

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ПРОБОЯ ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

А. Ф. УСОВ

(Представлена научным семинаром кафедры техники высоких напряжений)

За последнее время в различных областях техники нашло широкое применение использование генераторов импульсного напряжения для генерирования ударных волн в жидкой среде и твердых диэлектриках для целей разрушения твердых тел, кинетики химических реакций, протекающих обычно при высоких давлениях и температурах, штамповки, обработки поковок и других технологических операций [1—6].

По данным большинства опубликованных работ, рабочие напряжения генераторов составляют десятки киловольт, а емкость генератора «в ударе» единицы и даже десятки микрофарад. Необходимость в этом вызвана стремлением увеличить запасаемую в конденсаторах энергию, определяющую развиваемую в канале искры мощность. Некоторые авторы [2, 7], неправильно истолковывая факт увеличения развиваемой мощности с увеличением межэлектродного промежутка, ошибочно считают, что аперриодизация процесса способствует увеличению мощности в разряде. Необходимо также учитывать, что увеличение емкости генератора «в ударе» ведет к увеличению периода колебаний, то есть скорость нарастания мощности уменьшается. Даже в одноконденсаторном устройстве при сведенной до минимума индуктивности разрядного контура время нарастания мощности составляло несколько микросекунд [7].

Значительное увеличение мощности в разряде и скорости нарастания ее может быть получено при использовании генераторов импульсного напряжения на сотни киловольт при емкости генератора «в ударе» в несколько десятков тысяч пикофарад.

Возможность использования высоких рабочих напряжений обусловлена тем, что при временах воздействия импульса напряжения 10^{-7} сек пробивная напряженность даже для крайне неоднородных полей составляет сотни кв/см [8]. В однородных полях величина пробивной напряженности для воды при таких временах воздействия по данным [9] может составлять даже 2 мв/см.

Однако при оценке возможности использования генераторов с рабочим напряжением в сотни киловольт необходимо учитывать, что потери энергии до пробоя пропорциональны квадрату рабочего напряжения, а генераторы в многоступенчатом исполнении имеют значительные индуктивности разрядного контура. Поэтому представляло интерес оценить, учитывая выше изложенное, эффективность использования

таких генераторов и рассмотреть возможность их усовершенствования, чтобы приспособить к специфичным условиям работы на нагрузку с малым сопротивлением.

При анализе разрядного контура генератора нами было сделано допущение, что сопротивление канала искры остается постоянным во всем диапазоне исследуемого времени. При этом мы исходили из результатов оценки сопротивления канала искры во времени для жидких и твердых диэлектриков, полученных в сходных условиях работы генератора [10, 2]. При пробое воды сопротивление канала искры составляет 4—10 ом, при пробое твердых диэлектриков несколько десятков ом.

Максимальное значение тока в контуре $R-L-C$ может быть записано как

$$I_{\max} = U \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\frac{b\varphi}{\omega}}, \quad (1)$$

где

$$\varphi = \arctg \frac{\omega}{b}, \quad b = \frac{R}{2L}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Приняв обозначения

$$\beta = \frac{C}{C_{\text{кр}}} = \frac{C}{4L/R^2},$$

имеем

$$I_m = U \sqrt{\frac{C}{L}} \exp \left[-\frac{\operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{1}{\beta} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta} - 1}} \right], \quad (2)$$

$$P_m = \frac{2W_0 R}{L} \exp \left[-\frac{\operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{1}{\beta} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta} - 1}} \right], \quad (3)$$

где $C_{\text{кр}}$ — емкость генератора, соответствующая границе аperiodичности, W_0 — запасаемая в конденсаторах энергия.

Из формул (2) и (3) следует, что при одинаковой запасаемой в конденсаторах энергии максимальные значения тока и мощности определяются экспонентой — функцией коэффициента β . Значения функций для β от $1 \cdot 10^{-4}$ до 1 даны в таблице. Минимальное значение функций

Табл ца

β	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\times 10^{-1}$	0,435	0,331	0,275	0,237	0,208	0,188	0,170	0,157	0,146	0,135
$\times 10^{-2}$	0,744	0,665	0,611	0,571	0,538	0,510	0,487	0,470	0,451	0,435
$\times 10^{-3}$	0,907	0,872	0,850	0,828	0,809	0,791	0,778	0,768	0,758	0,744
$\times 10^{-4}$	0,969	0,957	0,949	0,942	0,934	0,927	0,922	0,916	0,913	0,907

при $\beta = 1$ равно $e^{-2} \approx 0,1353$. При всех прочих равных условиях ($W_0, R, L = \text{const}$) величины максимального тока и максимальной мощности с уменьшением емкости генератора увеличиваются.

В частном случае при увеличении рабочего напряжения на порядок и уменьшении емкости на два порядка значение максимальной мощности увеличивается в 5,5 раз, а время нарастания мощности уменьшается в соответствии с этим на порядок.

Не трудно установить, что при условии постоянства C и L зависимость развиваемой мощности от сопротивления нагрузки имеет максимум. Приняв обозначение $m = \frac{R}{\sqrt{LC}}$ и определяя критическое значение m для условия $\frac{d}{dm}(P_m) = 0$, имеем

$$\frac{\operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{4}{m^2} - 1}}{\sqrt{\frac{4}{m^2} - 1}} = \frac{m^2 + 4}{8}, \quad (4)$$

что справедливо при $m = 1,118$. Максимальное значение мощности при оптимальном сопротивлении разрядного контура $P_{\text{ном}} = 0,65 \frac{W_0}{\sqrt{LC}}$.

Оптимальное значение сопротивления составляет немного более половины значения сопротивления, соответствующего границе апериодичности, поэтому об апериодизации процесса говорить не приходится. Уменьшение развиваемой мощности при $R > R_{\text{опт}}$ не является поэтому ни следствием нестабильности пробоя при больших расстояниях между электродами, ни следствием уменьшения количества энергии к моменту разряда, вызванного потерями энергии за счет электропроводности воды, как считают авторы [2, 7].

Вывод, сделанный на основе анализа максимальной мощности (3), следует уточнить по условию максимальной выделившейся энергии за первую четверть периода:

$$W^1 = \int_0^{t_\phi} i^2(t) R dt,$$

где

$$i = \frac{U}{\omega L} e^{-bt} \sin \omega t, \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega}{b}, \quad t_\phi = \frac{\varphi}{\omega}.$$

При введенных ранее обозначениях количество энергии, выделившееся за четверть периода тока, определяется как

$$W^1 = W_0 \left\{ 1 - (1 + 4\beta) \exp \left[-2 \frac{\operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{1}{\beta} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta} - 1}} \right] \right\}. \quad (5)$$

Из условия $\frac{dW^1}{d\beta} = 0$ определяется максимальное значение параметра, соответствующего максимальному количеству выделившейся энергии:

$$\frac{5\beta_{\text{опт}}}{1 + 4\beta_{\text{опт}}} = \frac{\operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{1}{\beta_{\text{опт}}} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta_{\text{опт}}} - 1}}, \quad (6)$$

что соответствует $\beta_{\text{опт}} = 0,196$.

Зависимость относительного количества выделившейся энергии за четверть периода тока от параметра β представлена на рис 1. Значит в случаях, когда бризантность действия электрического разряда в жидкой среде или твердом диэлектрике определяется в основном удельной плотностью энергии в канале искры, величина емкости генератора

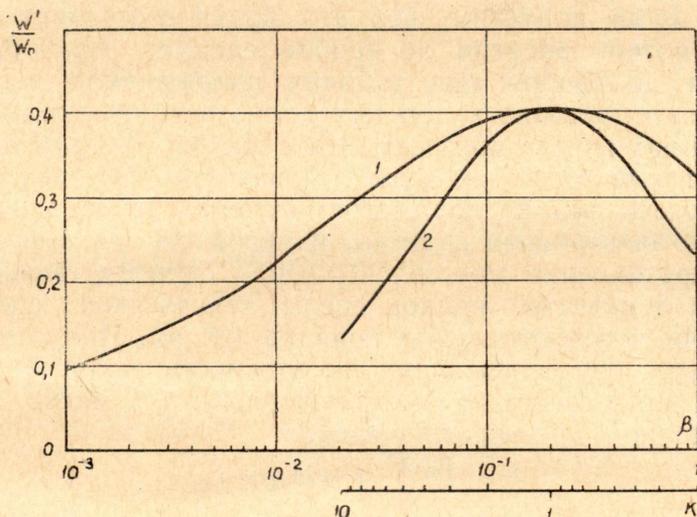


Рис. 1. Зависимость выделения энергии от параметра β .

Нижняя шкала соответствует условию оптимальности параметров.

«в ударе» должна быть порядка $0,2 \times \text{Скр} = 0,8 \frac{L}{R^2}$. В случае, если определяющим фактором является скорость выделения энергии, величина емкости генератора должна быть меньше, чем $0,8 \frac{L}{R^2}$.

При индуктивности разрядного контура в несколько микрогенри и сопротивлении канала искры в 10 ом величина оптимальной емкости генератора составляет несколько десятков тысяч пикофарад.

До сих пор процесс выделения энергии после пробоя исследовался без учета предпробивных явлений: потери энергии до пробоя за счет электропроводности воды и снижения амплитуды и крутизны фронта импульса напряжения при работе генератора на нагрузку из проводящей жидкости.

Сравнивая эффективность использования генераторов при рабочих напряжениях в сотни и десятки киловольт (для краткости обозначим U_{100} и U_{10}), мы исходим из равенства потерь энергии до пробоя. Считая, что при U_{100} импульсный пробой промежутка происходит при напряжении, близком к амплитудному, и оценивая $t_{\phi} = 2,3 \frac{L}{R}$ (при включении контура $L-R$ на постоянное напряжение $t_{\phi} = 2,3 \frac{L}{R}$ соответствует $0,9 U_0$, а на границе аperiodичности для контура $R-L-C$ $t_{\phi} = 2 \frac{L}{R}$), равенство потерь энергии до пробоя в приближенной оценке описывается уравнением

$$\frac{t_{100}}{t_{10}} = 2,3 \left(\frac{U_{10}}{U_{100}} \right)^2, \quad (7)$$

где t_{100} и t_{10} — время до пробоя соответственно при напряжениях в сотни и десятки киловольт. В частном случае при $\left(\frac{U_{100}}{U_{10}}\right) = 10$ $t_{\phi} = 2,3 \cdot 10^{-2} t_{10}$. По данным различных авторов, время до пробоя при рабочих напряжениях в десятки киловольт составляет несколько микросекунд. Если допустим, что это время составляет 5 мксек, то из равенства потерь энергии до пробоя следует $t_{100} = 0,1 \cdot 10^{-6}$ сек, то есть время до пробоя при рабочих напряжениях в сотни киловольт не должно превышать десятых долей микросекунды.

Ранее [11] нами было показано, что с достаточной для практического применения точностью выходные параметры волны напряжения могут быть рассчитаны по параметрам генератора и эквивалентному сопротивлению электродной системы, измеренному на высокой частоте. Оценивая сопротивление многоэлектродной системы электродов при использовании в качестве жидкой среды технической среды, можно ожидать величину сопротивления порядка 10^2 ом. Индуктивность разрядного контура, обеспечивающая возможность получения импульса напряжения с длительностью фронта порядка 0,1 мксек на нагрузке в 100 ом, не должна превышать значения

$$L = \frac{t_{\phi} \cdot R}{2,3} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ гн.}$$

Генераторы импульсного напряжения на рабочие напряжения в сотни киловольт в многоступенчатом исполнении обладают индуктивностью разрядного контура $10 \div 50$ мкгн, то есть необходимая длительность фронта при нагрузке в 100 ом подобными генераторами не может быть получена.

Из различных схем получения высоковольтных импульсов с длительностью фронта менее 10^{-7} сек. лучшим является метод обострения при наличии компенсирующей емкости, по величине, сравнимой с емкостью генератора. Схема замещения такого генератора представлена на рис. 2, а где $C_{уд}$ — емкость генератора «в ударе». $C_{об}$ — компенсирующая емкость, P_1 P_2 — разрядники соответственно на выходе генератора и на выходе компенсирующей емкости. Напряжение на обостряющей емкости без учета разрядного сопротивления генератора и сопротивления искры описывается уравнением

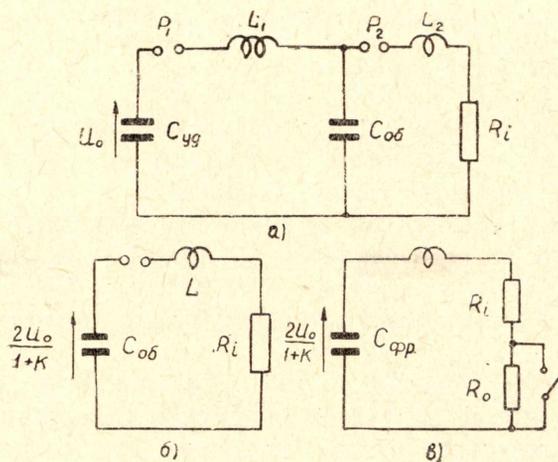


Рис. 2. Расчетная схема замещения генератора.

при наличии компенсирующей емкости, по величине, сравнимой с емкостью генератора. Схема замещения такого генератора представлена на рис. 2, а где $C_{уд}$ — емкость генератора «в ударе». $C_{об}$ — компенсирующая емкость, P_1 P_2 — разрядники соответственно на выходе генератора и на выходе компенсирующей емкости. Напряжение на обостряющей емкости без учета разрядного сопротивления генератора и сопротивления искры описывается уравнением

$$U_c = \frac{U_0}{1+k} (1 - \cos \omega t),$$

где U_0 — суммарное ^{напряжение} напряжение на ступенях генератора,

k — коэффициент, равный отношению $\frac{C_{об}}{C_{уд}}$.

При $t_{\phi} = \frac{\pi}{\omega}$ $U_c = \frac{U_0}{1+k}$. Энергия, запасенная в компенсирующей

емкости, к этому моменту $W_c = \frac{4k}{(1+k)^2} W_0$. В частном случае при

$k = 1$ $U_c = U_0$, $W_c = W_0$, то есть вся запасенная генератором энергия в этот момент сосредоточена в компенсирующей емкости.

Принимаем, что разрядник P_2 срабатывает в момент, когда напряжение на компенсирующей емкости максимальное. Компенсирующая емкость $C_{об}$ даже при $\kappa < 1$, разряжаясь в контуре $L_2 - R$, индуктивность которого значительно меньше, чем индуктивность контура $L_1 - L_2 - R$, обеспечивает значительно большую мощность, чем от разряда емкости генератора, величиной которой для упрощения анализа мы пренебрегаем. Величина компенсирующей емкости должна выбираться из следующих соображений: увеличение компенсирующей емкости ведет к увеличению разрядного тока, но период колебаний при этом увеличивается; с увеличением компенсирующей емкости при неизменной емкости генератора напряжение на компенсирующей емкости к моменту срабатывания разрядника P_2 уменьшается. Оптимальное значение κ может быть выбрано из условия максимальной развиваемой мощности и максимального количества энергии, выделившейся в канале искры за первую четверть периода тока.

$$P_{\max} = \frac{8W_0R}{L} \cdot \frac{\kappa}{(1+\kappa)^2} \exp \left[-2 \frac{\operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1}} \right]. \quad (8)$$

Из условия $\frac{dP_{\max}}{d\kappa} = 0$ получаем

$$\frac{(1 - \kappa + 2\beta\kappa^2)}{(1 + \kappa)} = \frac{\operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1}}. \quad (9)$$

Зависимость максимальной мощности от коэффициента для различных значений β представлена на рис. 3. Решение уравнения оптимальности

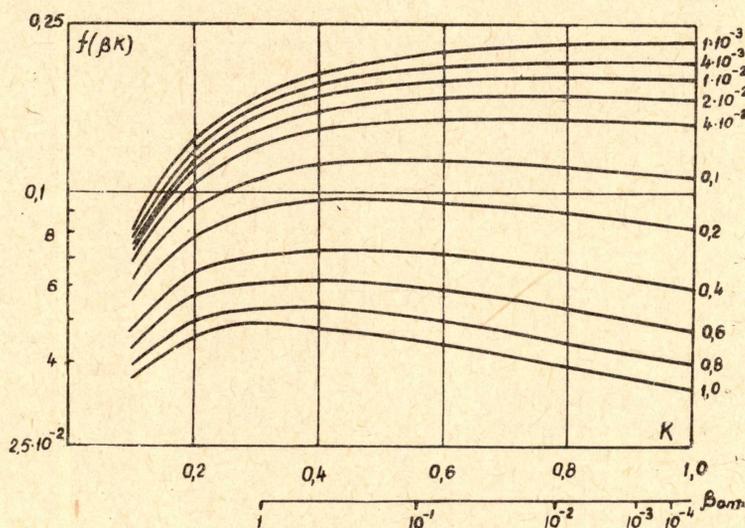


Рис. 3. Номограммы мощности.

коэффициента κ представлено на этом же рисунке второй шкалой. Поскольку величины разрядного контура и сопротивления канала искры для данного электродного устройства являются вполне определенными,

то есть $L, R = \text{const}$ при всех изменениях параметров β и κ , то каждому значению емкости генератора «в ударе», пропорциональной β , соответствует определенное значение компенсирующей емкости, пропорциональной коэффициенту κ . Как и при отсутствии компенсирующей емкости, величина относительной развиваемой мощности во всем диапазоне κ увеличивается с уменьшением емкости генератора. При условии постоянства компенсирующей емкости $\beta\kappa = \text{const}$ падение относительной развиваемой мощности определяется множителем $\frac{\kappa}{(1+\kappa)^2}$. Для обеспечения максимальной мощности с ростом емкости генератора величина компенсирующей емкости должна увеличиваться значительно медленнее, так как относительная величина ее с ростом емкости генератора падает.

Из анализа выражения максимальной мощности (8) и приводимой на рис. 3 номограммы следует:

1) при постоянстве напряжения с ростом запасенной в конденсаторах генератора энергии ($W_0 \equiv C_{уд} \equiv \beta$) развиваемая в канале искры мощность растет значительно медленнее, а ее относительное значение падает:

2) при постоянстве компенсирующей емкости чрезмерное увеличение емкости генератора не ведет к росту развиваемой мощности. Действительно, мощность, развиваемую в канале искры при разряде емкости генератора в контуре L_1-L_2-R , мы не учитываем, а мощность компенсирующей емкости из-за неизменяемости напряжения на компенсирующей емкости практически не растет.

3) при любых изменениях параметра β не имеет смысла брать параметр $\kappa > 1$, так как при $\kappa > 1$ оба множителя в формуле 8 уменьшаются. Максимальное значение величины $\frac{\kappa}{(1+\kappa)^2}$ определяется из условия

$$\frac{d}{d\kappa} \left[\frac{\kappa}{(1+\kappa)^2} \right] = 0 \text{ и при } \kappa = 1 \frac{\kappa}{(1+\kappa)^2} = 0,25.$$

Выше уже указывалось, что оправданный выбор параметров генератора для заданных значений индуктивности разрядного контура и сопротивления канала искры может быть сделан лишь при совместном рассмотрении условий оптимальности по максимальной развиваемой мощности и максимальному количеству выделившейся энергии в первую четверть периода тока. При принятых обозначениях

$$\frac{W^1}{W_0} = 4 \frac{\kappa}{(1+\kappa)^2} \left\{ 1 - (1+4\beta\kappa) \exp \left[-2 \frac{\text{tg}^{-1} \sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1}} \right] \right\}. \quad (10)$$

Представляется возможность выделить границу максимального выделения энергии при оптимальных параметрах β и κ . Из условия

$$\frac{d}{d\beta} \left(\frac{W^1}{W_0} \right) = 0$$

имеем

$$\frac{5\beta\kappa}{1+4\beta\kappa} = \frac{\text{tg}^{-1} \sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1}}, \quad (11)$$

что справедливо при $\kappa = 0,196$. Кривая максимального выделения энергии при оптимальных параметрах β и κ представлена на рис. 2 (кривая 2) и отмечена на номограмме выделения энергии (рис. 4). Соответствующие условию оптимальности параметры представлены на этих рисунках вторыми шкалами.

Поскольку в пределах колебательного разряда, то есть при $\beta < 1$, условия максимальной мощности и максимального выделения энергии за четверть периода колебаний тока не совпадают ни при одном значе-

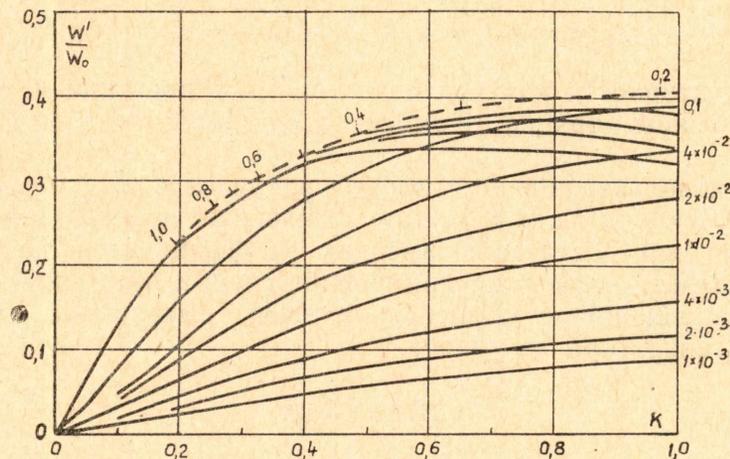


Рис. 4. Номограммы выделения энергии.

нии параметра β , выбор параметров генератора должен определяться энергетическими характеристиками процессов, происходящих при разрядке генератора на нагрузку.

Представленный анализ схемы обострения может быть полностью перенесен на случай, когда обостряющий промежуток P_2 отсутствует, но в качестве жидкой среды используется диэлектрическая жидкость, то есть обостряющая емкость является фронтной, а сопротивление до пробоя очень велико. Срабатывание обостряющего разрядника P_2 для схем 2, а, 2, б, равносильно изменению для схемы 2, в. Наибольший эффект здесь может быть получен, если само электродное устройство обладает значительной емкостью.

Рассматривая вопросы развития мощности и выделения энергии в канале искры при импульсном пробое в жидкости и твердом диэлектрике, нами было сделано два допущения: сопротивление канала искры было принято во всем диапазоне рассматриваемого времени постоянным и равным сопротивлению канала искры в дуговой стадии и не учитывалась энергия, выделяющаяся в канале искры от разряда емкости генератора в контуре.

Можно ожидать, что моменту времени, когда сопротивление канала искры уменьшится до значения $R = 1,118 \sqrt{\frac{L}{C}}$ будет соответствовать предмаксимум мощности. Критерием применимости приведенного расчета при втором допущении является условие

$$\frac{P_{\max}(L_1 - L_2 - R)}{V(L_1 + L_2) C_{\text{уд}}} = 0,05 \frac{P_{\max}(L_2 - R)}{V L_2 C_{\text{об}}}, \quad (12)$$

то есть скорость нарастания мощности от разряда емкости генератора в контуре $L_1 - L_2 - R$ пренебрежительно мала по сравнению с соответствующим значением для контура $L_2 - R$.

Выводы

1. При использовании генераторов импульсных напряжений для генерирования ударных волн в жидкой среде и твердых диэлектриках повышение рабочих напряжений с десятков до сотен киловольт даже при одинаковой запасаемой в конденсаторах энергии обеспечивает достижение более высоких развиваемых мощностей и большего выделения энергии в канале искры.

2. Величина емкости генератора «в ударе» по условию максимального выделения энергии не должна превышать значения $C_{\text{опт}} = 0,8 \frac{L}{R^2}$, что при индуктивности контура в несколько микрогенри и сопротивлении канала искры порядка 10 ом составляет несколько десятков тысяч пикофарад.

3. При использовании импульсных разрядов в воде с рабочими напряжениями в сотни киловольт для уменьшения потерь энергии до пробоя и получения достаточно высоких коэффициентов использования разрядной схемы необходимо применение специальных схем обострения импульса напряжения с компенсирующими емкостями, сравнимыми с емкостью генератора «в ударе».

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. И. Титков и др. Бурение при помощи электрогидравлических разрядов в жидкости, НХ, № 10, 1957.
2. Е. Ф. Эпштейн, Э. П. Арш, Г. К. Виторт. Новые методы разрушения горных пород, Гостехиздат, 1960.
3. Э. И. Арш, Г. К. Виторт. Изв. Днепропетровского горного института, т. 38, Днепропетровск, 1959.
4. Л. А. Юткин. Электрогидравлический эффект, Машгиз, 1955.
5. И. М. Астраханов. Давление на ударной волне при сильном искровом разряде в воде, «Нефть — газ», № 10 стр. 87—92, 1959.
6. Н. J. Mürtz, Hochspannungs — Explosionsverformung, ETZ — В, Н18, 1964.
7. Н. В. Филиппов, В. В. Журич, В. Д. Суляев. Инженерный журнал, 2, 4, 1962.
8. А. И. Лимасов, А. Т. Чепиков. Вольтсекундные характеристики полярных и неполярных жидкостей, Известия СО АН СССР, 8, 1962.
9. W. D. Edwards. Canad. J. Phys., 1951. 29. 310.
10. А. И. Гаврилин, И. И. Каляцкий, А. Г. Синябрюхов. Исследование энергетических характеристик пробоя твердых диэлектриков, Сб. «Пробой диэлектриков и полупроводников», Энергоиздат, 1964.
11. И. И. Каляцкий, А. Ф. Усов. Анализ работы генератора импульсных напряжений на нагрузку из проводящей жидкости. «Пробой диэлектриков и полупроводников», Энергоиздат 1964.