Снизу под шиной расположены конденсаторы 5 с выводами под плоскую ошиновку. К каждому разряднику плоскими шинами 6 и 7 подключено по четыре конденсатора. Между центральными шинами 1 и 3 и шинами подсоединения разрядников и конденсаторов заложена пленочная изоляция (на рисунке не показана). Направление протекания тока в шинах ГИТ показано стрелками. Применение плоской ошиновки и щелевых вакуумных разрядников с симметричным подтеканием токов обеспечивает малую индуктивность установки. В ГИТ с точки зрения обслуживания наибольшего внимания требуют разрядники и нагрузка. Поэтому доступы к разрядникам и нагрузке должны быть особенно удобными. На рис. 3.6 показан вариант конструкции ГИТ с разрядниками 3 типа рельсотрон (П7) и конденсаторами, расположен-

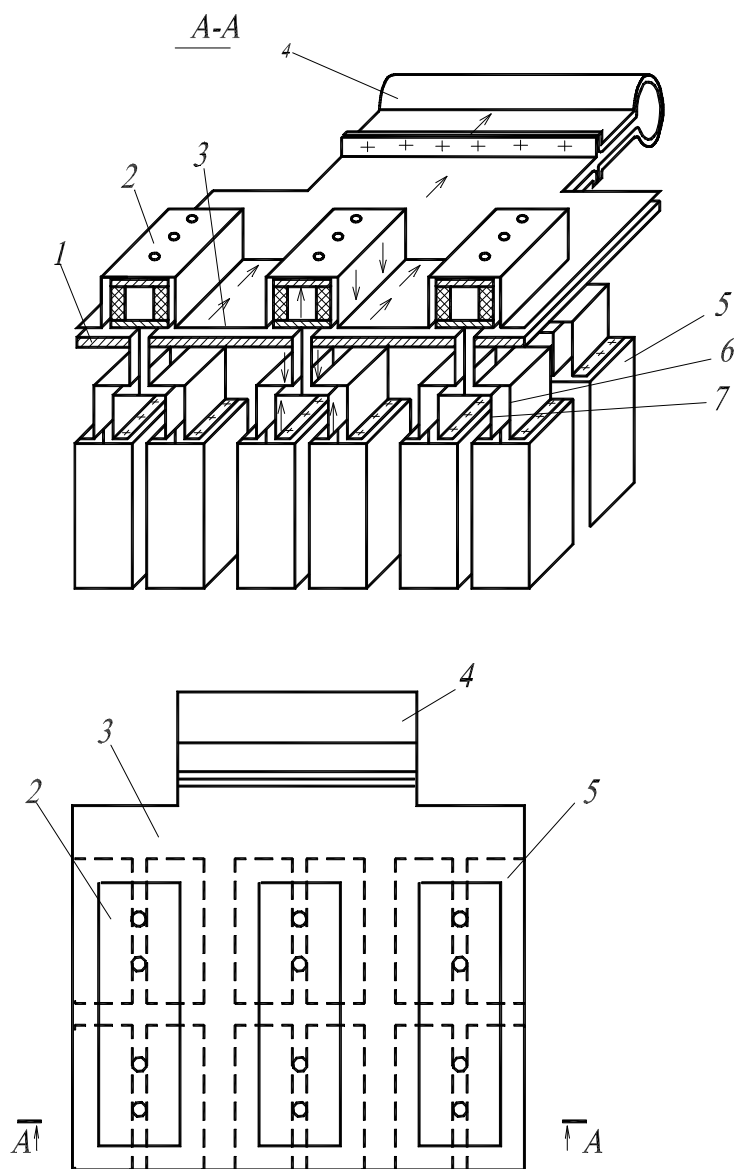


Рис.3.5. Малоиндуктивный ГИТ: 1 - шина нижняя, 2 - вакуумный щелевой разрядник, 3 - шина верхняя, 4 - нагрузка (соленоид), 5 - конденсатор, 6,7 - шина подсоединения конденсаторов

ными с трех сторон от сборных шин 2. С четвертой стороны расположена нагрузка 1. Аналогичная конструкция ГИТ показана на рис. 3.7. Для удобного обслуживания разрядников 4 они расположены с внешней стороны ГИТ. В этом случае могут быть использованы малоиндуктивные конденсаторы с плоской ошиновкой или специальные, у которых выводы с двух противоположных сторон корпуса. На рис. 3.7 такой конденсатор 3 имеет один вывод, соединенный непосредственно с выводами обкладок секций, а вывод с другой стороны конденсатора соединен с обкладками секций широкой шиной 5, уложенной вдоль стенки изоляционного бака. При монтаже обратный токопровод 6 дол-

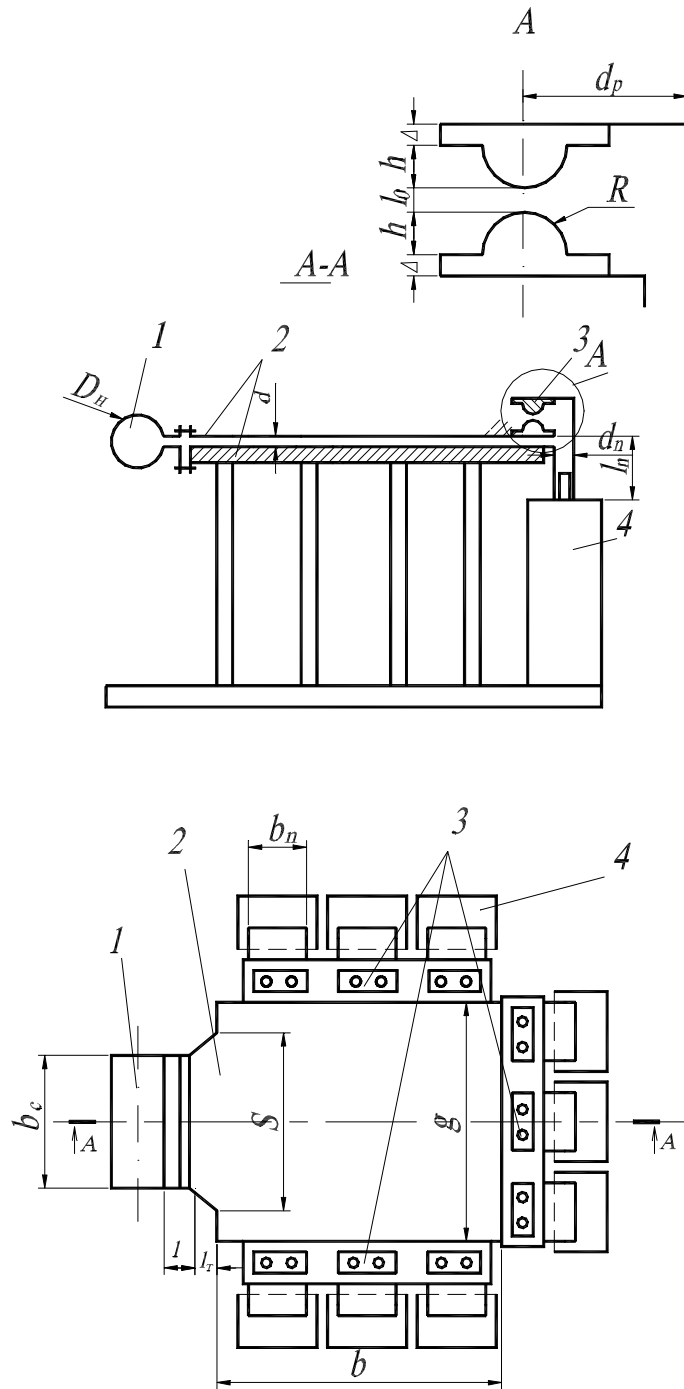


Рис.3.6. Малоиндуктивный ГИТ: 1 - нагрузка, 2 - сборные шины, 3 - разрядник, 4 - конденсатор

жен проходить рядом с этой шиной, снаружи конденсатора. Иногда для уменьшения индуктивности ГИТ средних энергий собирают из большого числа параллельных модулей. Модулем в этом случае является один конденсатор с встроенным в его корпус разрядником. Принципиальная электрическая схема

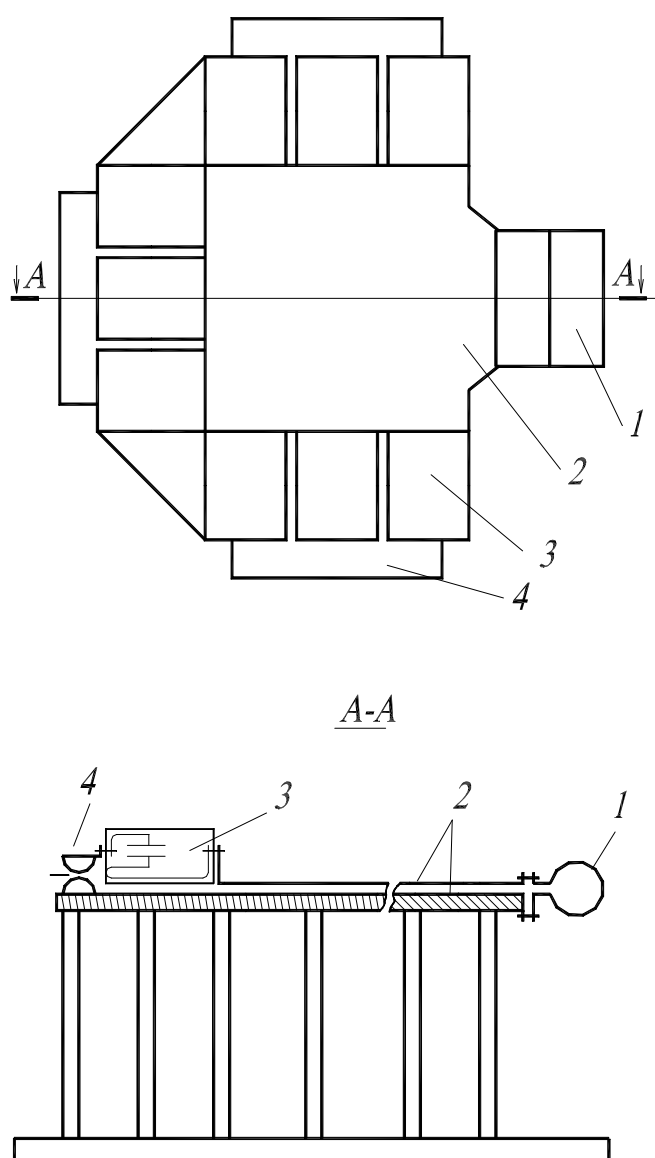


Рис.3.7. Эскиз ГИТ: 1 - нагрузка, 2 - сборные шины, 3 - конденсатор, 4 - разрядник

такого ГИТ показана на рис. 3.8. Все модули C_1, C_2, \dots, C_n соединяются со сборными шинами кабелями небольшой длины. Конструкция модуля дана в приложении (П2). В качестве коммутаторов S_1, S_2, \dots, S_n используются вакуумные разрядники, не требующие для надежного срабатывания пространственной развязки. Все оборудование ГИТ располагается на полу в одном уровне. Зарядка конденсаторов производится от выпрямителя через резистор R_3 . Для закорачивания конденсаторов используется замыкатель S .

Другой вариант компоновки многомодульного ГИТ показан на рис. 3.9. Нагрузка I расположена на верхнем этаже и свободна для доступа со всех сто-

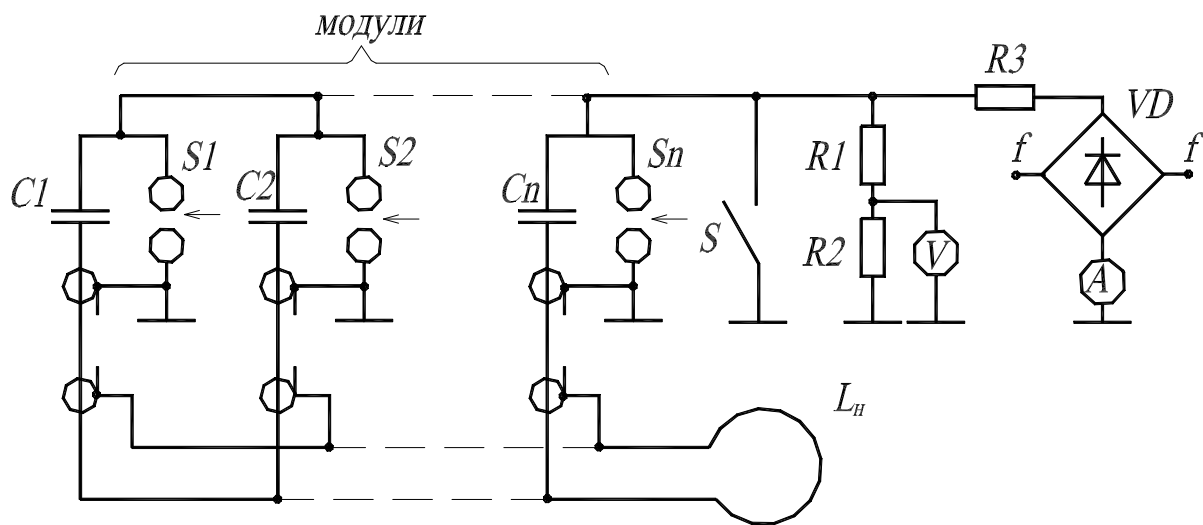


Рис.3.8. Электрическая схема ГИТ

рон. Конденсаторы 2, разрядники 3 и сборные шины (коллектор) 4 расположены на нижнем этаже. Они соединены кабелями 5. Конденсатор и разрядник смонтированы в одном корпусе (рис. 3.10). Металлический корпус модуля 1 имеет коаксиальные выводы с двух сторон. Слева расположен искровой разрядник, у которого высоковольтный электрод 2 соединен с выводом конденсатора, находящимся в зарядном режиме под потенциалом U_0 , а другой электрод соединен с корпусом конденсатора и имеет нулевой потенциал. Разрядник управляется по принципу искажения поля. Управляющий импульс подается на промежуточный электрод 3, выполненный в виде тонкостенного цилиндра. При срабатывании разрядника высоковольтный вывод конденсатора соединяется с корпусом 1, а на другом его выводе, соединенном с жилами кабелей 4, потенциал становится равным U_0 . По кабелям напряжение подается на нагрузку. Кабельный вариант ГИТ средних энергий предполагает использование кабелей небольшой длины 1 - 1,5 м. Они соединяют модули, состоящие из конденсатора и разрядника со сборными шинами. На один модуль приходится по несколько параллельных кабелей.

Вопросы обеспечения параллельной работы разрядников рассматриваются так же, как для ГИТ больших энергий (см. [6, п. 1.3]).

Для закорачивания нагрузки в момент максимума тока могут использоваться разрядники, срабатывающие при напряжении, близком к нулю, например, вакуумные, твердотельные разрядники и др. Место установки закорачивающего разрядника выбирается таким образом, чтобы постоянная времени

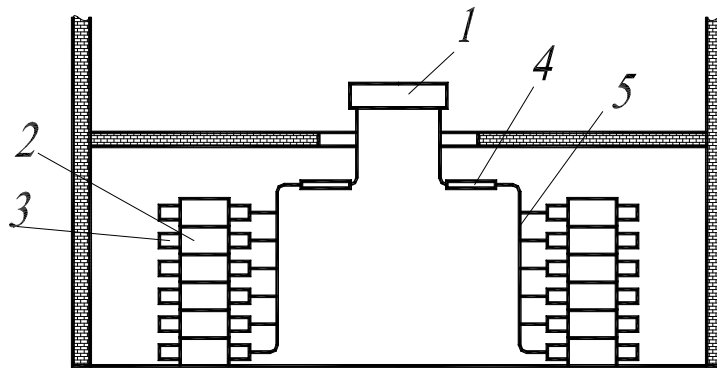


Рис.3.9. Общий вид конденсаторной батареи: 1 - нагрузка, 2 - конденсатор, 3 - разрядник, 4 - сборные шины (коллектор), 5 - кабели

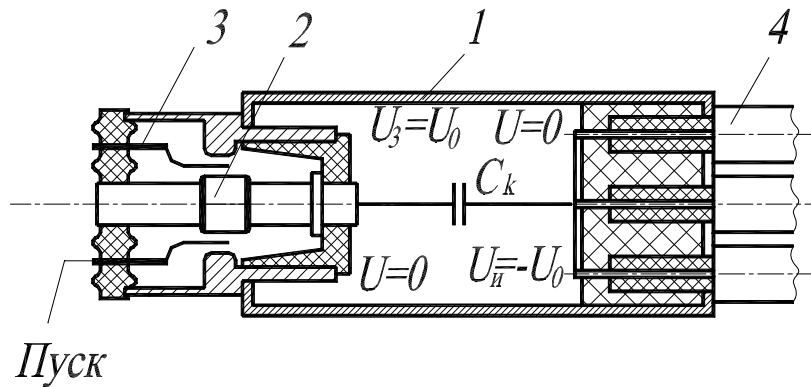


Рис.3.10. Конденсатор со встроенным разрядником: 1 - корпус конденсатора, 2 - высоковольтный электрод разрядника, 3 - управляющий электрод, 4 - кабели

разряда индуктивности нагрузки через закорачивающую цепь была максимальной. Закорачивающий разрядник и участки шин, обеспечивающие его подключение, должны иметь малую индуктивность и малое активное сопротивление. В цепь разряда индуктивности нагрузки через закорачивающий разрядник не следует включать основные разрядники, так как они будут вносить дополнительное затухание. Поэтому закорачивающий разрядник (разрядники) устанавливают после основных разрядников (см. рис. 3.3). При использовании вакуумных разрядников в качестве основного и закорачивающего их часто делают в одном корпусе. Один разрядник включает конденсаторную батарею на нагрузку, другой закорачивает нагрузку в момент максимума тока.

3.2. ГИТ больших энергий

ГИТ на энергию больше 100 кДж выполняют из большого количества параллельных ячеек - модулей. Каждый модуль имеет энергию 10 - 50 кДж и состоит из одного или нескольких конденсаторов и разрядника. Все модули соединяют с центральными сборными шинами коаксиальными кабелями. В зависимости от энергии батареи длина кабелей может составлять от одного до нескольких десятков метров. Как известно, удельная энергоемкость импульсных конденсаторов составляет 50 - 100 кДж/м³. С учетом размещения разрядников, шин, кабелей и других металлоконструкций удельная энергия, запасаемая в единице строительного объема крупных ГИТ, обычно существенно меньше и составляет 5 - 20 кДж/м³.

Рассмотрим некоторые варианты компоновки крупных ГИТ. Батарея конденсаторов (рис. 3.11) занимает половину зала по одну сторону от нагрузки.

В данном случае это массивный одновитковый соленоид для получения сильных магнитных полей. Другая половина зала предназначена под экспериментальное оборудование для проведения исследований. Модули с конденсаторами 1 и разрядниками 3 размещают на стеллажах 4, установленных с трех сторон от сборных шин. Конденсаторы с разрядниками в пределах модуля соединены короткими отрезками кабелей 2. Конденсаторы каждого модуля имеют поддон для сбора масла в случае аварии. Модули на стеллажах могут располагаться в несколько этажей. Для обслуживания ячеек между стеллажами предусмотрены проходы. Они должны обеспечивать возможность проведения ремонтных работ и замены отдельных конденсаторов и разрядников, а также перемещение транспортных

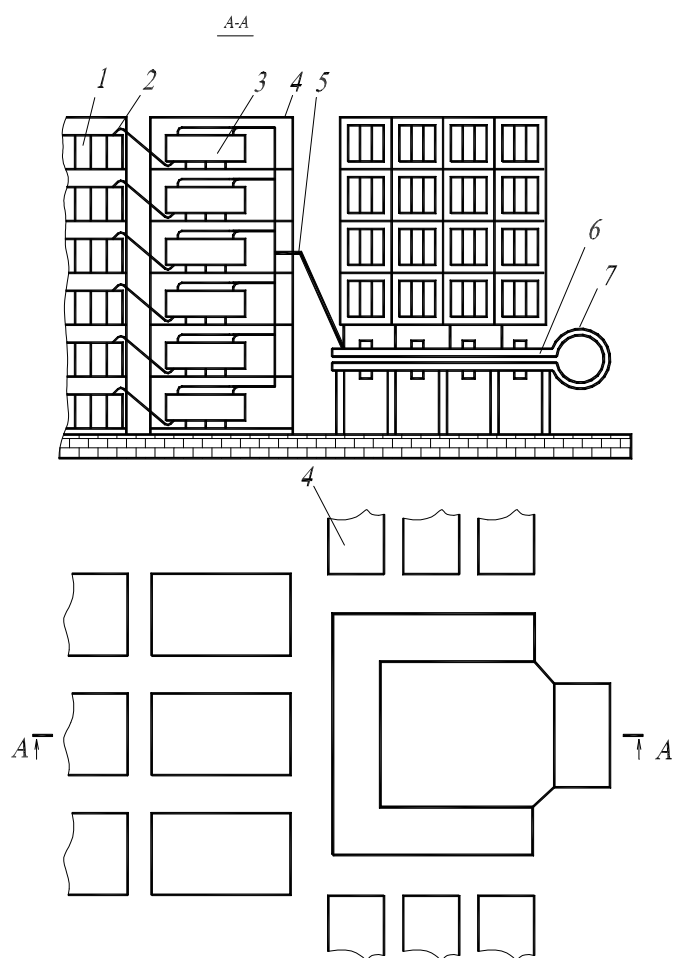


Рис.3.11. Компоновка ГИТ: 1 - конденсатор, 2 - кабели модулей, 3 - разрядник, 4 - этажерка, 5 - кабели, 6 - центральные шины, 7 - нагрузка

средств для этих целей или использование подъемного крана. Возможны такие варианты, когда батарея находится на первом этаже, а нагрузка и экспериментальное оборудование располагаются в помещении второго этажа (рис. 3.12). При этом центральные сборные шины 2 могут располагаться вертикально.

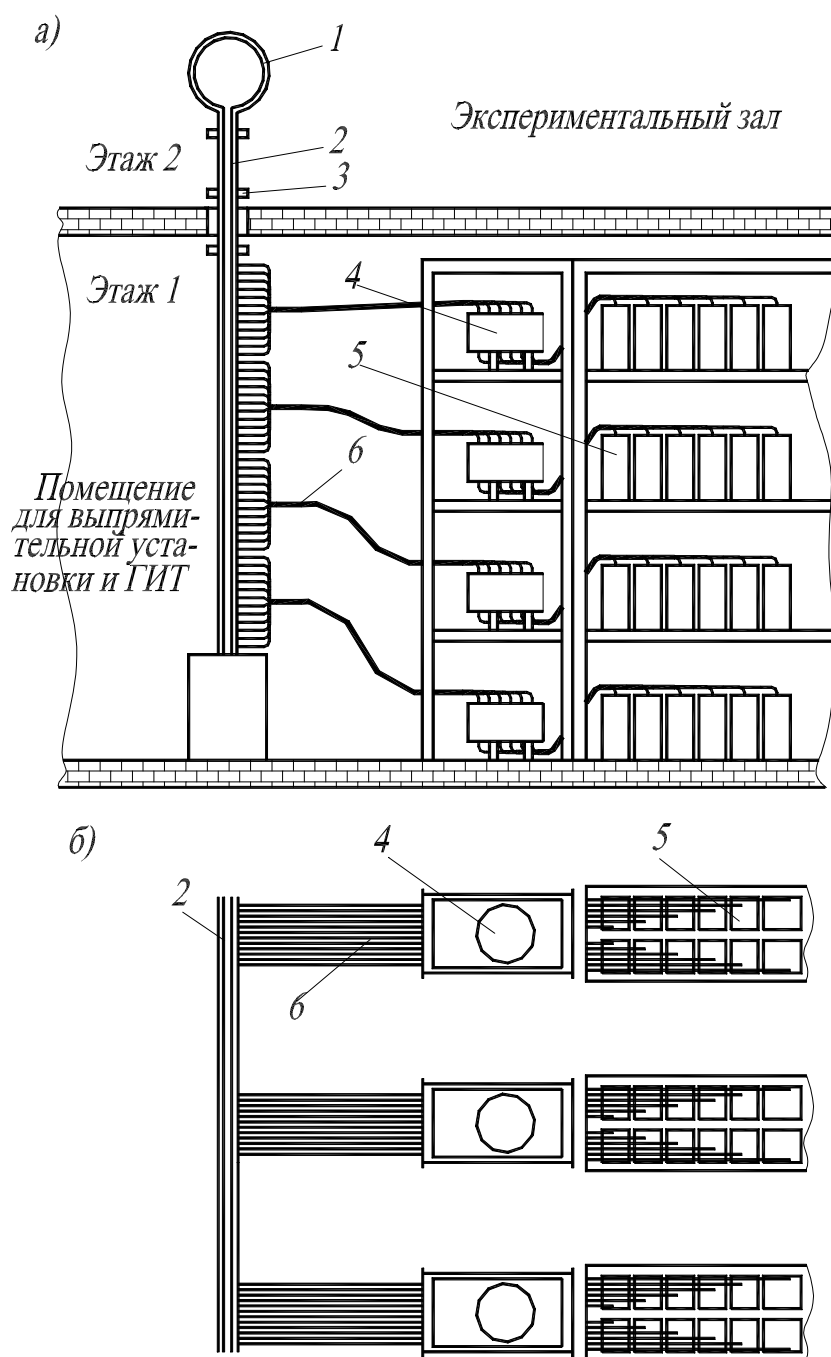


Рис.3.12. Эскиз ГИТ. Вид с боку (а) и сверху (б): 1 - нагрузка, 2 - сборные шины, 3 - стяжки шин, 4 - разрядники, 5 - конденсаторы, 6 - кабели

Конструкции модулей отличаются большим разнообразием. В ряде случаев ячейкой является один конденсатор на энергию 5 - 10 кДж со встроенным разрядником. Конструкция выводов конденсатора разрабатывается совместно с разрядником и разъемами для подсоединения кабелей. Варианты таких конденсаторов с встроенными разрядниками рассмотрены в разд. 3.1. В одном корпусе с основным разрядником может быть размещен и кроубарный разрядник (см. рис. 3.3). Модуль на энергию 20 - 40 кДж можно собрать из группы параллельно включенных конденсаторов. Ошиновка ячейки может быть выполнена так же, как ошиновка ГИТ средних энергий. Плоские шины ячейки соединяют конденсаторы с разрядником и кабелями. Вариант, когда конденсаторы 1 и разрядник 3 в пределах модуля соединены короткими отрезками кабелей 2, показан на рис. 3.11. В качестве коммутирующих приборов могут быть использованы искровые и вакуумные разрядники, импульсные инитроны, мощные тиристоры. Примеры конструкции ячеек даны в приложении (П9).

Возможно другое принципиальное решение конструкции ГИТ (рис. 3.13), когда разрядники для удобства их обслуживания ставят отдельно от конденсаторов. Разрез установки и план размещения оборудования представлены на рис. 3.13. Схема соединения конденсато-

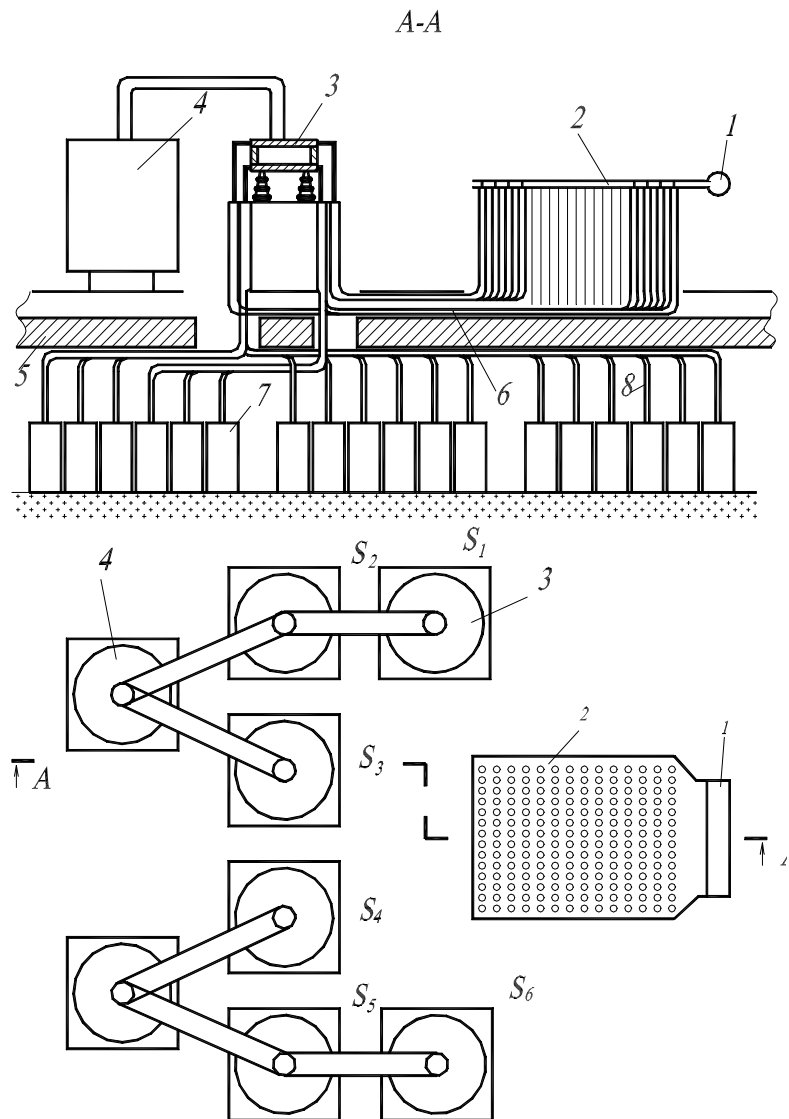


Рис.3.13. ГИТ с отдельно установленными разрядниками: 1 - нагрузка, 2 - центральная шина, 3 - разрядники, 4 - вакуумный насос, 5 - перекрытия между этажами, 6,8 - кабели соединяющие разрядники с центральными шинами и с конденсаторами, 7 - конденсаторы

ров с разрядниками дана на рис. 3.14. Для вакуумных разрядников 3 выделяют специальное место между центральными сборными шинами 2 и батареей конденсаторов 7. Рядом с разрядниками установлены откачные посты 4.

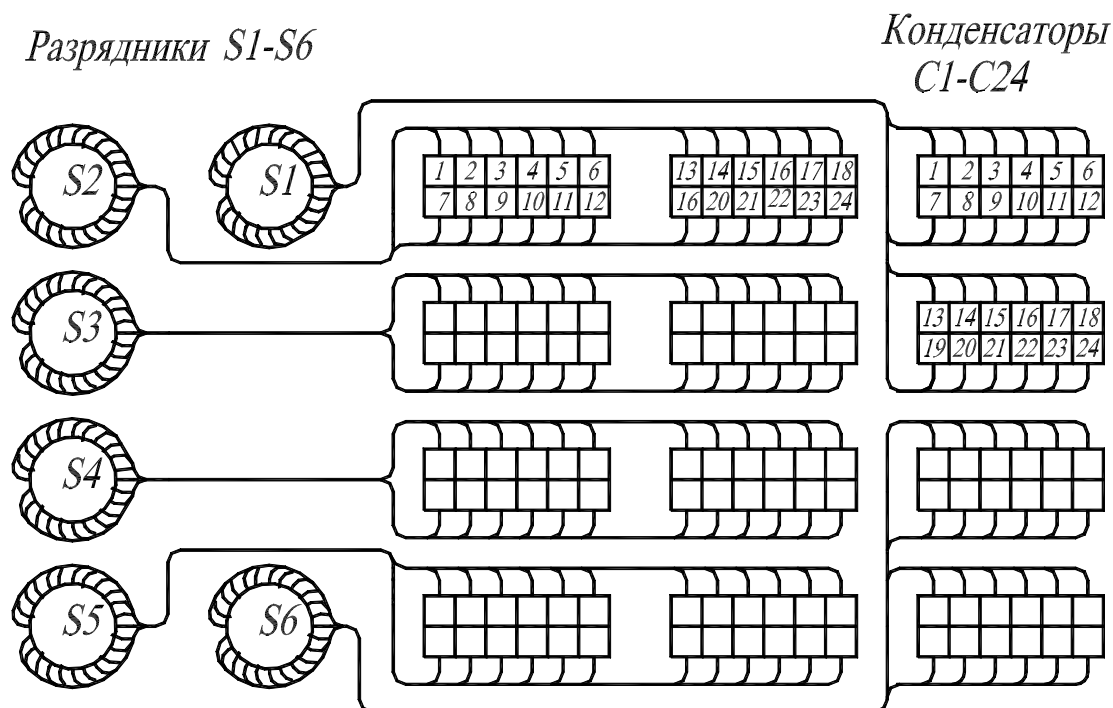


Рис.3.14. Схема соединения конденсаторов с разрядниками

Обеспечиваются проходы для обслуживания оборудования. При необходимости здесь устанавливают специальные переключатели, если предусматривается работа ГИТ на несколько разных нагрузок или на случай необходимости отключить часть ячеек. При таком конструктивном решении конденсаторы 7 соединяют кабелями 8 с разрядниками 3 или с промежуточными шинами, установленными на разрядниках. Далее шины разрядников кабелями 6 соединяют с центральными сборными шинами 2. Количество параллельно включенных кабелей для соединения конденсаторов с разрядниками и разрядников с центральными шинами определяют исходя из индуктивности ГИТ. Центральные сборные шины имеют форму прямоугольника (рис. 3.15). Толщина шин составляет 20 - 30 мм. Их выполняют из латуни. Иногда шины изготавливают из листовой меди толщиной 2 - 3 мм, а снизу и сверху сжимают стальными плитами толщиной 20 - 30 мм. По краям шины 1 имеют отбортовку (сечение А-А) в виде ребер жесткости, к которым крепят разделки кабелей 3. Между шинами уложена пленочная изоляция 2. Жилы кабелей колодками 4 и шпильками 6 крепятся к верхней шине. Точно так же оплетки кабелей стянуты колодками 5 и привинчены к нижней шине. Кабели по периметру шин распо-

ложены в три ряда. Для уменьшения длины разделок и их индуктивности они могут быть помещены в минеральное масло.

В ГИТ с большой запасаемой энергией и весьма большим количеством кабелей целесообразно использовать “проткнутые” сборные шины. Варианты конструкции таких шин показаны на рис. 3.16. Оплетки кабелей 4 прикреплены к верхней шине 1, а жилы с помощью конусных втулок 8 и кулачков 9 - к нижней шине 2.

Наибольшую трудность представляет устранение возможности развития скользящих разрядов по поверхности диэлектрика через отверстия в междушинной изоляции 12. Разряд может развиваться между верхней шиной и жилой кабеля 3. Для его предотвращения устанавливают угловые шайбы 10. В этом случае среднюю рабочую напряженность для пленочной междушинной изоляции 12 приходится снижать до 10 кВ/мм. Так как в шинах сделаны углубления под уголкового шайбы, то за счет этого их индуктивность несколько увеличивается. Для удержания шин используются изолированные болты 7 с изоляционными втулками 6 и 11. Количество болтов и их сечение выбирают на основе

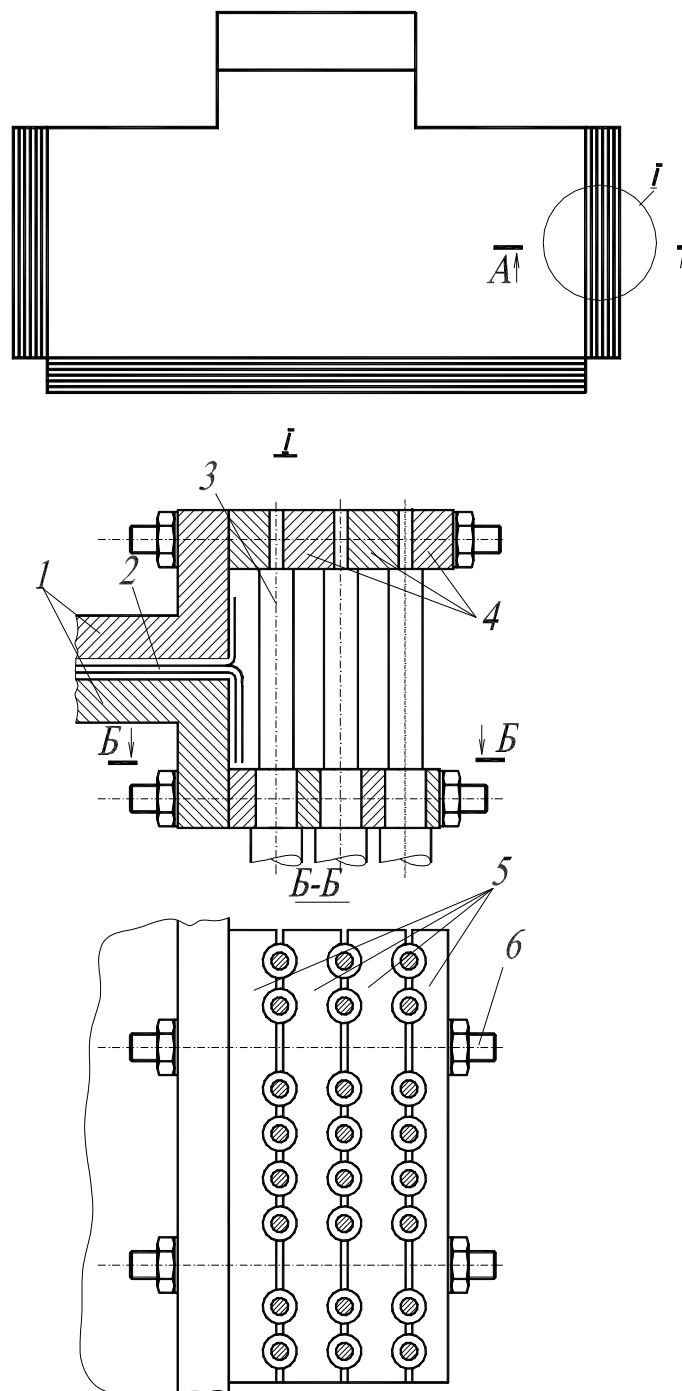


Рис.3.15. Коллектор с подключением кабелей в несколько рядов по периметру шин: 1 - главные шины, 2 - изоляция главных шин, 3 - кабели, 4,5 - латунные планки для подключения кабелей и их оплеток, 6 - стяжные шпильки

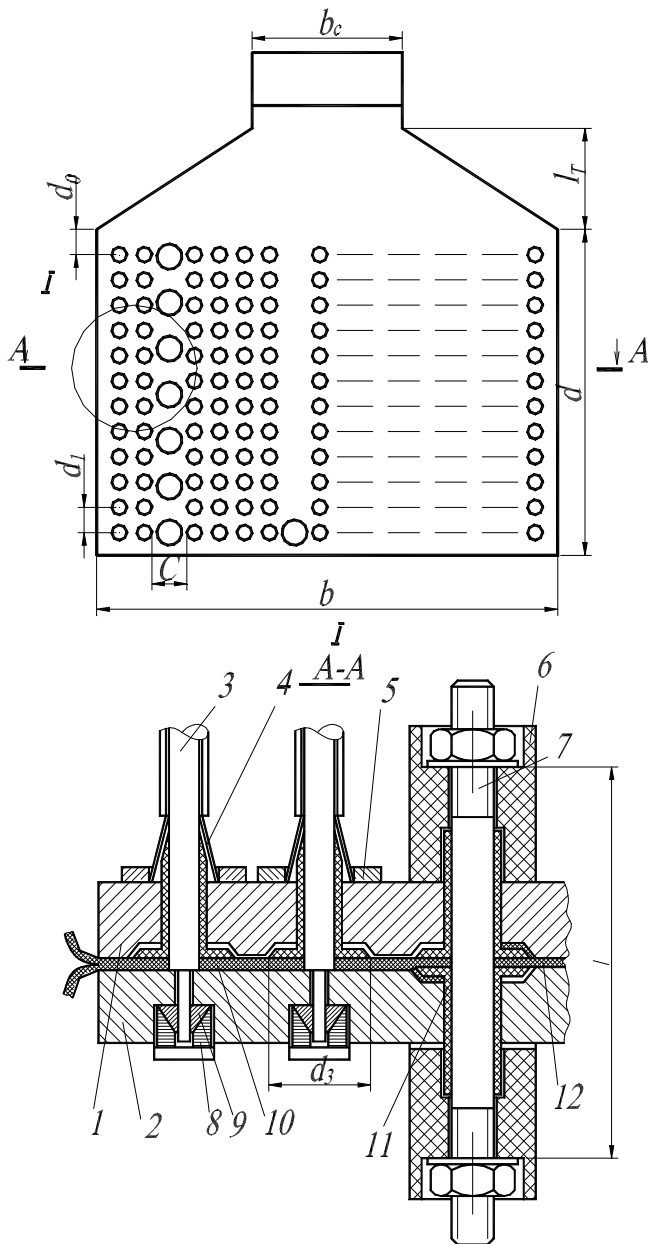


Рис.3.16. Сборные шины с подсоединенными кабелями по всей площади: 1,2 - главные шины, 3 - кабель, 4 - оплетка кабеля, 5 - Кольцо для крепления оплетки, 6 - изолятор, 7 - стяжная шпилька, 8 - гайка внутренняя, 9 - сахар конусный, 10,11 - изоляционная конусная насадка, 12 - главная изоляция, пленочная часть листов заведена под конусные насадки

расчета динамических усилий. При монтаже шин для заполнения пустот в местах стыковки изоляции и предотвращения развития скользящих разрядов может использоваться технический вазелин, характеризующийся достаточно высокой электрической прочностью. В особых случаях разделки кабелей могут быть сделаны герметизированными и залиты маслом.

Специальная конструкция крепления кабелей к сборным шинам показана на чертеже приложения (П10). Сборные шины 1 и 3 стягивают болтами 10, которые одновременно служат для подвода тока от оплеток кабелей 7 к нижней шине 1. От верхней шины болт изолирован втулкой 16 и угловыми шайбами 17. Жилы кабелей подсоединены к шине 3. В конструкции крепления используются изолятор 12, через который проходят кабели, и латунные шайбы: 4 - для крепления жил кабелей и 9 - для крепления оплеток. Для уменьшения длины разделок кабелей используются втулки 5 из вакуумной резины, которые плотно вдавлены в отверстия изолятора 12 и обжимают изоляцию разделок кабелей. К каждому болту может подходить 5 - 10 кабелей. Такие сборки кабелей со стяжными болтами равномерно, рядами распределяют по всей площади сборных шин.

Для подсоединения большого количества кабелей могут также использоваться коробчатые или

зубчатые шины (рис. 3.17). Использование ребер позволяет увеличить периметр шин и обеспечить подсоединение большого количества кабелей. Одно-

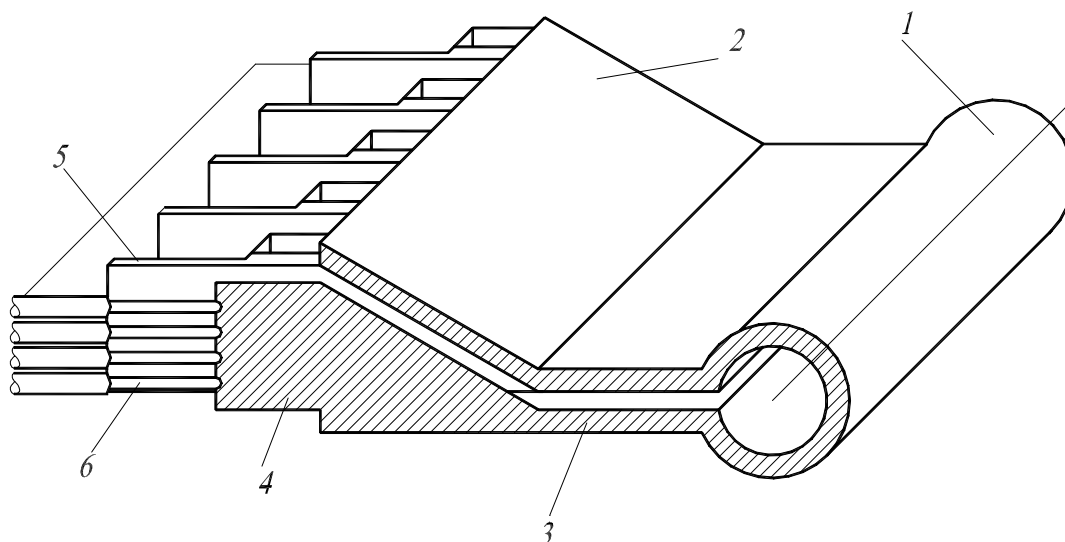


Рис.3.17. Зубчатые сборные шины: 1 - нагрузка, 2 - верхняя шина, 3 - нижняя шина, 4,5 - зубья, 6 - разделка кабелей

времененно система крепления шин частично воспринимает динамические нагрузки. Однако следует отметить, что для шин сложной конфигурации, состоящих из нескольких частей, возникают сложности с обеспечением надежных контактов в местах болтовых соединений участков шин. При высокой плотности тока в местах контактов возникает искрение и со временем прожигается изоляция. Поэтому изоляцию напротив стыков шин рекомендуется закрывать термостойкой пленкой, например фторопластом или стеклолентой.

4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПЕЙ РАЗРЯДА ГИТ

4.1. Общие положения

Цепь разряда ГИТ (рис.1.1) включает в себя конденсаторы, токоведущие шины ячеек, коммутаторы, шины или кабели, соединяющие ячейки с нагрузкой. Все эти элементы имеют переходные активные и индуктивные сопротивления, зависящие от времени и частоты тока ω . Длительность импульсов тока в ГИТ обычно больше 1 мкс, при этом эквивалентная частота разряда не превышает 1 МГц, а длина волны $\lambda > 300$ м. Габариты импульсных установок существенно меньше 300 м, поэтому разряд конденсаторов ГИТ на нагрузку происходит в неволновом режиме, и, следовательно, токами смещения в изоляции токоведущих элементов можно пренебречь. При этих условиях электромагнитные поля в изоляции можно рассматривать, как при токах низкой частоты, квазистационарными. Однако в проводниках токоведущих элементов на рассмат-

риваемых частотах резко выражен поверхностный эффект (скин-эффект). При синусоидальном токе с круговой частотой ω 63% тока сосредоточено в слое толщиной $\Delta = \sqrt{2\rho/(\mu_0\omega)}$ и 86% в слое 2Δ , здесь ρ - удельное сопротивление материала проводника. Например, в меди на частоте 10^4 Гц толщина скин-слоя $2\Delta = 1,4$ мм. Скин-эффект считается резко выраженным, если характерный размер поперечного сечения проводника ρ_{\min} (толщина проводника, радиус кривизны поверхности, расстояние между проводниками и т.д.) удовлетворяет условию $\rho_{\min} \gg 2\Delta$. Резко выраженный поверхностный эффект позволяет при расчете поля вне проводников и внешней индуктивности контуров принять в первом приближении допущение об идеальной проводимости, а конечную глубину проникновения учитывать в следующем приближении при определении потерь в проводниках и поля в них.

Уравнения магнитного поля квазистационарных токов имеют вид:

$$\mathbf{rot} \bar{H} = \bar{\delta} ; \quad \bar{B} = \mu \bar{H} ;$$

$$\mathbf{div} \bar{B} = 0 ; \quad \bar{B} = \mathbf{rot} \bar{A} ,$$

где \bar{H} - напряженность, \bar{B} - индукция, \bar{A} - векторный потенциал магнитного поля, $\bar{\delta}$ - плотность тока. Условие $\mathbf{div} \bar{B} = 0$ выражает принцип непрерывности магнитного потока.

Для однородной среды

$$\mu \mathbf{rot} \bar{H} = \mathbf{rot} \mu \bar{H} = \mathbf{rot} \bar{B} = \mu \bar{\delta} ,$$

и, так как $\bar{B} = \mathbf{rot} \bar{A}$, то имеем:

$$\mathbf{rot}(\mathbf{rot} \bar{A}) = \mu \bar{\delta} .$$

В частности, в декартовой системе координат для проекции на ось Z можно написать

$$\mathbf{rot}_z(\mathbf{rot} \bar{A}) = \mu \delta_z ,$$

или в развернутом виде:

$$\nabla^2 A_z = \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} = -\mu \delta_z . \quad (4.1)$$

Это уравнение Пуассона для проекции A_z векторного магнитного потенциала. По аналогии с решением уравнения Пуассона для электростатического потенциала

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \frac{\rho dV}{r} \quad (4.2)$$

для проекции A_z векторного магнитного потенциала можно записать

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\delta_z dV}{r}, \quad (4.3)$$

где r - расстояние от точки определения A_z до элемента объема dV . Последнее уравнение отличается от (4.2) тем, что ρ/ϵ заменено на $\mu\delta_z$.

При резком проявлении скин-эффекта интегрирование по объему проводника можно заменить интегрированием по поверхности:

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_S \frac{J_z dS}{r}, \quad (4.4)$$

где $J_z = \int_0^\infty \delta_z(x) dx$ - поверхностная плотность тока, x - нормаль к поверхности, направленная в глубь проводника (рис. 4.1); dS - элемент поверхности. В проводнике $\mathbf{rot} \bar{H} = \bar{\delta}$, поэтому поверхностная плотность тока \bar{J} и напряженность магнитного поля на поверхности проводника H_τ связаны соотношением

$$\bar{J} = [\bar{n}, \bar{H}], \text{ или } |J| = |H_\tau|, \quad (4.5)$$

n - наружная нормаль к поверхности.

Собственная индуктивность контура, образованного токоведущими шинами, определяется как отношение магнитного потока самоиндукции контура к току в нем:

$$L = \Psi/I.$$

Поскольку материалы, используемые для токоведущих шин (медь, алюминий), не являются сверхпроводниками, и ток имеет глубину проникновения

примерно 2Δ , то соответственно на ту же глубину проникает в проводник магнитное поле. Поэтому переходное сопротивление контуров, образованных массивными проводниками, включает в себя индуктивную составляющую pL , определяемую полем вне проводников, и составляющую $Z_i(p)$ - внутреннее переходное сопротивление, которое учитывает активные потери в скин-слое и магнитный поток в нем.

Внутреннее комплексное сопротивление проводника на частоте ω

$$z_i = r_i + j\omega L_i,$$

где r_i - активное сопротивление, L_i - индуктивность, обусловленная магнитным потоком в проводнике $L_i = \Phi_i/I$. Активное сопротивление и внутренняя индуктивность проводников связаны соотношением

$$L'_i = \frac{1}{\omega} r'_i = \sqrt{\frac{\mu_0 \rho}{2\omega}} \cdot \frac{1}{I^2} \int_S J^2(S) dS = \frac{\Delta \mu_0}{2I^2} \int_S J^2(S) dS.$$

Здесь штрихом обозначены погонные значения r_i и L_i (в расчете на единицу длины). В соответствии с этим погонное комплексное сопротивление равно

$$z'_i = r'_i + j\omega L_i = \left(\frac{1+j}{\sqrt{2}} \right) \sqrt{\omega \mu_0 \rho} \cdot \frac{1}{I^2} \int_S J^2(S) dS. \quad (4.6)$$

Для исследования переходных режимов вместо комплексного используется внутреннее переходное сопротивление путем замены в (4.6) $j\omega$ на оператор p :

$$r'_i(p) = \sqrt{p \mu_0 \rho} \cdot \frac{1}{I^2} \int_S J^2(s) dS.$$

Магнитный поток в проводниках много меньше внешнего магнитного потока в окружающей среде, особенно на высоких частотах, поэтому при расчете индуктивности токоведущих шин им можно пренебречь, то есть внутреннюю индуктивность проводников не учитывать, что обычно и делают.

Для расчета индуктивности установки весь контур ГИТ разбивают на отдельные участки. Наиболее часто встречаются плоскопараллельные бифилярные шины, а также участки параллельных проводников, ограниченные проводящими плоскостями. Магнитное поле системы длинных параллельных про-

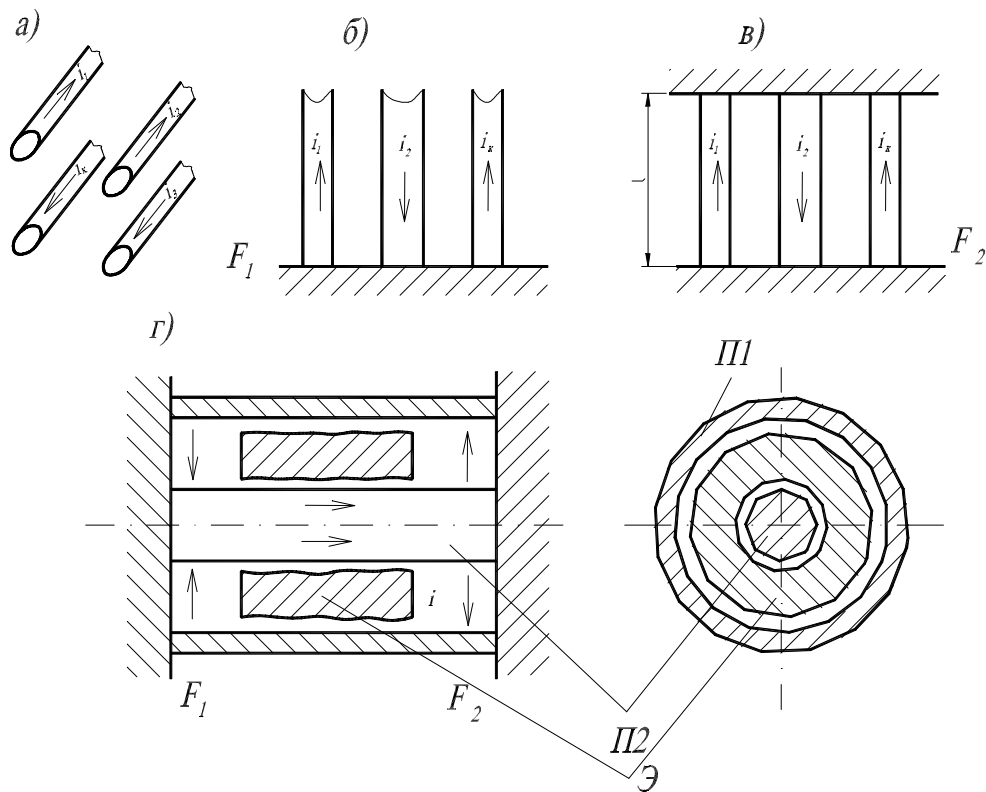


Рис.4.1. Системы проводников, в которых магнитное поле плоскопараллельно: области проводников вдали от концов (а), соединенных перпендикулярной плоскостью F_1 (б), соединенных параллельными плоскостями F_1 и F_2 с двух концов (в), один из проводников, соединенных параллельными листами, полностью охватывает другой (г). Э - замкнутый проводящий экран

проводников (рис. 4.1,а) вдали от их концов является плоским, то есть не зависящим от осевой координаты z . Вблизи концов проводников плоскопараллельность поля нарушается. Однако, если концы проводников закорочены бесконечной проводящей плоскостью F_1 (рис. 4.1,б) или двумя плоскостями F_1 и F_2 (рис. 4.1,в), перпендикулярными оси z , то поле остается плоским на всей длине проводников. Это относится и к случаю полного охвата одного проводника другим (рис. 4.1,г).

Доказать, что поле на конце проводников ограниченной длины тождественно полю бесконечно длинных проводов, можно, используя принцип зеркального отображения проводников с током относительно сверхпроводящей плоскости.

Участок системы из N бесконечно длинных параллельных проводников показан на рис. 4.2. Пусть ток в k -м проводнике есть i_k , и

$$\sum_{k=1}^N i_k = 0. \quad (4.7)$$

В плоскопараллельном поле, где линии тока параллельны оси z , векторный магнитный потенциал \bar{A} имеет лишь z -составляющую A_z , и вектор магнитной индукции \bar{B} лежит в плоскости $xу$. При этом

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}; \quad B_y = \frac{\partial A_z}{\partial x}.$$

Вне проводников, где плотность тока $J = 0$, уравнение Пуассона (4.1) обращается в уравнение Лапласа:

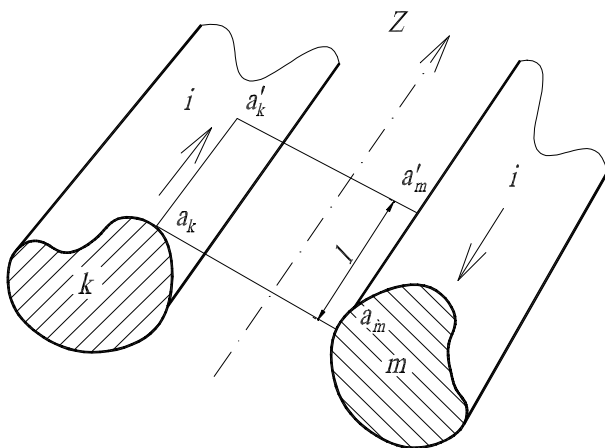
$$\Delta_{xy} A_z = \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = 0. \quad (4.8)$$

При идеальной проводимости проводников все точки поверхности k -го проводника имеют одинаковый векторный магнитный потенциал A_{zk} , условие $A_{zk} = \text{const}$ является граничным.

Магнитный поток $\Phi = \int_S \bar{B} d\bar{S} = \int_S \text{rot } \bar{A} d\bar{S}$. Согласно теореме Стокса

$$\int_S \text{rot } \bar{A} d\bar{S} = \oint_l \bar{A} d\bar{l}, \text{ следовательно,}$$

$$\Phi = \oint_l \bar{A} d\bar{l}. \quad (4.9)$$



Магнитный поток сквозь поверхность S равен линейному интегралу векторного потенциала по замкнутому контуру, ограничивающему эту поверхность. Это позволяет сравнительно просто найти магнитный поток в системе проводников (рис. 4.2). Например, интеграл по контуру $a_k a_m a'_m a'_k$, ограниченному k -м и m -м проводниками, равен

$$\Phi_{mk} = l(A_m - A_k) = l\Phi',$$

где Φ_{mk} - поток сквозь прямо-

Рис.4.2. К определению магнитного потока двух проводников при резко выраженном скин-эффекте

угольник $a_k a_m a'_m a'_k$; Φ' - поток на единицу длины. Таким образом, магнитное поле системы проводников бесконечной длины или ограниченных идеально проводящими плоскостями F_1 и F_2 в случае однородной среды можно найти путем решения уравнения Лапласа с граничными условиями (4.7).

При этом имеет место полное подобие магнитного поля проводников с током и электрического поля заряженных проводников с той лишь разницей, что линии равного потенциала и линии напряженности поля меняются местами. Аналогия полей обоих типов проявляется в известной связи погонной индуктивности L' и погонной емкости C' двухпроводной линии [1]: $L' = \mu_0 \varepsilon_0 / C'$.

Для расчета плоскопараллельных магнитных полей, так же как и для расчета плоскопараллельных электростатических полей, используется метод конформных отображений.

Наиболее просто индуктивность рассчитывается в системе близко расположенных проводов, один из которых охватывает другой (рис. 4.3). Ось Z направлена перпендикулярно плоскости чертежа. Если зазор $h \ll R$, где R - характерный поперечный размер, например, радиус кривизны дуги, ограничивающей поперечное сечение проводника, то поверхностная плотность тока в точке S и напряженность магнитного поля связаны соотношением $J(s) = H_\tau(s)$.

Магнитный поток в зазоре на единицу длины проводника $\Phi' = \mu_0 H_s h_s$, полный ток $I = \int_S J(s) dS$ и, следовательно, погонная индуктивность

$$L' = \frac{\Phi'}{I} = \mu_0 \left(\int_S \frac{dS}{h_s} \right)^{-1}. \quad (4.10)$$

При постоянном зазоре $L' = \mu_0 h/S$.

С использованием (4.10) получены расчетные формулы для индуктивностей двухпроводных контуров при малом расстоянии между прямым и обратным проводами [10,11]. К ним относятся контуры с проводниками круглого сечения (включая предельные случаи проводов очень малого и очень большого радиуса), линии с проводниками прямоугольного сечения, пакеты шин и коробчатые (гофрированные) шины.

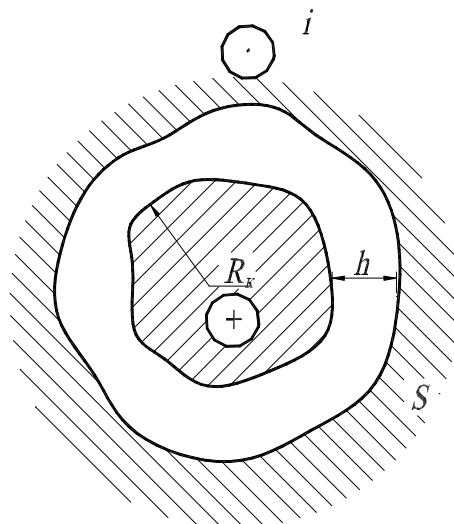


Рис.4.3. Два параллельных провода, разделенных тонким изоляционным зазором

Расчетные формулы для индуктивности системы проводников (токоведущих шин) можно использовать при определении их внутреннего активного сопротивления, а также для расчета электродинамических усилий, действующих на шины.

При идеальной проводимости сила, действующая на единицу поверхности проводника, направлена по нормали к ней:

$$\bar{P}_m = \frac{1}{2}[\bar{J}, \bar{B}], \quad (4.11)$$

где \bar{J} - поверхностная плотность тока в точке S , \bar{B} - индукция магнитного поля на поверхности проводника в той же точке. На основании (4.5) имеем:

$$P_m = \frac{1}{2} JB_\tau = \frac{1}{2} H_\tau B_\tau.$$

Это так называемое магнитное давление, которое численно равно удельной энергии магнитного поля на поверхности проводника:

$$P_m = w_m = \frac{1}{2} H_\tau B_\tau = \frac{1}{2} \mu_0 H_\tau^2. \quad (4.12)$$

Используя (4.12), можно найти вектор обобщенной силы, действующей на проводник или на его часть. Силу, действующую на k -й проводник в направлении координаты q_k , можно также найти путем дифференцирования энергии магнитного поля по обобщенной координате q_k при неизменном токе

$$F_k = \partial W_m / \partial q_k.$$

В случае системы из двух параллельных проводников с прямым и обратным током $I_1 = I_2 = I$:

$$W'_m = \frac{1}{2} I_2 A_2 = \frac{1}{2} L'_{12} I_2^2.$$

Здесь A_2 - векторный магнитный потенциал на поверхности проводника 2, создаваемый током I_1 , на поверхности проводника 1 векторный магнитный потенциал принят равным нулю; L'_{12} — погонная индуктивность системы из двух проводников.

Сила отталкивания на единицу длины

$$F' = \frac{1}{2} I^2 \left(\frac{\partial L'}{\partial q} \right)_{I=\text{const}}, \quad (4.13)$$

где q — расстояние между проводниками. В случае бифилярных плоских шин с расстоянием между ними h интегральная сила, действующая на каждую шину, равна:

$$F = \frac{1}{2} I^2 \left(\frac{\partial L}{\partial h} \right)_{I=\text{const}}. \quad (4.14)$$

Используя выражение (4.12) для удельной энергии магнитного поля, запишем:

$$\partial W'_m = \partial n \int_S \frac{\mu_0}{2} H_\tau^2 dS,$$

где $\partial W'_m$ — приращение энергии, возникающее при смещении проводника по нормали к поверхности на величину ∂n на площади S . Учитывая, что $H_\tau = J$, $W'_m = \frac{1}{2} L' I^2$, имеем

$$\int_S J^2 dS = \frac{2}{\mu} \left(\frac{\partial W'_m}{\partial n} \right)_{I=\text{const}} = \frac{I^2}{\mu} \frac{\partial L'}{\partial n}.$$

Подставив полученное выражение в (4.6), получим расчетную формулу для комплексного внутреннего сопротивления проводника

$$z'_i = r'_i + j\omega L'_i = \frac{(1+j)}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega \rho}{\mu_0}} \frac{\partial L'}{\partial n}. \quad (4.15)$$

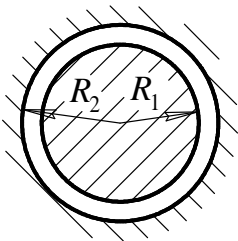
Таким образом, дифференцируя выражение для индуктивности системы из двух проводников по координате, определяющей расстояние между ними, можно найти электродинамические усилия, действующие на шины (4.13) и внутреннее комплексное (переходное) сопротивление проводников (4.15). Следует отметить, что формулы (4.13) и (4.15) справедливы не только для протяженных параллельных проводников, но и для контуров более сложного вида, например для осесимметричных систем (4.14). Надо лишь в этих формулах погонную индуктивность L' заменить на L .

4.2. Расчетные формулы для индуктивности

и внутреннего комплексного сопротивления проводников; электромагнитные силы, действующие на проводники с током

В п.4.2.1 и последующих L - индуктивность, Z - внутреннее переходное сопротивление при резком скин-эффекте и F - электромагнитная сила, действующая на проводник с током. Для контуров, образованных параллельными проводниками, даны формулы погонных значений, что отмечено знаком “штрих”.

4.2.1. Коаксиальный кабель (коаксиальная линия) .

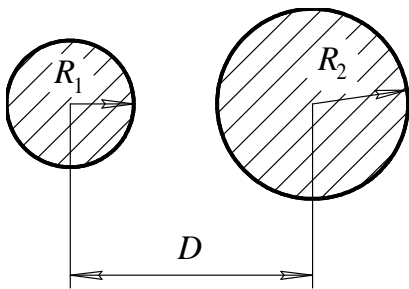


$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

$$Z'_{i12} = \frac{(1+j)}{2\sqrt{2}\pi R_{1,2}} \sqrt{\omega\mu_0\rho_{1,2}}.$$

Индекс 1 соответствует проводу , индекс 2 - внешнему цилиндру.

4.2.2. Двухпроводная линия.



$$L' = \frac{\mu}{2\pi} \text{Arch} \frac{D^2 - R_1^2 - R_2^2}{2R_1R_2};$$

$$Z'_{i12} = \frac{1+j}{2\sqrt{2}\pi} \sqrt{\omega\mu_0\rho_{1,2}} \frac{\frac{D^2}{R_{1,2}} + R_{1,2} - \frac{R_{2,1}^2}{R_{1,2}}}{\sqrt{(D^2 - R_1^2 - R_2^2) - 4R_1^2R_2^2}};$$

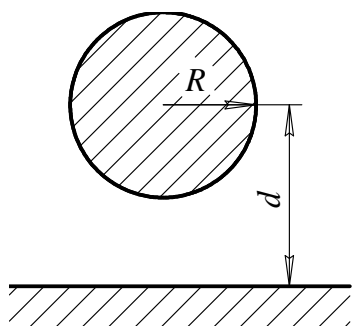
$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} i^2 \frac{D}{\sqrt{(D^2 - R_1^2 - R_2^2) - 4R_1^2R_2^2}}.$$

Индекс 1 соответствует проводу 1, индекс 2 - проводу 2.

В предельном случае $D > 2(R_1 + R_2)$, $D \gg R_1, R_2$ (тонкие провода)

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D^2}{R_1R_2}; \quad Z'_{i1,2} = \frac{1+j}{2\sqrt{2}\pi R_{1,2}} \sqrt{\omega\mu_0\rho_{1,2}}; \quad F' = \frac{\mu_0}{2\pi D} i^2.$$

4.2.3. Провод-плоскость.



$$L' = \frac{\mu_0}{4\pi} \text{Arch} \frac{2d^2 - R^2}{R^2};$$

$$Z_1' = \frac{(1+j)}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\omega\mu_0\rho_1} \cdot \frac{d^2}{R\sqrt{(2d^2 - R^2)^2 - R^4}};$$

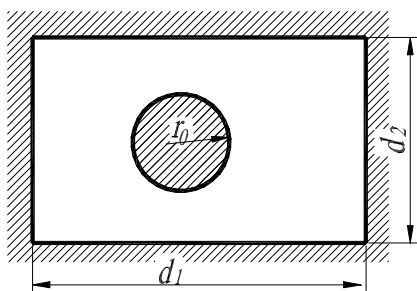
$$Z_2' = \frac{(1+j)}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\omega\mu_0\rho_2} \cdot \frac{d^2}{R\sqrt{(2d^2 - R^2)^2 - R^4}};$$

$$F' = \frac{\mu_0 d i^2}{2\pi\sqrt{(2d^2 - R^2)^2 - R^4}}.$$

Здесь индексы 1 и 2 соответствуют проводу и плоскости соответственно. В пределе $d \gg R$ ($d > 2R$) $L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2d}{R}$.

4.2.4. Круглый проводник в трубе прямоугольного сечения.

Для трубы квадратного сечения $d_1 = d_2 = d$, $d > 3r_0$

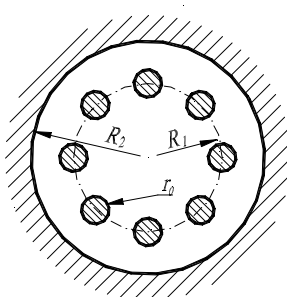


$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{1,855r_0}.$$

Для прямоугольника, у которого $d_1 \gg d_2$; $d_2 > 3r_0$

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d_2}{\pi r_0}.$$

4.2.5. Параллельно соединенные круглые провода с одинаковыми токами, симметрично расположенные внутри круглой трубы.



При расположении проводов вблизи оси (радиус расщепления $R_1 < R_2$, $r_0 \ll R_1$) индуктивность определяется по формуле

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_3},$$

где $R_3 = (nR_1 r_0^{n-1})^{1/n}$, n - количество параллельных проводов в расщеплении.

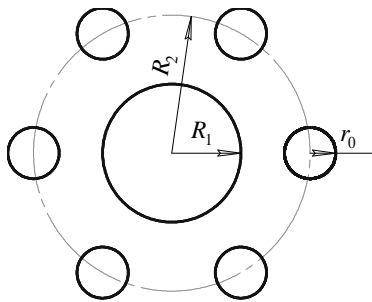
Внутреннее комплексное сопротивление параллельных проводников

$$Z' = \frac{(1+j)}{2\sqrt{2\pi}r_0 n} \sqrt{\omega\mu_0\rho_0}.$$

Для сопротивления трубы см. формулу п.4.2.1.

4.2.6. Параллельно соединенные круглые провода симметрично расположенные по отношению к проводнику круглого сечения.

При условии $R_1 < R_2, r_0 < R_1$

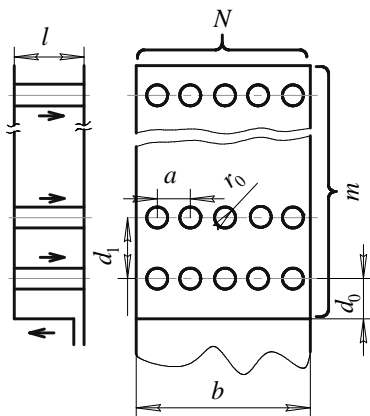


$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{R_2}{R_1} + \ln \frac{R_2}{r_0} \right).$$

4.2.7. Ряд параллельно соединенных круглых проводов, расположенных вблизи плоскости.

Эта конфигурация встречается при расчете кабельных разделок, расположенных вблизи плоской шины. Для тонких проводов ($r_0 \ll d_0$), расположенных в один ряд ($m=1$), при количестве проводов в ряду $N > 5$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi N} \left[\frac{a}{\pi r_0} \operatorname{sh} \frac{2\pi d_0}{a} \right].$$



При дополнительном условии $d_0 \ll a$

$$L = \mu_0 l \left[\frac{d_0}{b} + \frac{1}{2\pi N} \ln \frac{a}{2\pi r_0} \right].$$

Если же $d_0 \ll a$, то

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi N} \ln \frac{2d_0}{r_0}.$$

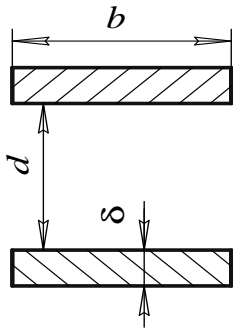
Сопротивление и внутренняя индуктивность системы тонких проводов в N раз меньше, чем у одиночного провода. При плотном ($d_0, d > a$) расположении проводов в m рядах

$$L = \frac{\mu_0 l}{b} \left[d_0 + \frac{d_1}{6m} (2m^2 - 3m + 1) \right].$$

4.2.8. Симметричное расположение ряда из $N \gg 1$ тонких проводов между шинами $2r_0 < a, d_0$.

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi N} \left\{ \ln \frac{4d_0}{\pi r_0} + \ln \sum_{n=1} \exp \left[-\frac{\pi a n(n-1)}{4d_0} \right] \right\}.$$

4.2.9. Параллельные плоские шины малой толщины $\delta \ll d$.
В случае $b \gg d$ ($b \geq 3d$)



$$L' = \frac{\mu_0 d}{b} \left[1 - \frac{d}{\pi b} \left(1 + \ln \frac{2\pi b}{d} \right) \right];$$

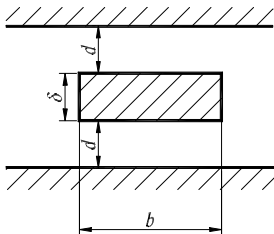
$$Z'_{1,2} = \frac{(1+j)}{\sqrt{2}b} \sqrt{\omega \mu_0 \rho_{1,2}} \left[1 + \frac{d}{\pi b} \left(2\pi - 1 - 2 \ln \frac{2\pi b}{d} + 2 \ln \frac{d}{\delta} \right) \right].$$

В противоположном предельном случае $b \ll d$ ($b \leq 2d$)

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{4d}{b}.$$

4.2.10. Широкая тонкая шина между двумя бесконечными плоскостями (трехшинка).

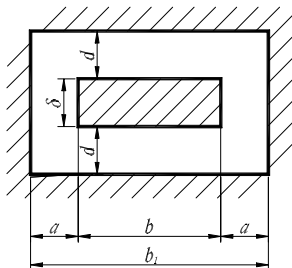
При $\delta \leq d \leq b$



$$L' = \frac{\mu_0 d}{2b} \left(1 + \frac{4d \ln 2}{\pi b} \right)^{-1}.$$

4.2.11. Шина малой толщины в трубе прямоугольного сечения.

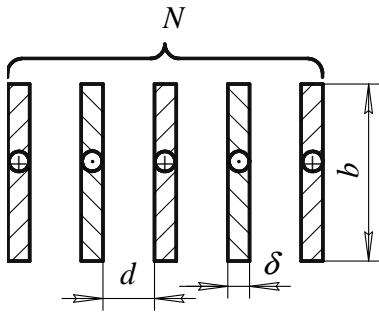
При $\delta \leq d$, $b \geq d$, $a \geq 2d$



$$L' = \frac{\mu_0 d}{2b_1} \left\{ 1 - \frac{4d}{\pi b_1} \ln \left[\operatorname{sh} \frac{a\pi}{2d} \right] \right\}^{-1}.$$

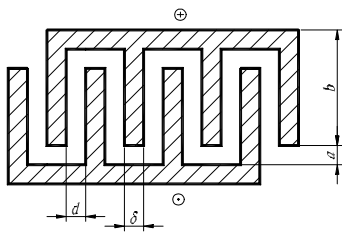
4.2.12. Пакет из N пар шин (плюс одна) со встречным направлением токов.

Пакет можно рассматривать как включение параллельно N “трехшинок” и для расчета индуктивности использовать формулу 4.2.10 ($\delta \leq d \leq b$)



$$L' = \frac{1}{N} \frac{\mu_0 d}{2b} \left(1 + \frac{4d \ln 2}{\pi b} \right)^{-1}.$$

4.2.13. Ребристые шины.

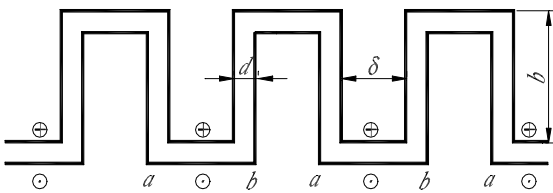


Линии тока проходят вдоль ребер $b \gg \delta$,
 $a \approx (1.7 - 2)d$

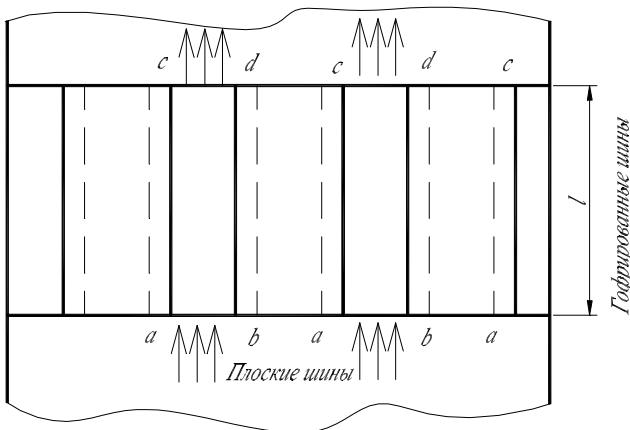
$$L' = \frac{\mu_0 d}{(2N - 1)(b + \delta)},$$

где N - количество ребер одной из шин.

4.2.14. Гофрированные шины конечной длины.



Подвод и съем тока осуществляется на участках ab и cd у основания гофр, где переход к лосковым шинам $b \geq l$, $d \ll b$, $a \approx d$

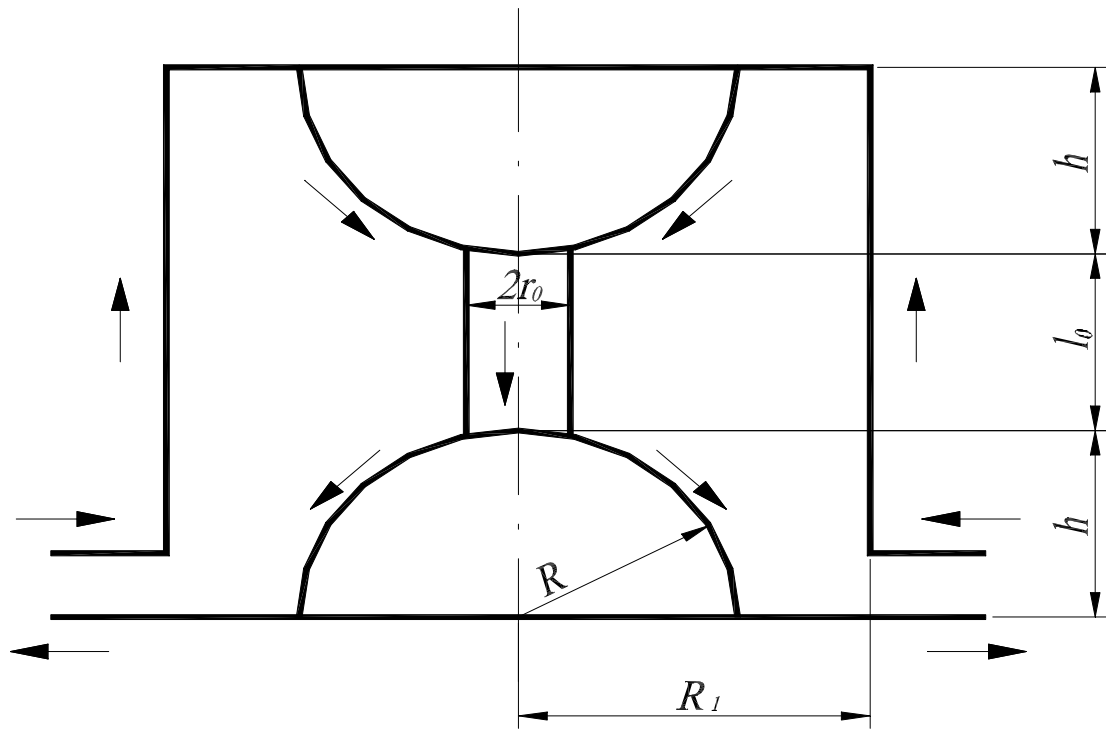


$$L = \frac{2\mu_0 d}{\pi N} \left(\ln \frac{2l}{\pi S} + \frac{3}{2} \right),$$

где $S = \delta + d$, N - количество гофр.

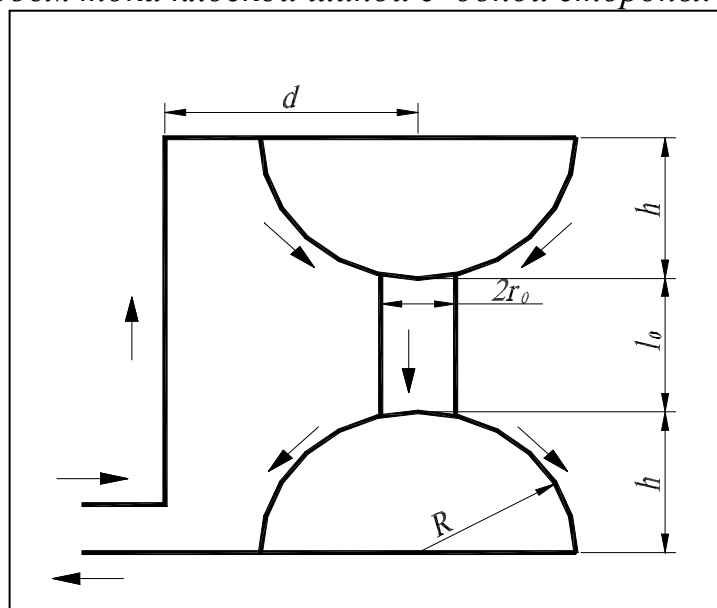
4.2.15. Искровой разрядник с электродами, скругленными по сфере с радиусом R и коаксиальным токопроводом.

При высоте электродов $h \leq R$



$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[l_0 \left(\ln \frac{R_1}{r_0} + \frac{1}{4} \right) + 2h + h \ln \frac{R_1^2}{(2R-h)h} - 2R \ln \frac{2R}{2R-h} \right]. \text{ При } h = R \quad L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[l_0 \left(\ln \frac{R_1}{r_0} + \frac{1}{4} \right) + 2R + 2R \ln \frac{R_1}{R} - 2R \ln 2 \right].$$

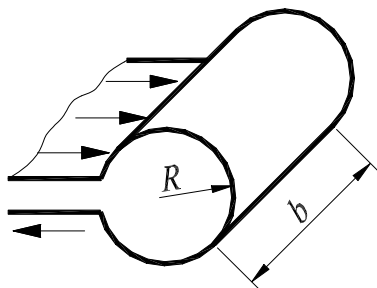
4.2.16. Искровой разрядник с электродами скругленными по сфере с радиусом R и подводом тока плоской шиной с одной стороны.



Ширина шины $b \geq 2R$; $d \gg r_0$; $d \geq 2R$; $h \leq R$.

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[l_0 \left(\ln \frac{2d}{r_0} + 1/4 \right) + 2h + 2h \ln \frac{2d}{\sqrt{(2R-h)h}} - \right. \\ \left. - 2R \ln \frac{2R}{2R-h} \right].$$

4.2.17. Одновитковый тонкостенный соленоид.

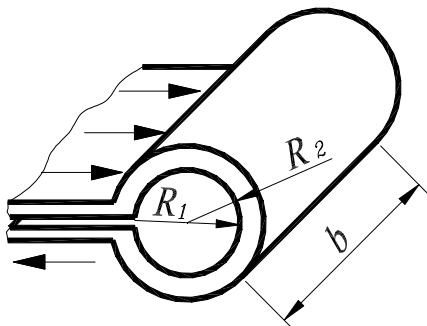


$$L = \mu_0 \frac{\pi R^2}{b} K_L.$$

Зависимость $K_L = f\left(\frac{b}{2R}\right)$ для постоянной плотности тока по длине соленоида дана в п. 4.2.19 кривая для $\frac{R_2}{R_1} = 1$. Приближенная формула при $b \geq 2R$

$$L = \mu_0 \frac{\pi R^2}{b + 1,24R}.$$

4.2.18. Толстостенный одновитковый соленоид с большим отношением R_2/R_1 ($R_2/R_1 \geq 1,5$).



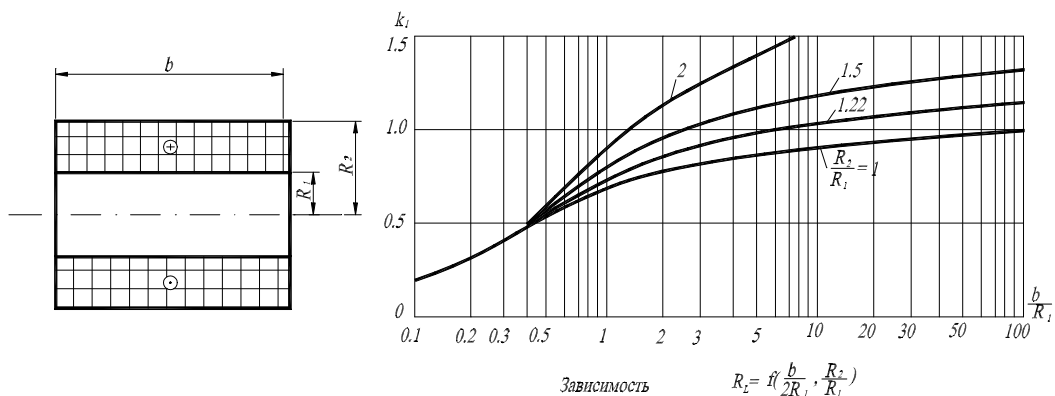
$$L = \frac{2\mu_0 R_1}{1 + \frac{2b}{\pi R_1}}.$$

Индукция в центре соленоида для $b/2R_1 \geq 1$

$$B_c = \frac{\mu_0 i}{b + \frac{\pi R_1}{2}}.$$

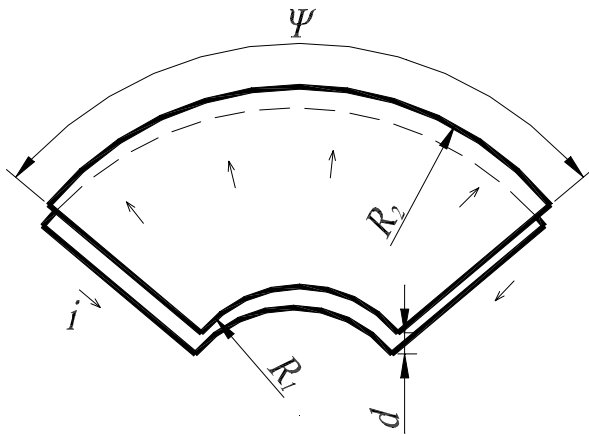
4.2.19. Многовитковый соленоид, средняя

плотность тока одинакова по сечению всей обмотки.



$$L = \mu_0 \frac{\pi R_1^2}{b} K_L. \quad \text{Зависимость } K_L = f\left(\frac{b}{2R_1}, \frac{R_2}{R_1}\right) \text{ дана на графике.}$$

4.2.20. Плоские шины секторной формы.

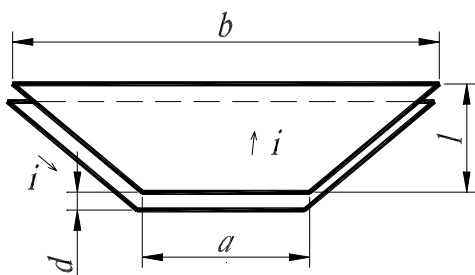


Расстояние между шинами d , участки токопровода и токосъема имеют форму дуг радиуса R_1 и R_2 , $d < R_1$, $d \ll R_2$.

$$L = \mu_0 \frac{d}{\Psi} \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

Для полукруглых шин $\Psi = \pi$, для круглых шин $\Psi = 2\pi$.

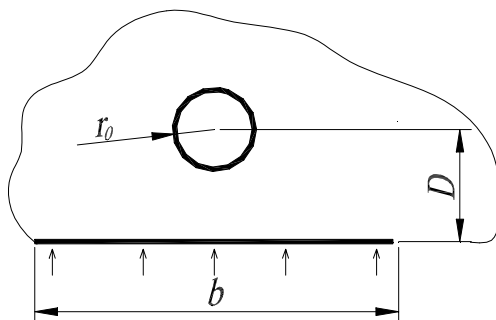
4.2.21. Плоские шины трапециевидальной формы.



Расстояние между шинами d , токопровод и токосъем осуществляется на участках шириной a и b

$$L = \mu_0 \frac{dl}{b-a} \ln \frac{b}{a}.$$

4.2.22. Полубесконечные плоские шины с подводом тока к краю, соединенные проводом радиуса r_0 .

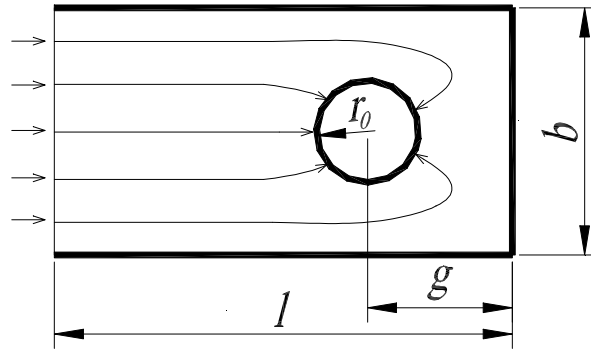


Расстояние между шинами $d \ll b, D$, плотность тока на краю одинакова по длине

$$L = \frac{\mu_0 d}{\pi} \ln \frac{D^2}{0,22b\sqrt{2r_0D}}.$$

4.2.23. Плоские шины, имеющие форму полосы, соединенные проводником радиуса r_0 .

Расстояние между шинами $d \ll b, l, g$

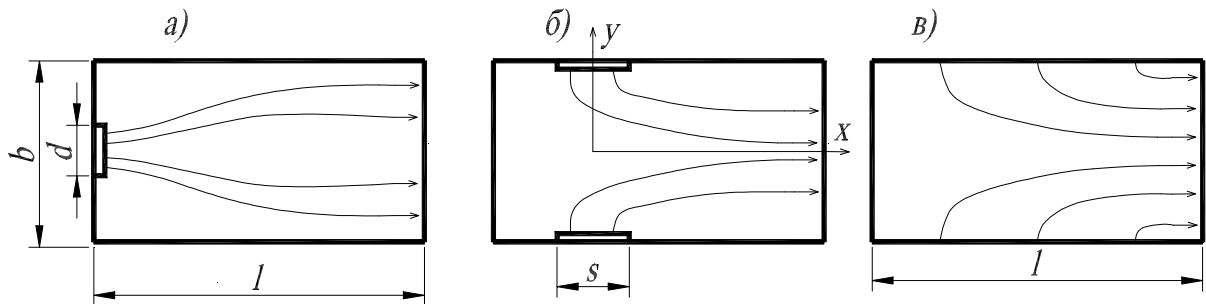


$$L = \frac{\mu_0 d(l-g)}{b} + \mu_0 \frac{d}{2\pi} \ln \frac{b}{2\pi r_0},$$

где первое слагаемое - индуктивность плоских шин длиной $(l - g)$, второе - учитывает стекание тока к соединяющему их проводнику.

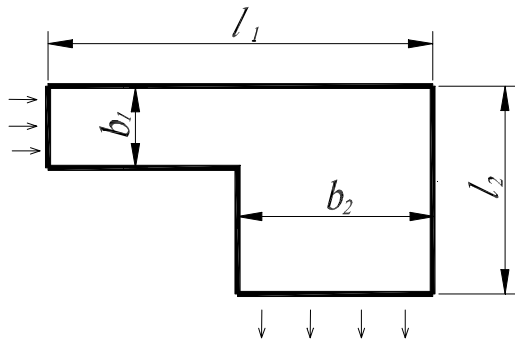
4.2.24. Плоские шины, имеющие форму полосы с различными участками токопровода и токосъема S .

Расстояние между шинами $d \ll b, l$, линейная плотность тока на участках токопровода и токосъема постоянна.



$$a) L = \frac{\mu_0 d}{b} l + \mu_0 \frac{d}{\pi} \ln \left(\sin \frac{\pi S}{2b} \right);$$

$$б) \text{ При } S < b < x \quad L = \mu_0 \frac{d}{b} x + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \ln \frac{2b}{\pi S}; \quad в) L = \frac{1}{3} \frac{\mu_0 l d}{b}.$$



4.2.25. Плоские шины, образованные соединением встык полос различной ширины.

При $l_{1,2} > b_{1,2}$

$$L = \mu_0 d \left(\frac{l_1}{b_1} + \frac{l_2}{b_2} \right) + \Delta L, \quad \text{где}$$

$$\Delta L = -\frac{2\mu_0 d}{\pi} \left[\frac{b_1}{b_2} \operatorname{arctg} \frac{b_1}{b_2} + \frac{b_2}{b_1} \operatorname{arctg} \frac{b_2}{b_1} + \ln \frac{4b_1 b_2}{b_1^2 + b_2^2} \right].$$

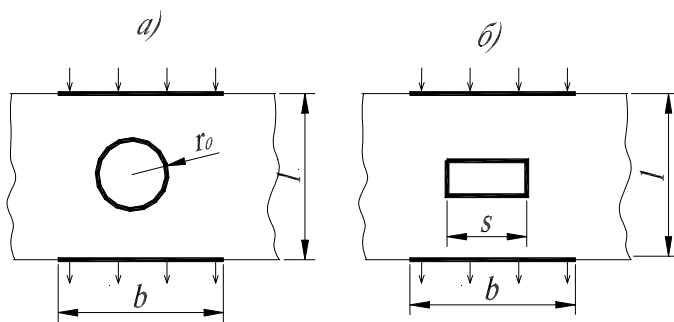
В частности, при условии $b_1=b_2$

$$\Delta L = -\mu_0 d \left(1 + \frac{2}{\pi} \ln 2 \right).$$

4.2.26. Широкие шины, к которым ток подводится с постоянной линейной плотностью на противоположных сторонах, а снимается с окружности радиуса $r_0 \ll b$ или с участка шириной $S \ll b$.

Минимум индуктивности

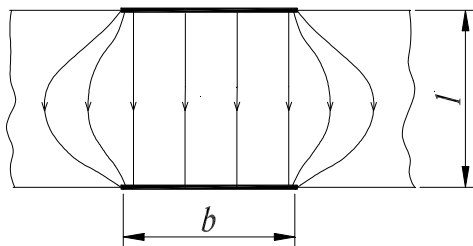
имеет место при $\frac{b}{l} = \frac{4}{\pi}$;



$$a) \quad L \cong \frac{\mu_0 d}{2\pi} \ln \frac{2l}{\pi r_0};$$

$$б) \quad L \cong \frac{\mu_0 d}{2\pi} \ln \frac{8l}{\pi s}.$$

4.2.27. Широкие шины, у которых ток подводится и отводится с постоянной плотностью на противоположных участках.

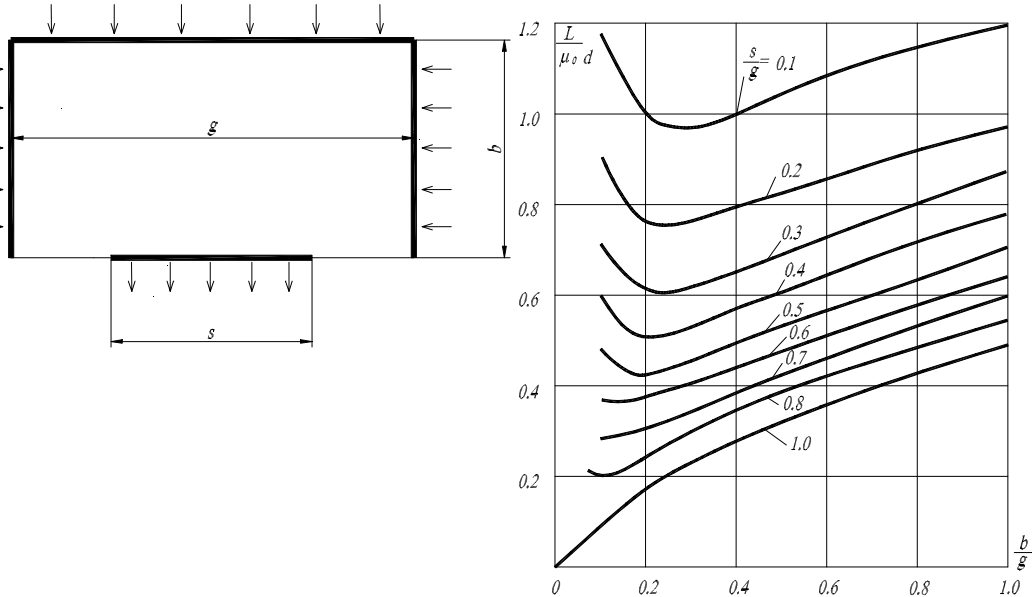


При $d \ll b, l$

$$L = \frac{2\mu_0 d}{\pi} \ln \frac{8l}{\pi b}.$$

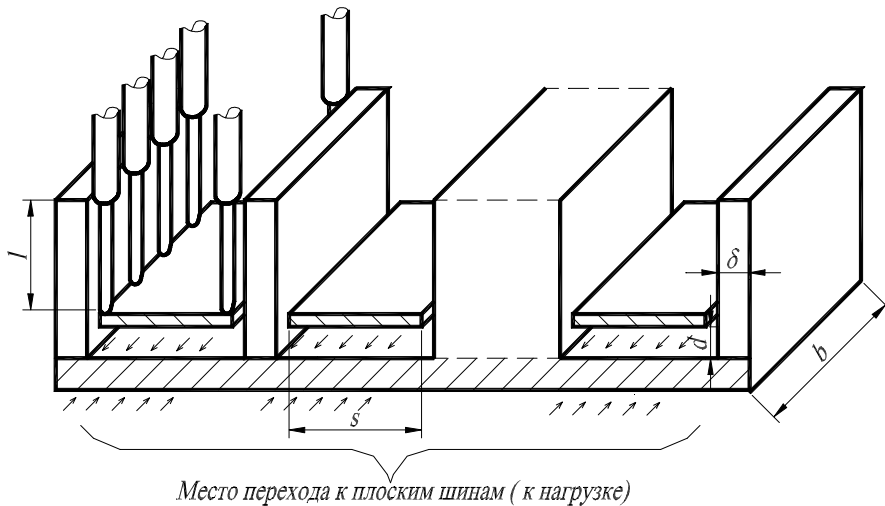
4.2.28. Прямоугольные шины с симметричным токопроводом.

Постоянная линейная плотность тока на внешней границе шин (случай кабельного коллектора), токосъем осуществляется на участке длиной s , расстояние между шинами $d \ll b, g, s$.



$L = \mu_0 d F\left(\frac{b}{g}, \frac{s}{g}\right)$, зависимость $F\left(\frac{b}{g}, \frac{s}{g}\right) = \frac{L}{\mu_0 d}$ представлена на графике.

4.2.29. Коробчатый кабельный коллектор, $d \ll b, l, s; \delta \ll s$



Индуктивность разделок кабелей рассчитываем по формуле п.4.2.7; индуктивность плоских шин шириной s , к которым подключены жилы кабелей, - по формуле 4.2.24 в.

$$L = \frac{1}{3} \mu_0 d \frac{b}{s}$$

Коробчатый коллектор позволяет подвести ток от большего количества кабелей к нагрузке малых линейных размеров. Суммарная индуктивность обратно пропорциональна количеству рядов кабелей и количеству коробов.

4.3. Примеры расчета параметров импульсных установок

4.3.1. Генератор импульсных токов

Общие принципы компоновки ГИТ рассмотрены в п.3.1. В генераторе импульсных токов (рис. 3.6) использованы конденсаторы КМК-50-4 с габаритными размерами 520x225x650 мм. С каждой стороны центральных шин установлено по три конденсатора. Длины сторон $b = g = 3 \times 520 + 40 = 1600$ мм, где 40 мм - конструктивный зазор между конденсаторами. Нагрузка - одновитковый соленоид с внутренним диаметром $2R = 100$ мм и длиной $b_c = 500$ мм.

Индуктивность нагрузки

$$L_H = \mu_0 \frac{\pi R^2}{b_c} K \left(\frac{b_c}{R} \right) = \frac{4\pi 10^{-7} \pi 25 10^{-4}}{0,5} 0,9 = 18 \text{ нГн.}$$

Емкость ГИТ $C = 4 \cdot 9 = 36$ мкФ.

В ГИТ использованы искровые разрядники с искажением поля (П7). Они установлены по периметру центральных шин. При управляемом срабатывании в каждом разряднике должно возникать два параллельных искровых канала. Рабочий газ (азот) - под давлением 2 атм. Исходя из обеспечения электрической прочности выбраны следующие основные размеры разрядников: $l_0 = 15$ мм; $h = R = 40$ мм; $d_p = 80$ мм; $\Delta = 20$ мм; общая высота разрядника $h_p = l_0 + 2h + 2\Delta = 135$ мм.

Индуктивность ГИТ:

$$L = \frac{L_{к1}}{n_k} + \frac{L_{пк}}{n_k} + \frac{L_{р1}}{n_p} + L_{цш} + L_T + L_{п} + L_H ,$$

где $L_{к1}$ - индуктивность одного конденсатора; n_k - количество конденсаторов; $L_{пк}$ - индуктивность подсоединения конденсатора; $L_{р1}$ - индуктивность одного искрового канала разрядника; n_p - общее количество каналов во всех разрядниках; $L_{цш}$ - индуктивность центральных шин; L_T - индуктивность трапецеидального участка шин; $L_{п}$ - индуктивность прямолинейного участка шин; L_H - индуктивность нагрузки.

Ожидаемый коэффициент использования ГИТ $\eta = 0,7$, тогда

$$L = \frac{L_H}{\eta} = \frac{18}{0,7} = 26 \text{ нГн.}$$

Период колебаний $T = 2\pi\sqrt{LC} = 2\pi\sqrt{26 \cdot 10^{-9} \cdot 36 \cdot 10^{-6}} = 6 \text{ мкс.}$ Амплитуда тока $I_m = U_0\sqrt{C/L} = 50 \cdot 10^3 \sqrt{36 \cdot 10^{-6}/26 \cdot 10^{-9}} = 1,86 \text{ МА.}$ Ток в одном искровом канале $I_{m1} = 1,86 \cdot 10^6 / 18 \cong 100 \text{ кА.}$ Радиус канала в момент первого максимума тока [5]:

$$r_0 = \left(\frac{4}{\pi^2 \rho \xi \sigma} \right)^{1/6} \left[\int_0^t i^{2/3} dt \right]^{1/2} =$$

$$= \left(\frac{4}{\pi^2 \cdot 2 \cdot 1,25 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 10^4} \right)^{1/6} \left[\int_0^{t_1} \left(\frac{I_{m1}}{t_1} t \right)^{2/3} dt \right]^{1/2} = 0,1 I_{m1}^{1/3} \left(\frac{3}{5} t_1 \right)^{1/2},$$

где $t_1 = \frac{T}{4} = 1,5 \text{ мкс.}$ Приближенно считаем, что до первого максимума ток на-

растает по линейному закону $i = \frac{I_{m1}}{t_1} t$. Тогда

$$r_0 = 0,1 \cdot 10^{5/3} \sqrt{3/5} (1,5 \cdot 10^{-6})^{1/2} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4,5 \text{ мм.}$$

Индуктивность разрядника рассчитывается по формуле п.4.2:

$$L_{p1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \left[1,5 \cdot 10^{-2} \left(\ln \frac{2 \cdot 8}{0,45} + \frac{1}{4} \right) + 8 \cdot 10^{-2} + 8 \cdot 10^{-2} \ln \frac{2 \cdot 8}{4} - 8 \cdot 10^{-2} \ln 2 \right] =$$

$$= 39 \cdot 10^{-9} \text{ Гн} = 39 \text{ нГн.}$$

Расстояние между каналами в разрядниках $a > d_p$, поэтому индуктивность всех параллельно включенных разрядников

$$L_p = \frac{L_{p1}}{n_p} = \frac{39}{18} = 2,15 \text{ нГн.}$$

Учтем индуктивность оснований электродов всех разрядников высотой Δ

$$L_{oc} = \mu_0 \frac{\Delta(dp-R)}{2b+g} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-2}}{4,5} = 0,22 \text{ нГн.}$$

Индуктивность разрядников с основаниями

$$L_{\text{po}} = L_p + L_{\text{oc}} = 2,4 \text{ нГн.}$$

Индуктивность конденсаторов

$$L_k = L_{k1}/n_k = 15/9 = 1,7 \text{ нГн.}$$

Индуктивность подсоединения конденсаторов

$$L_{\text{пк}} = \mu_0 \frac{d_{\text{п}} l_{\text{п}}}{b_{\text{п}} n_{\text{к}}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{10^{-2} \cdot 0,1}{0,4 \cdot 9} = 0,35 \text{ нГн,}$$

где $d_{\text{п}}=10$ мм ; $l_{\text{п}}=0,1$ м ; $b_{\text{п}}=0,4$ м.

Индуктивность центральных шин определим по графику п.4.2. Токоъем осуществляется на участке $S = 1$ м ; $b/S = 1,6$; $g/S = 1,6$; $L/(\mu_0 d) \cong 0,5$.

Толщину полиэтиленовой изоляции между шинами на рабочее напряжение 50 кВ выбираем $d = 4$ мм, тогда

$$L_{\text{цш}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,5 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 2,5 \text{ нГн.}$$

Индуктивность трапецидальных шин (см. п.4.2):

$$L_{\text{т}} = \mu_0 \frac{d l_{\text{т}}}{S - b_{\text{с}}} \ln \frac{S}{b_{\text{с}}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,4 \cdot 10^{-2} \frac{0,4}{0,2} \ln 2 = 2,6 \text{ нГн.}$$

Индуктивность прямолинейного участка

$$L_{\text{п}} = \mu_0 \frac{d l}{b_{\text{с}}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{0,4 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1}{0,5} = 1 \text{ нГн,}$$

где длина прямолинейного участка - 0,1 м, ширина $b_{\text{с}} = 0,5$ м.

Итак, суммарная индуктивность ГИТ L_0 (без учета нагрузки) составит:

$$\begin{aligned} L_0 &= L_k + L_{\text{пк}} + L_p + L_{\text{цш}} + L_{\text{т}} + L_{\text{п}} = \\ &= 1,7 + 0,35 + 2,4 + 2,5 + 2,6 + 1 = 10,55 \text{ нГн.} \end{aligned}$$

Коэффициент использования

$$\eta = \frac{L_{\text{н}}}{L_0 + L_{\text{н}}} = \frac{18}{28,55} = 0,63$$

несколько меньше принятого вначале, что в данном случае допустимо.

Исходя из нового значения индуктивности $L = 28,55$ нГн пересчитаем амплитуду тока и период колебаний: $I_m = 1,75$ МА; $T = 6,36$ мкс.

Найдем сопротивление разрядного контура ГИТ. Конденсаторы с бумажной изоляцией, пропитанной касторовым маслом, на высокой частоте 30 - 50 кГц имеют добротность $Q = 10 - 12$, $\operatorname{tg} \delta = r_k \omega C \cong 0,08 - 0,1$. Сопротивление всех конденсаторов на частоте $\omega = 2\pi/T$

$$r_k = 0,08 \frac{6,36 \cdot 10^{-6}}{2\pi \cdot 36 \cdot 10^{-6}} = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Центральные, трапецеидальные, а также шины прямолинейного участка и соленоид выполнены из латуни $\rho = 6,2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; шины подсоединения конденсаторов - из алюминия $\rho = (2 - 5) \cdot 10^{-8}$ Ом·м (зависит от марки материала, примем $\rho = 3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м).

Сопротивление шин рассчитаем по формуле (4.15):

$$r = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega \rho}{\mu_0}} \cdot \frac{\partial L}{\partial n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega \rho}{\mu_0}} \cdot \frac{L}{d}.$$

Сопротивление шин подсоединения

$$r_{\text{пк}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2\pi \cdot 3 \cdot 10^{-8}}{6,36 \cdot 10^{-6} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} \cdot \frac{0,35 \cdot 10^{-9}}{10^{-2}} = 0,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Сопротивление центральных шин

$$r_{\text{цш}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2\pi \cdot 6 \cdot 10^{-8}}{6,36 \cdot 10^{-6} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} \cdot \frac{2,5 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-3}} = 1,54 \cdot 10^2 \frac{2,5 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-3}} = 0,96 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Сопротивление трапецеидальных шин

$$r_T = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega \rho}{\mu_0}} \cdot \frac{L_T}{d} = 1,54 \cdot 10^2 \frac{2,6 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-3}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Сопротивление прямолинейного участка

$$r_{\Pi} = 1,54 \cdot 10^2 \frac{1 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-3}} = 0,3810^{-4} \text{ Ом.}$$

Сопротивление соленоида

$$r_c = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega \rho}{\mu_0}} \frac{\partial L}{\partial R} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega \rho}{\mu_0}} \frac{L}{R/2} = 1,54 \cdot 10^2 \frac{18 \cdot 10^{-9}}{2,5 \cdot 10^{-2}} = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Сопротивление искровых каналов разрядников оценим по формуле (2.3).
Для момента первого максимума тока

$$r_{и1} = \frac{l_0}{\left[4\pi \sigma^2 / (\rho_0 \xi)\right]^{1/3} \int_0^t i^{2/3} dt},$$

где, как и при расчете радиуса канала, предполагается, что ток $i(t)$ меняется по линейному закону

$$\begin{aligned} r_{и1} &= \frac{1,5 \cdot 10^{-2}}{\left[4\pi \cdot 9 \cdot 10^8 / (2 \cdot 1,25 \cdot 4)\right]^{1/3} \cdot \frac{3}{5} I_{m1}^{2/3} t_1} = \\ &= \frac{1,5 \cdot 10^{-2}}{1,05 \cdot 10^3 \cdot \frac{3}{5} \cdot 10^{1/3} \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6}} = 6,75 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Сопротивление каналов всех разрядников

$$r_{и} = 6,75 \cdot 10^{-3} / 18 = 2,66 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

После первого максимума тока сопротивление искровых каналов меняется слабо. Сопротивление искровых каналов разрядников можно также оценить по формуле (2.5).

Падение напряжения на искровых каналах

$$U = U_{ак} + E_{к} l_0 = 50 + 400 \cdot 1,5 = 650 \text{ В.}$$

Сопротивление всех каналов

$$r_{и} = \frac{U}{I_m} = \frac{650}{1,75 \cdot 10^6} = 3,710^{-4} \text{ Ом.}$$

Сопротивление стальных электродов разрядников. От анодного (катодного) пятна ток растекается по поверхности электрода (по скин-слою)

$$r_{э1} \cong \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu_r \rho}{2}} \ln \frac{R}{r_0},$$

где r_0 - радиус пятна (искрового канала), R - радиус электрода.

Для стали (железа) примем $\rho \approx 1 \cdot 10^{-7}$ Ом · м , относительная магнитная проницаемость на больших частотах и большой индукции поля вблизи искрового канала $\mu_r \approx 100$. Сопротивление одного электрода

$$r_{э1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 100 \cdot 10^{-7}}{6,36 \cdot 10^{-6} \cdot 2}} \ln \frac{4}{0,45} = 8,810^{-4} \text{ Ом.}$$

Сопротивление электродов всех разрядников $r_э = 2 r_{э1} / 18 \cong 10^{-4}$ Ом.

Итак, полное сопротивление контура ГИТ

$$\begin{aligned} r &= r_k + r_{пк} + r_p + r_э + r_{цш} + r_T + r_{п} + r_c = \\ &= 2,25 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 10^{-5} + 2,66 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} + \\ &+ 0,96 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} + 0,38 \cdot 10^{-4} + 0,8 \cdot 10^{-4} = 2,94 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Основное затухание в контур разряда вносят конденсаторы, так как их сопротивление является определяющим. Сопротивление болтовых соединений не учитываем.

Декремент колебаний

$$\delta = \frac{r}{2L} = 2,94 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 28,5 \cdot 10^{-9}) = 0,5 \cdot 10^5 \text{ 1/с ,}$$

$$\Delta = \exp(\delta T) = \exp(0,5 \cdot 10^5 \cdot 6,36 \cdot 10^{-6}) = 1,37.$$

Сила, действующая на шины,

$$F(t) = \frac{1}{2} i^2(t) \frac{\partial L}{\partial n} = \frac{1}{2} \frac{L}{d} (I_m e^{-\delta t} \sin \omega t)^2 .$$

Импульс силы

$$P = \int_0^{t_H} F(t) dt = \frac{1}{2} I_m^2 \frac{L}{d} \int_0^{\infty} e^{-2\delta t} \sin^2 \omega t dt = \frac{1}{2} I_m^2 \frac{L}{d} \frac{1}{4\delta},$$

где $1/\delta = \tau$ - постоянная времени затухания колебаний в контуре ГИТ,
 $\tau = 2 L/r$.

Для центральных шин

$$P_{\text{цш}} = \frac{1}{2} \cdot 1,75^2 \cdot 10^{12} \frac{2,5 \cdot 10^{-9}}{410^{-3}} \frac{1}{4 \cdot 0,5 \cdot 10^5} = 4,8 \text{ Н} \cdot \text{с}.$$

Сила магнитного поля расталкивает шины. Нижняя шина покоится на фундаменте и, следовательно, неподвижна, а верхняя шина под действием силы поднимается вверх. Величина перемещения h не должна превышать 5 - 10 % толщины изоляции d . Работа, совершаемая магнитной силой по перемещению шины, равна

$$W = F \frac{1}{2} at^2 = F \frac{1}{2} \frac{F}{M} t^2 = \frac{1}{2} \frac{P^2}{M} = Mgh, \quad (4.16)$$

где $a = F/M$ - ускорение, Mgh - энергия тела, поднятого на высоту h , g - ускорение силы тяжести. Из последнего соотношения находим массу груза, необходимого для удержания верхней шины

$$M = \frac{P}{\sqrt{2gh}}. \quad (4.17)$$

Для центральных шин, приняв $h = 0,05d$, получим

$$M = \frac{4,8}{\sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-3}}} = 76 \text{ кг}.$$

В эту цифру входит и масса самой шины. Удерживающий груз должен быть рассредоточен по поверхности шины пропорционально квадрату линейной плотности тока в шине.

Импульс силы, действующей на трапецеидальные шины,

$$P = \frac{1}{2} I_m^2 \frac{L_T}{d} \frac{1}{4\delta} = \frac{1}{2} \cdot 1,75^2 \cdot 10^{12} \frac{2,6 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-3}} \frac{1}{4 \cdot 0,5 \cdot 10^5} = 5 \text{ Н} \cdot \text{с}.$$

Масса груза для удержания трапецеидальных шин

$$M_T = \frac{5}{\sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-3}}} = 80 \text{ кг} .$$

4.3.2. Центральный кабельный коллектор

Конструкция коллектора рассмотрена в п.4 (рис.3.15). К коллектору подходит 900 кабелей АКПВМ 1/50. Рабочее напряжение ГИТ- 30кВ. Нагрузкой является соленоид $L_H = 10$ нГн, длина соленоида $b_c = 1$ м, максимальная амплитуда тока $I_m = 10$ МА, период колебаний $T = 30$ мкс, декремент колебаний $\delta = 1 \cdot 10^4$ 1/с.

Кабель АКПВМ 1/50 имеет диаметр жилы $d_{ж} = 9$ мм, диаметр изоляции $d_{и} = 13$ мм, внешний диаметр 20 мм. Изоляционные угловые шайбы 10 имеют внешний диаметр $d_3 = 45$ мм. Исходя из этого расстояние между рядами кабелей выберем $d_1 = 60$ мм. Площадь шин, занятая N кабелями $(d_1 d_1)N = 6 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{-2} \cdot 900 = 3,24 \text{ м}^2$. Предварительно выберем болты М16. Расположим их в четыре ряда (см. рис. 3.15). С учетом диаметра изолятора b и угловых шайб 11 ширину ряда выбираем $c = 70$ мм. Тогда общая площадь шин, необходимая для размещения кабелей и болтов, составит $3,42 \text{ м}^2$, размеры шин $b = 1,9$ м, $d = 1,8$ м. Кабели расположены в 30 рядов по 30 кабелей в каждом ряду.

Индуктивность шин определим по формуле п.4.2.7:

$$L = \mu_0 \frac{l}{b} \left[d_0 + \frac{d_1}{6m} (2m^2 - 3m + 1) \right],$$

где l - толщина изоляции между шинами, $l = 3$ мм; $d_0 = d_1 = 6 \cdot 10^{-2}$ м; $m = 30$

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{3 \cdot 10^{-3}}{1,9} \left[6 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot 10^{-2} \frac{1800 - 90 + 1}{180} \right] = 1,25 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}.$$

В данном расчете не учтено, что угловые шайбы 10 и 11 увеличивают эквивалентную толщину изоляции между шинами. Если принять толщину плоской части шайб $\Delta = 3$ мм, то эквивалентная толщина изоляции увеличится примерно на $\Delta/3 \cong 1$ мм и составит около 4 мм.

Тогда получим

$$L = 1,65 \text{ нГн.}$$

Индуктивность разделки одного кабеля

$$L_{p1} = \frac{\mu_0}{2\pi} l_p \ln \frac{D}{d_{\text{ж}}} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,8 = 8 \text{ нГн,}$$

где $l_p = 5 \cdot 10^{-2}$ м - длина цилиндрической части угловой шайбы, $d_{\text{ж}}$ - диаметр жилы кабеля, $D = d_{\text{из}} + 2\Delta = 13 + 5 = 18$ мм, $d_{\text{из}}$ - диаметр изоляции, Δ - толщина угловой шайбы. Индуктивность разделок всех кабелей $L_p = L_{p1}/N \approx 1 \cdot 10^{-2}$ нГн (можно пренебречь).

Индуктивность трапецеидального участка шин

$$L_T = \mu_0 \frac{d l_T}{b - b_c} \ln \frac{b}{b_c},$$

где $l_T = 0,3$ м - длина трапецеидальных шин; $d = 3$ мм - толщина изоляции.

$$L_T = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,3}{0,9} \ln \frac{1,9}{1} = 0,86 \text{ нГн.}$$

Рассчитаем сечение и количество болтов, необходимое для удержания шин. Материал болтов - Ст.45, диаметр - 6 мм. Толщина каждой шины - 30 мм. Высота изоляционных втулок на рабочее напряжение 30 кВ - 60 мм. Активная длина болта $2 \cdot 30 + 2 \cdot 60 + 2 \cdot 5 = 190$ мм, где 5 мм - толщина шайб под гайку.

Возможны два варианта крепления шин. Первый - нижняя шина лежит на жестком фундаменте и под действием магнитной силы не смещается. Второй - шины установлены вертикально и не зажаты дополнительными конструкциями, или нижняя шина лежит на подставке, не обладающей достаточно высокой жесткостью. В этом случае обе шины будут перемещаться в разные стороны относительно средней плоскости, которую можно считать неподвижной. Рассмотрим именно этот случай, так как он требует большее количество болтов. Считаем шины жесткими, давление магнитного поля рассредоточено по всей площади шин равномерно, время воздействия магнитной силы τ существенно меньше периода собственных колебаний шин $\tau \ll T_M$, где $T_M = 2\pi/\omega_M$, ω_M - частота собственных упругих колебаний шин, стянутых болтами.

Импульс силы магнитного поля

$$P = \int_0^{t_{\mu}} F(t) dt = \frac{1}{2} I_m^2 \frac{L}{d} \frac{1}{4\delta},$$

где L - индуктивность шин, d - толщина изоляции между шинами,

$$P = \frac{1}{2} 1 \cdot 10^{14} \left(\frac{1,25 \cdot 10^{-9}}{310^{-3}} \right) \frac{1}{4 \cdot 10^4} = 520 \text{ Н} \cdot \text{с} .$$

Работа, совершаемая импульсной магнитной силой по перемещению одной из шин относительно средней плоскости, равна

$$\frac{1}{2} \frac{P^2}{M} = \frac{1}{2} K X_0^2, \quad (4.18)$$

где X_0 - перемещение шины относительно средней плоскости, M - масса шины, K - коэффициент жесткости болтов,

$$K = ES/(l/2), \quad (4.19)$$

E - модуль упругости материала болтов (модуль Юнга), для стали $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$; S - суммарное сечение всех болтов; $l/2$ - активная длина болтов, условно закрепленных по середине.

Подставив (4.19) в (4.18), получим:

$$X_0 = P \sqrt{l/(2MES)}. \quad (4.20)$$

Условие механической прочности болтов

$$\frac{X_0}{l/2} \leq \frac{\sigma_{\text{доп}}}{E}, \quad (4.21)$$

где $X_0/(l/2)$ - относительное удлинение болтов; $\sigma_{\text{доп}}$ - допустимое механическое напряжение, для стали $\sigma_{\text{доп}} = 2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ (20 кг/мм²).

Подстановка (4.21) в (4.20) дает

$$S \geq \frac{2E}{Ml} \frac{P^2}{\sigma_{\text{доп}}^2}, \quad (4.22)$$

где M - масса шины: $M = \rho V = 8,4 \cdot 10^3 \cdot 1,9 \cdot 1,8 \cdot 310^{-2} = 855 \text{ кг}$, плотность для латуни $\rho = 8,410^3 \text{ кг / м}^3$.

Для сечения болтов получим:

$$S \geq \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{11}}{855 \cdot 0,15} \left(\frac{520}{2 \cdot 10^8} \right)^2 = 2110^{-3} \text{ м}^2 = 210 \text{ см}^2.$$

Сечение одного болта М16 равно 2 см^2 , следовательно, для удержания шин необходимо около 100 болтов.

Если нижняя шина покоится на жестком фундаменте, масса которого много больше массы шин, то в формулы (4.19) и (4.21) вместо $l/2$ надо подставить l , тогда количество болтов будет в два раза меньше. Время воздействия импульсной силы $\tau = 1/\delta = 10^{-4} \text{ с}$. Проверим, как соблюдается условие $\tau \ll T_M$, где

$$T_M = \frac{2\pi}{\omega_M} = 2\pi \sqrt{M/K} = 2\pi \sqrt{\frac{M(l/2)}{SE}},$$

$\omega_M = \sqrt{K/M}$ - собственная частота упругих колебаний шин. В результате расчета имеем:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{855 \cdot 75 \cdot 10^{-3}}{21 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{11}}} = 7,810^{-4} \text{ с},$$

то есть τ примерно в восемь раз меньше T_M .

В данном расчете при определении жесткости системы учтено только растяжение болтов и не учтено сжатие изоляторов b , через которые болты сжимают шины. Под действием ударной нагрузки изоляторы могут разрушиться, поэтому под них необходимо ставить эластичные прокладки. При этом жесткость системы (коэффициент K) становится в несколько раз меньше, период собственных колебаний больше и, следовательно, для удержания шин потребуется меньшее количество болтов.

Если условие $\tau \ll T_M$ не соблюдается, то расчет болтов проводится в предположении, что на них действует статическая сила, равная $F_m = 1/2 I_m^2 L/d$. Сечение болтов находим из условия

$$F_m = \sigma_{\text{доп}} S.$$

В нашем примере

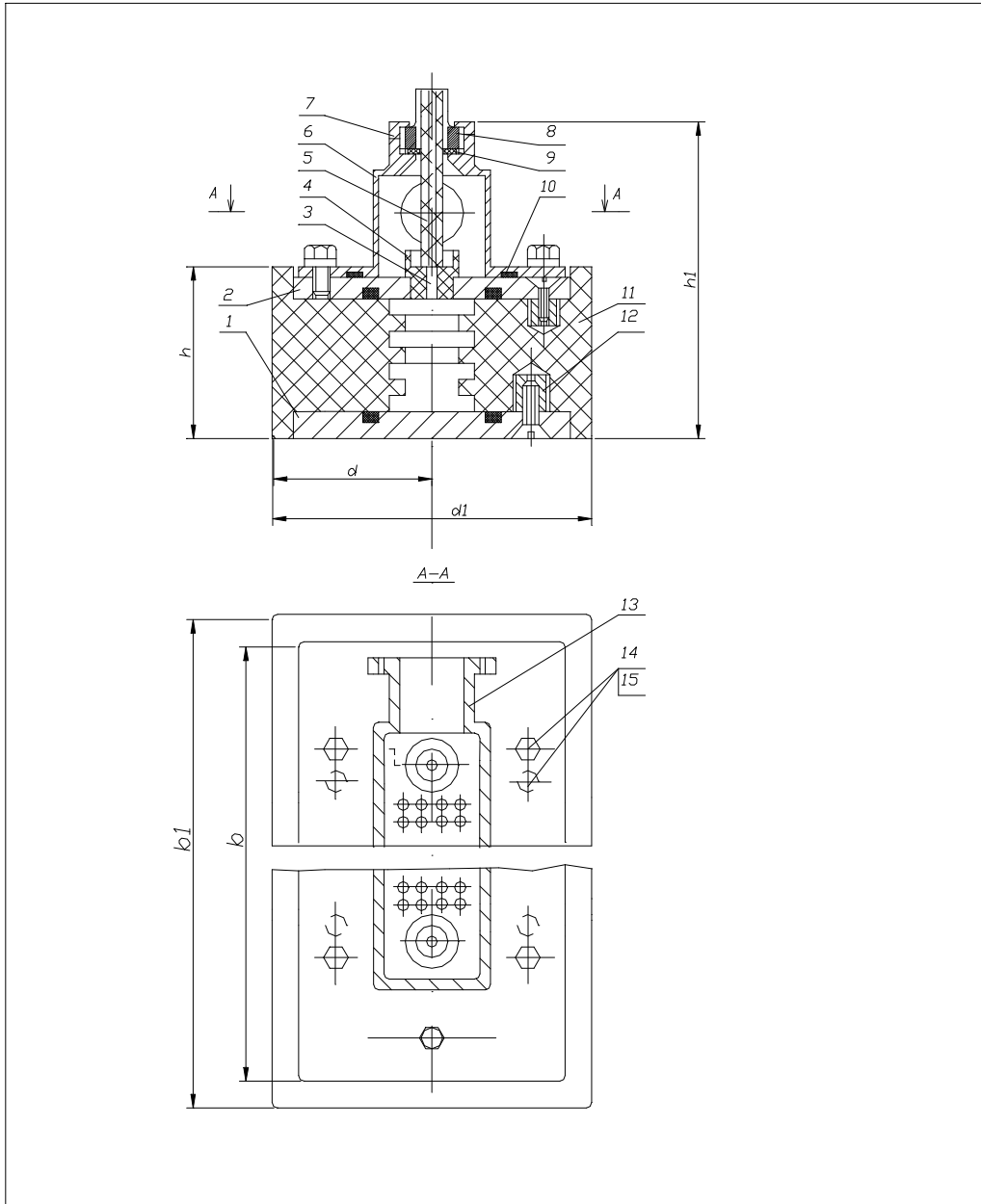
$$S = \frac{1}{2} 10^{14} \frac{1,25 10^{-9}}{3 10^{-3}} \frac{1}{2 10^8} = 0,1 \text{ м}^2 = 1000 \text{ см}^2$$

(500 болтов), что практически невыполнимо.

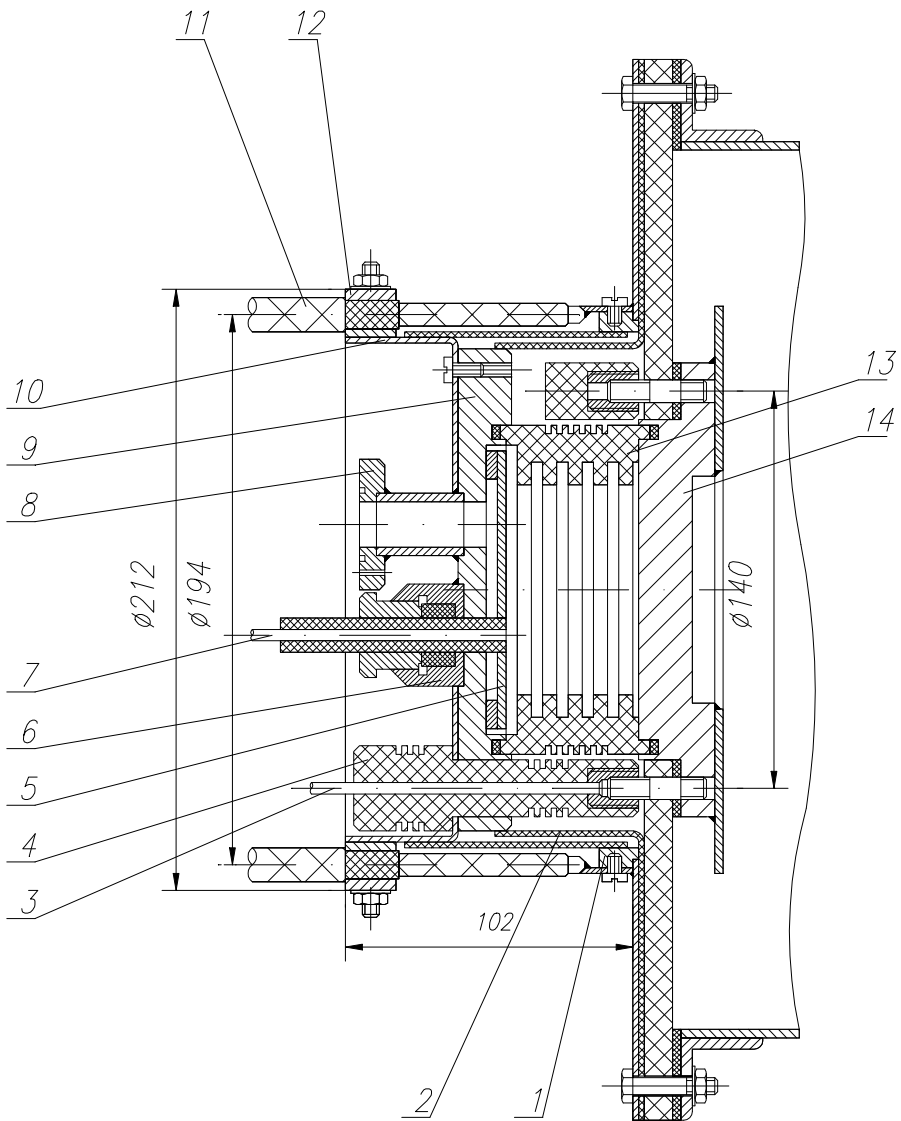
Для удержания трапецеидальной части шин (см. рис. 3.15) также надо применить болты или груз.

ПРИЛОЖЕНИЯ

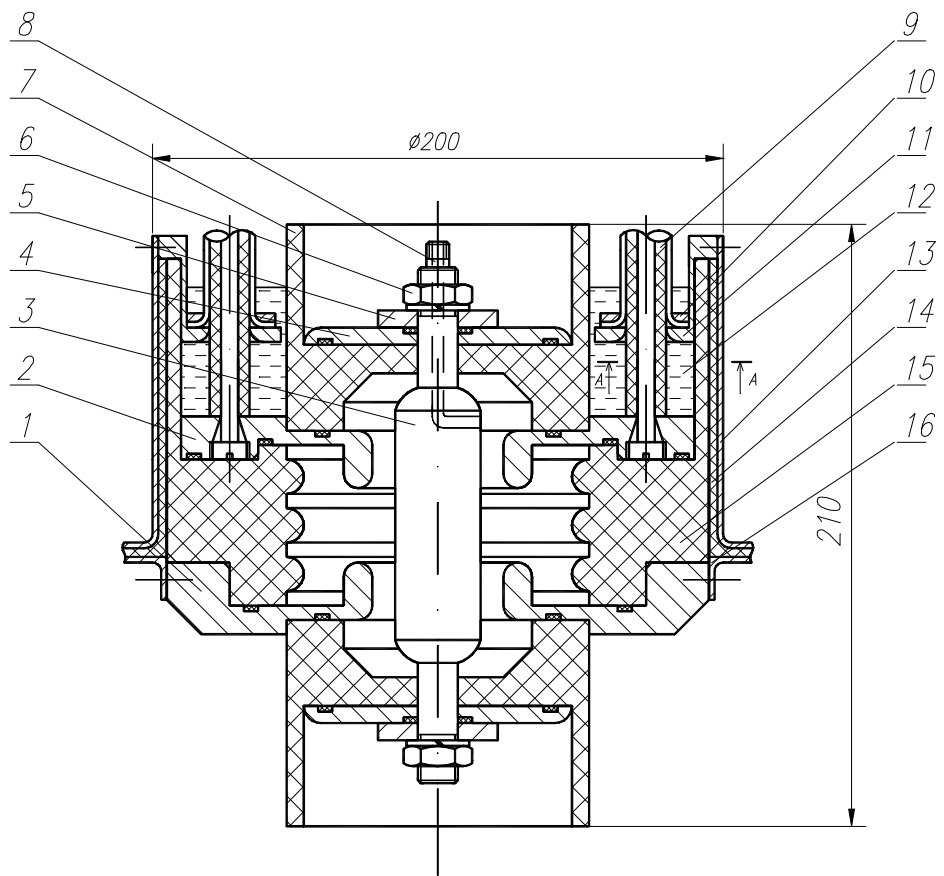
- П1. Разрядник вакуумный щелевой
- П2. Разрядник вакуумный цилиндрический
- П3. Разрядник искровой тригатронный
- П4. Разрядник искровой каскадный кольцевой
- П5. Разрядник искровой с искажением поля 1
- П6. Разрядник искровой с искажением поля 2
- П7. Разрядник с искажением поля (рельсотрон)
- П8. Разрядник искровой прямого перенапряжения
- П9. Ячейка ГИТ
- П10. Подсоединения группы кабелей к сборным шинам



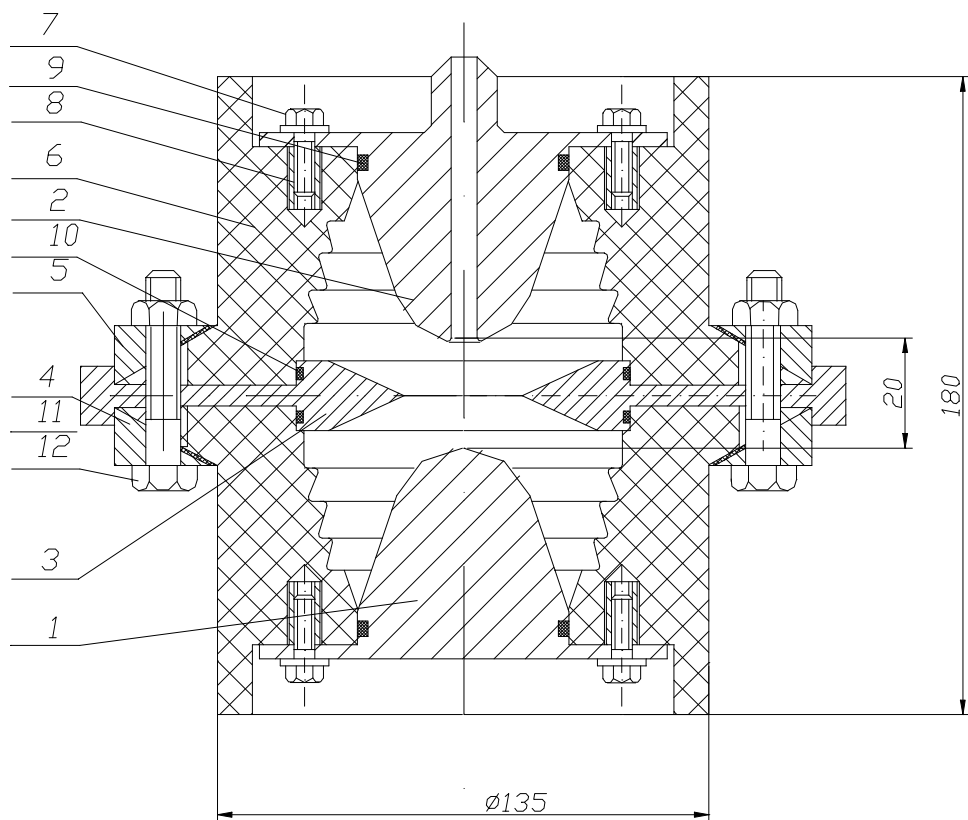
		ГТУ.учеб.001СБ										
		Разрядник вакуумный щелевой										
Разраб	Андреев	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td colspan="2"></td> <td style="text-align: right;">Масштаб</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td style="text-align: center; font-size: 2em;">1:1</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td style="text-align: center;">Лист 1 Листов 2</td> </tr> </table>				Масштаб			1:1			Лист 1 Листов 2
				Масштаб								
				1:1								
		Лист 1 Листов 2										
Чертил	Андреев											
Проверил	Янчус											
		П1										
		Кафедра ИЭ и ТВН гр. 4021/2										



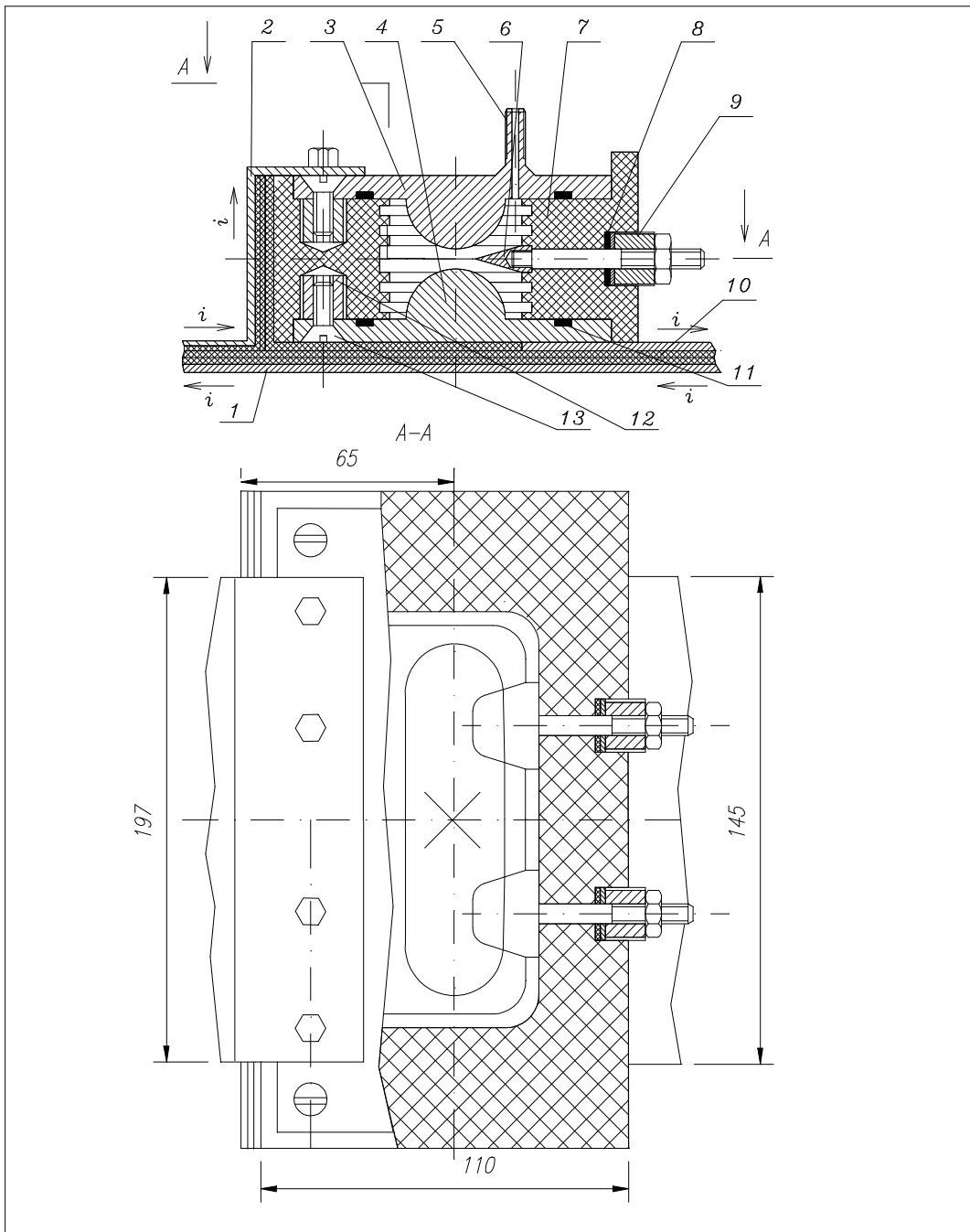
					СПбГТУ.учеб.001СБ		
							Масштаб
							1:2
Разраб.	Максимов						
Проверил							
					Лист 1	Листов 2	
				П2	Кафедра ИЭ и ТВН гр. 4021/2		



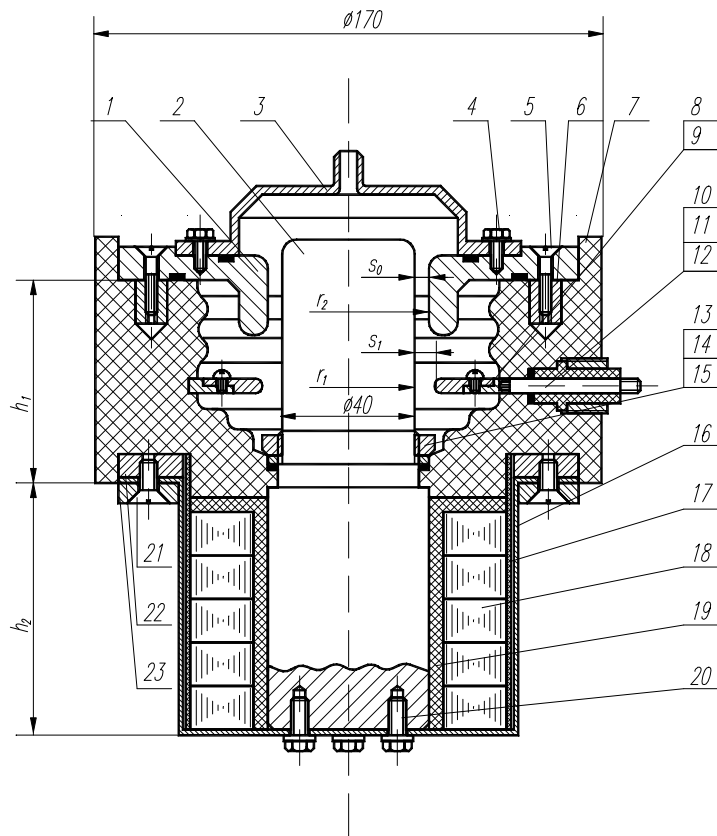
					СПБГТУ.учеб.001СБ	
						Масштаб
						1:2
					Лист 1	Листов 2
					Кафедра ИЭ и ТВН гр. 4021/2	
					П4	
Разраб.	Максимов					
Проверил						



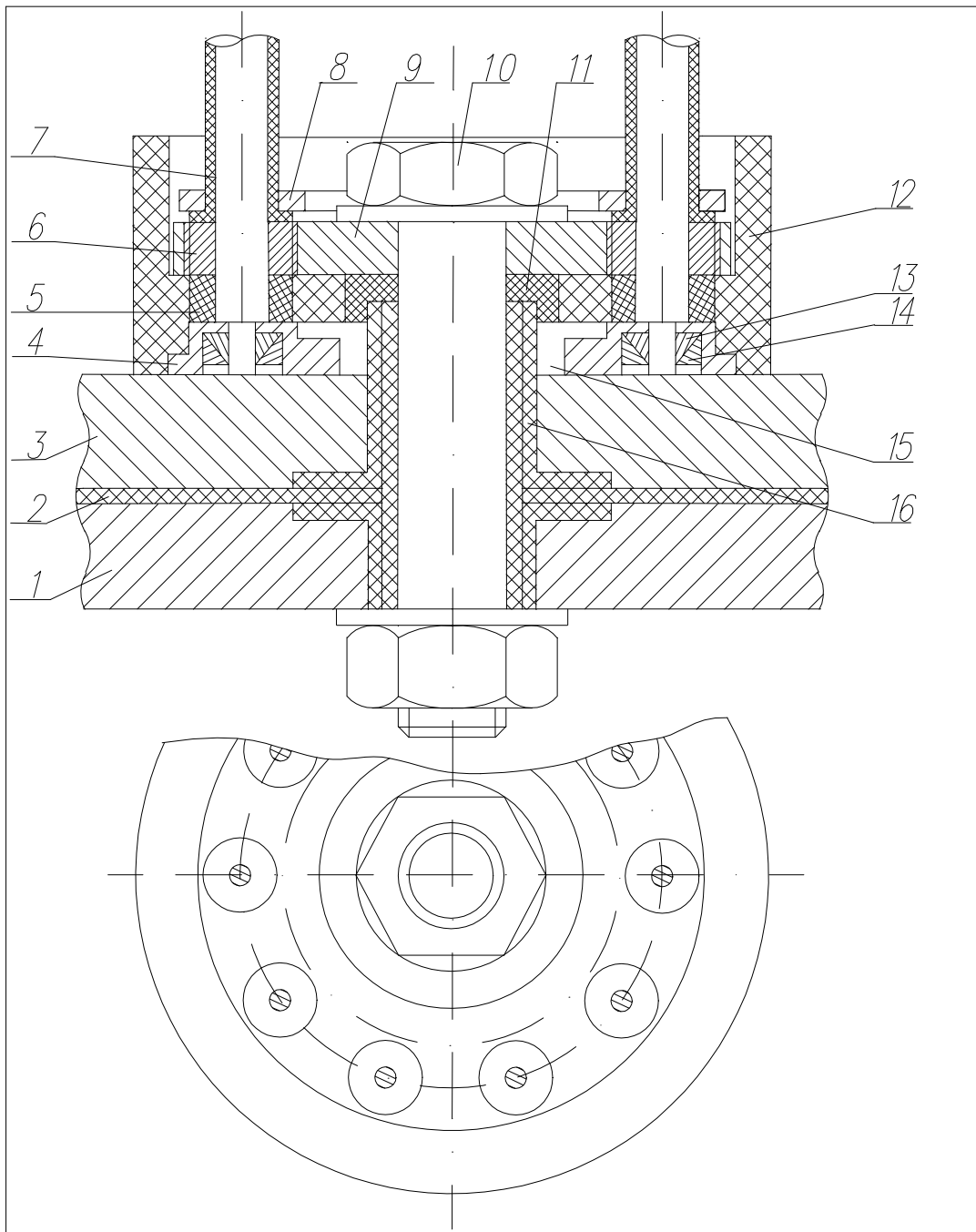
				<i>ГТУ.учеб.001СБ</i>			
				<i>Разрядник искровой с искажением поля 1</i>			<i>Масшт.</i>
							<i>1:1</i>
<i>Разраб.</i>	<i>Камкова</i>			<i>Лист 1</i>		<i>Листов 2</i>	
<i>Чертил</i>	<i>Камкова</i>			<i>Кафедра ИЭ и ТВН</i>			
<i>Провер.</i>	<i>Янчус</i>			<i>гр. 4021/2</i>			
				<i>П5</i>			



				ГТУ.учеб.001СБ	
				Разрядник с искажением лопя (рельсотрон)	Масштаб
Разраб.					
Провер.					
				Лист 1	Листов 2
				Кафедра ИЭ и ТВН гр. 4021/2	
				П7	



				<i>СПбГТУ.учеб.001СБ</i>			
				<i>Разрядник искровой прямого перенапряжения</i>			
		<i>1</i>				<i>Масштаб</i>	
<i>Разраб.</i>		<i>Андреев</i>				<i>1:2</i>	
<i>Проверил</i>		<i>Бельков</i>					
				<i>118</i>		<i>Лист 1 Листов 2</i>	
				<i>Кафедра ИЭ и ТВН гр. 4021/2</i>			



				СПбГТУ.учеб.001СБ			
				Присоединение группы кабелей к сборным шинам		Масштаб	
						1:1	
Разраб. Мартынова				Лист 1		Листов 2	
Проверил Бельков				Кафедра ИЭ и ТВН гр. 4021/2			
П10							

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Т. 1. Л.: Энергия, 1967. 522 с.
2. Техника больших импульсных токов и магнитных полей/Под ред. В.С.Комелькова. М.: Атомиздат, 1970. 472 с.
3. Кучинский Г. С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. Л.: Энергия, 1973. 175 с.
4. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки/Под ред. Г.С.Кучинского. М.: Энергоатомиздат, 1987. 656 с.
5. Бельков Е. П., Бочаров Ю.Н. Высоковольтные импульсные коммутирующие приборы: Учеб. пособие / СПбГТУ. СПб., 1993. 104 с.
6. Бельков Е. П., Бочаров Ю. Н. Высоковольтные импульсные установки: Учеб. Пособие / СПбГТУ. СПб., 1992. 100 с.
7. Кучинский Г.С., Калентьев Ю. Н., Люлько В. А. Расчет проходных изоляторов конденсаторного типа: Учеб. пособие / ЛПИ. Л., 1983. 75 с.
8. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М.: ИЛ, 1960. 605 с.
9. Шнерсон Г. А. Расчет параметров цепей разряда емкостных накопителей энергии: Учеб. пособие / ЛПИ. Л., 1980. 58 с.
10. Шнерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. Л.: Энергоиздат, 1981. 280 с.
11. Шнерсон Г. А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1992. 416 с.
12. Кучинский Г. С., Кизеветтер В. Е., Пинталь Ю. С. Изоляция установок высокого напряжения. Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Принципиальная схема генератора импульсных токов, режимы работы и выбор параметров.....	5
2. Основное оборудование и изоляция ГИТ.....	14
2.1. Конденсаторы.....	14
2.2. Коммутирующие приборы.....	20
2.3. Кабели.....	24
3. Конструкция и расчет ГИТ.....	28
3.1. ГИТ средних энергий.....	31
3.2. ГИТ больших энергий.....	41
4. Расчет параметров цепей разряда ГИТ.....	47
4.1. Общие положения.....	47
4.2. Расчетные формулы для индуктивности и внутреннего комплексного сопротивления; электромагнитные силы, действующие на проводник с током.....	56
4.3. Примеры расчета параметров импульсных установок.....	67
Приложения.....	78
Список литературы.....	99
Содержание.....	100