

**К МЕТОДИКЕ ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ ОБОСТРЕНИЯ  
ФРОНТА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

И. И. КАЛЯЦКИЙ, А. Ф. УСОВ

(Представлена научным семинаром кафедры техники высоких напряжений)

За последнее время в различных областях техники широко используются генераторы 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—7].

По данным большинства опубликованных работ, рабочие напряжения генераторов составляют десятки киловольт, а емкости генераторов «в ударе» — единицы и даже десятки микрофард. Необходимость этого вызвана стремлением увеличить запасаемую в конденсаторах энергию, определяющую развиваемую в канале пробоя мощность.

Значительное увеличение мощности в разряде и скорости ее нарастания может быть получено при использовании генераторов импульсного напряжения на сотни киловольт при емкости генераторов в несколько десятков тысяч пикофард. Возможность использования рабочих напряжений в сотни киловольт обусловлена тем, что при временах воздействия импульса напряжения порядка  $10^{-7}$  сек пробивная напряженность даже для крайне неоднородных полей составляет сотни кВ/см [8]. В однородных полях величина  $E_{пр}$  для воды при таких временах воздействия, по данным [9], может составлять даже 2 кВ/см. Однако при оценке возможности применения генераторов с рабочим напряжением в сотни киловольт необходимо учитывать, что в многоступенчатом исполнении такие генераторы обладают паразитной индуктивностью разрядного контура в десятки микрогенри, то есть при использовании в качестве жидкой среды воды или электролита будут иметь место значительные потери энергии.

Зачастую по условиям работы генератор может быть удален от нагрузки на расстояние в десятки и даже сотни метров. И в этом случае будут иметь место значительные потери энергии и низкий коэффициент использования разрядных контура при работе генератора на волновое сопротивление кабеля, величина которого из условия максимальной мощности должна быть по возможности меньше, то есть порядка 50—100 ом.

Проведенный нами ранее анализ [10] показал необходимость применения специальных схем обострения импульса напряжения, лучшей из которых является схема обострения со значительной компенсирующей емкостью [11—12]. Там же нами изложена методика выбора величины

компенсирующей емкости по максимальной развиваемой в канале пробоя мощности и максимальному выделению энергии за первую четверть периода тока.

Ниже излагается методика выбора компенсирующей емкости и волнового сопротивления кабеля по максимальному коэффициенту использования разрядного контура.

Общий коэффициент использования разрядного контура  $\kappa_p$  определяется произведением коэффициента использования контура генератор—компенсирующая емкость  $\kappa_p'$  и коэффициента использования контура компенсирующая емкость—нагрузка  $\kappa_p''$ . Без учета демпферного сопротивления шаровых разрядников генератора  $\kappa_p' = \frac{2}{1 + \kappa}$ , где  $\kappa = \frac{C_{об}}{C_{уд}}$  — коэффициент соотношения компенсирующей емкости и емкости генератора „в ударе“. С достаточной для практического применения точностью  $\kappa_p''$  может быть рассчитан, как для контура  $C_{об} - L_{об} - R_n$ , где  $C_{об}$  — компенсирующая емкость,  $L_{об}$  — паразитная индуктивность контура обострения,  $R_n$  — сопротивление нагрузки или волновое сопротивление кабеля.

При введенном параметре  $\beta = \frac{C_{уд}}{C_{кр}}$  ( $C_{кр} = \frac{4L}{R^2}$  — значение компенсирующей емкости, соответствующее границе аperiodичности) имеем

$$\kappa_p'' = \frac{2}{\sqrt{1 - \frac{1}{\beta\kappa}}} \exp \left[ - \frac{\text{Arth} \sqrt{1 - \frac{1}{\beta\kappa}}}{\sqrt{1 - \frac{1}{\beta\kappa}}} \right] \text{sh} \left( \text{Arth} \sqrt{1 - \frac{1}{\beta\kappa}} \right) \quad (1)$$

при  $\beta\kappa > 1$  и

$$\kappa_p'' = \frac{2}{\sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1}} \exp \left[ \frac{\text{arctg} \sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1}} \right] \sin \left( \text{arctg} \sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1} \right) \quad (2)$$

где  $\beta\kappa < 1$ .

Номограмма коэффициента использования разрядного контура генератора с обострением приведена на рис. 1.

Условие оптимального соотношения параметров  $\beta$  и  $\kappa$  определяется при  $\frac{d\kappa_p}{d\kappa} = 0$ .

$$\frac{\text{Arth} \sqrt{1 - \frac{1}{\beta\kappa}}}{\sqrt{1 - \frac{1}{\beta\kappa}}} = \frac{1 - \kappa + 2\beta\kappa^2}{1 + \kappa} \quad (3)$$

при  $\beta\kappa > 1$  и

$$\frac{\text{arctg} \sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta\kappa} - 1}} = \frac{1 - \kappa + 2\beta\kappa^2}{1 + \kappa} \quad (4)$$

при  $\beta\kappa < 1$ .

Решение уравнений (3) и (4) представлено на рис. 1 второй шкалой. Выбор величины компенсирующей емкости производится из условия оптимальности по заданным значениям емкости генератора и нагрузки и по минимальной индуктивности контура обострения, достижимой при дан-

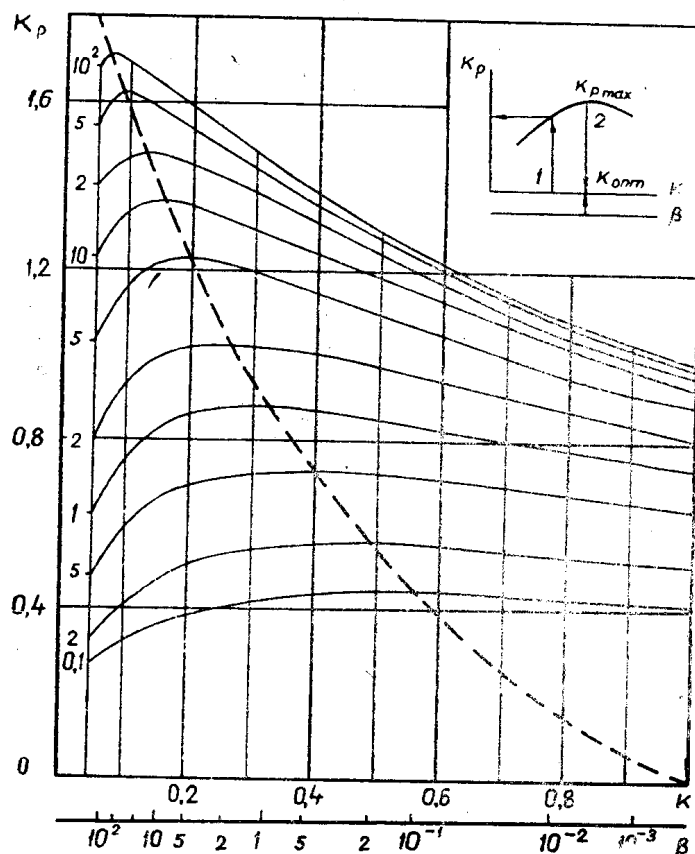


Рис. 1. Номограмма коэффициента использования разрядного контура в схеме обострения.

ном способе монтажа компенсирующей емкости, обостряющего разрядника и нагрузки или кабеля.

В исходных данных для построения номограмм мы не учитывали демпферное сопротивление шаровых разрядников генератора, а  $\kappa_p$  мы определяли без учета паразитной емкости монтажа. Экспериментальная проверка полученных закономерностей произведена на генераторе в 0,00625 мкф с номинальным напряжением в 400 кВ. Результаты экспериментального определения оптимального режима обострения приведены на рис. 2. Неучет демпферного сопротивления вызывает заметное несоответствие опытного (кривая 2) и расчетного (кривая 1) значений  $\kappa_p$  только при малых значениях компенсирующей емкости. Погрешность в определении  $\kappa_p$  не превышает 5%. Оба эти фактора вызывают смещение оптимального режима в сторону больших  $\kappa$ . Если параметры контура позволяют получать коэффициент использования выше, чем это необходимо для данного межэлектродного промежутка, имеет смысл брать более завышенное значение параметра  $\kappa$ , чем это необходимо из условия оптимальности по коэффициенту использования разрядного контура, так как более высоким значениям  $\kappa$  соответствует большая доля запасенной

в компенсирующей емкости энергии к моменту срабатывания обостряющего разрядника. К.п.д. перезаряда —  $\eta = \frac{4\kappa}{(1+\kappa)^2}$ , т. е. уже при  $\kappa = 0,5$

практически вся запасенная генератором энергия к моменту срабатывания обостряющего разрядника сосредоточена в компенсирующей емкости. Зависимость к.п.д. перезаряда от соотношения емкостей представлена в табл. 1.

Таблица 1

| $\kappa$ | 0,1  | 0,2   | 0,3  | 0,4   | 0,5  | 0,6   | 0,7  | 0,8   | 0,9   | 1 |
|----------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|---|
| $\eta$   | 0,33 | 0,555 | 0,71 | 0,817 | 0,89 | 0,938 | 0,97 | 0,988 | 0,997 | 1 |

Выше уже указывалось, что обычные генераторы многоступенчатого исполнения на сотни киловольт обладают индуктивностью разрядного контура в десятки микрогенри. Для схемы обострения вполне достижимо ограничение индуктивности контура величиной 2—2,5 мкГн. Поэтому даже при  $\kappa$ , меньшем 1, развиваемая мощность в контуре обострения превосходит соответствующее значение для контура генератор — нагрузка при отсутствии обострения.

Из-за специфичности процессов, происходящих при импульсном разряде в жидкой среде или твердом диэлектрике, иногда требуется удаление источника напряжения на значительные расстояния. Представляло интерес рассмотреть вопрос об условиях работы генератора при канализации энергии через кабель. Независимо от сопротивления нагрузки в конце кабеля  $\kappa_p$  для начала кабеля определяется разрядом генератора на волновое сопротивление кабеля, которое, как уже указывалось выше, может иметь величину порядка 50—100 ом. Понятно, что использование генераторов с рабочими напряжениями в сотни киловольт без применения схемы обострения связано с большими потерями энергии и низким к.п.д. Если в форме волны не предъявляются жестких требований, то  $\kappa$  в начале кабеля может быть значительно повышен включением на вход кабеля фронтной емкости. Соотношение  $\kappa_p$  в начале и конце кабеля строго подчиняется зависимости.

$$U_2 = \alpha U_1,$$

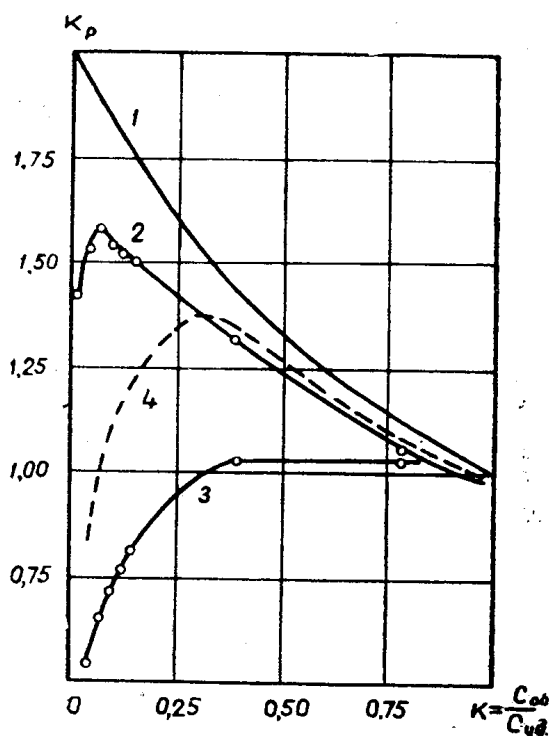


Рис. 2. Экспериментальное определение оптимального значения: 1 — без учета  $R_i$  (расчет), 2 —  $\kappa_p$  с учетом  $R_i$  (экспериментально), 3 —  $\kappa_p''$  для контура обострения ( $k_n = 175$  ом), 4  $\kappa_p = \kappa_p \times \kappa_p''$  — общий коэффициент использования разрядного контура

где  $U_2$  — напряжение на нагрузке,  
 $U_1$  — напряжение на входе кабеля,

$\alpha$  — коэффициент отражения,  $\alpha = \frac{2R_n}{R_n + z_B}$ ,

$R_n$  — сопротивление нагрузки,  
 $z_B$  — волновое сопротивление кабеля.

Для случая диэлектрических жидкостей  $\alpha=2$ .

Если сопротивление нагрузки, даже при использовании технической воды и электролитов, в 2—3 раза превышает волновое сопротивление кабеля, то переход от диэлектрических жидкостей к технической воде вызывает уменьшение  $\alpha$  менее чем в 1,5 раза. Это особенно важно, если технологический процесс связан с большими утечками жидкой среды или если жидкая среда подвергается химическому воздействию и возникает необходимость в постоянной очистке ее. Если параметры контура обострения позволяют получить достаточно высокий коэффициент использования, то допустимая степень химической загрязненности жидкой среды может быть повышена уменьшением волнового сопротивления кабеля. Полученные зависимости при анализе контура с обострением могут быть использованы и при выборе оптимальных соотношений между сопротивлением нагрузки и волновым сопротивлением кабеля. Действительно, если  $\beta$  понимать как отношение

$$\frac{C_{уд}}{C_{кр}} \left| C_{кр} = \frac{4L}{R_n^2} \right|, \text{ а } \kappa$$

понимать как

$$\gamma = \frac{z_B}{R_n}, \text{ то}$$

$$\alpha = \frac{2R_n}{z_B + R_n} = \frac{2}{1 + \gamma},$$

а исходные формулы для определения оптимальных соотношений  $R_n$  и  $z_B$  подобны рассмотренным ранее для контура с обострением.

Коэффициент использования разрядного контура генератор — кабель — нагрузка:

$$\kappa_p = \frac{2}{1 + \gamma} \cdot \frac{2}{\sqrt{1 - \frac{1}{\beta\gamma^2}}} \exp \left[ -\frac{\text{Arth} \sqrt{1 - \frac{1}{\beta\gamma^2}}}{\sqrt{1 - \frac{1}{\beta\gamma^2}}} \right] \times$$

$$\times \text{sh} \left( \text{Arth} \sqrt{1 - \frac{1}{\beta\gamma^2}} \right) \quad (5)$$

при  $\beta\gamma^2 > 1$  и

$$\kappa_p = \frac{2}{1 + \gamma} \cdot \frac{2}{\sqrt{\frac{1}{\beta\gamma^2} - 1}} \exp \left[ -\frac{\text{arctg} \sqrt{\frac{1}{\beta\gamma^2} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta\gamma^2} - 1}} \right] \times$$

$$\times \sin \left( \text{arctg} \sqrt{\frac{1}{\beta\gamma^2} - 1} \right) \quad (6)$$

при  $\beta\gamma^2 < 1$ .

Условие оптимального соотношения параметров  $\beta$  и  $\gamma$  определяется при  $\frac{d\kappa_p}{d\gamma} = 0$ .

$$\frac{\operatorname{Arth} \sqrt{1 - \frac{1}{\beta\gamma^2}}}{\sqrt{1 - \frac{1}{\beta\gamma^2}}} = \frac{1 + \beta\gamma^3}{1 + \gamma} \quad (7)$$

при  $\beta\gamma^2 > 1$  и

$$\frac{\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\beta\gamma^2} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta\gamma^2} - 1}} = \frac{1 + \beta\gamma^3}{1 + \gamma} \quad \text{при } \beta\gamma^2 < 1. \quad (8)$$

Номограмма коэффициента использования и решение уравнений оптимального соотношения параметров  $\beta$  и  $\alpha$  представлены на рис. 3.

Решение условия оптимальности в схеме обострения при наличии волнового сопротивления кабеля предполагает два случая:

1) выбор величины компенсирующей емкости для данных  $\beta$  и  $\gamma$ , т. е. генератор и нагрузка заданы, а волновое сопротивление выбрано произвольно;

2) выбор величины волнового сопротивления кабеля для заданных  $\beta$  и  $\kappa$ , т. е. генератор и нагрузка заданы, а величина компенсирующей емкости выбрана произвольно.

Для первого случая решение получается из условия  $\frac{d\kappa_p}{d\kappa} = 0$ , т. е. при  $\beta\gamma^2\kappa > 1$

$$\frac{\operatorname{Arth} \sqrt{1 - \frac{1}{\beta\gamma^2\kappa}}}{\sqrt{1 - \frac{1}{\beta\gamma^2\kappa}}} =$$

$$= \frac{1 - \kappa + 2\beta\gamma^2\kappa^2}{1 + \kappa} \quad (9)$$

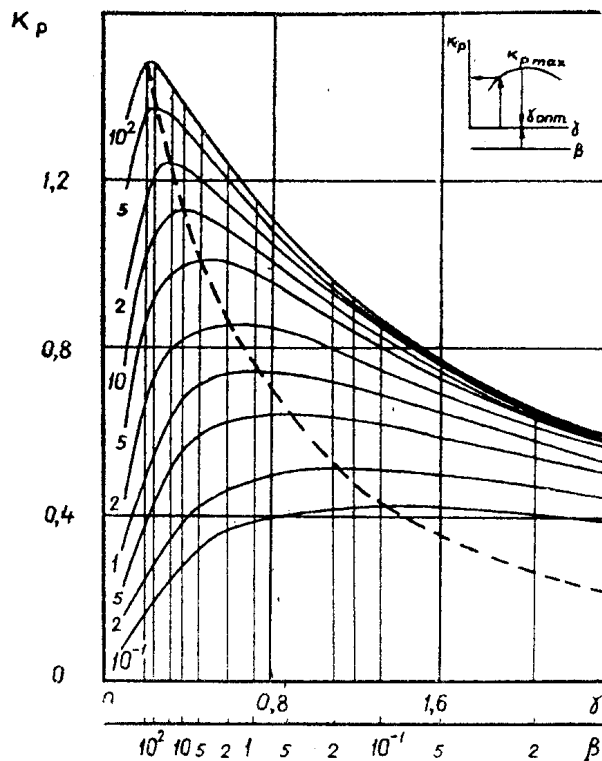


Рис. 3. Номограмма коэффициента использования разрядного контура генератор — кабель — нагрузка.

и при  $\beta\gamma\kappa < 1$

$$\frac{\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\beta\gamma^2\kappa} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta\gamma^2\kappa} - 1}} = \frac{1 - \kappa + 2\beta\gamma^2\kappa^2}{1 + \kappa} \quad (10)$$

Для второго случая решение получается из условия  $\frac{d\kappa_p}{d\gamma} = 0$ , т. е. при  $\beta\gamma^2\kappa > 1$

$$\frac{\operatorname{Arth} \sqrt{1 - \frac{1}{\beta\gamma^2\kappa}}}{\sqrt{1 - \frac{1}{\beta\gamma^2\kappa}}} = \frac{1 + \beta\gamma^3\kappa}{1 + \gamma} \quad (11)$$

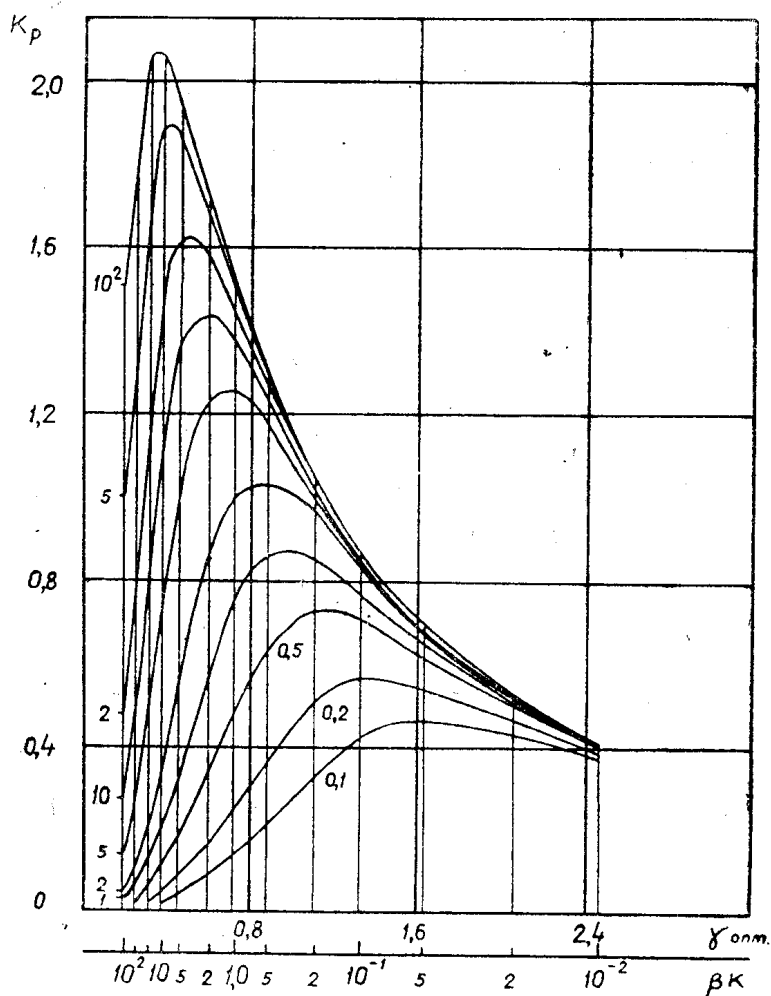


Рис. 4. Номограмма коэффициента использования разрядного контура в схеме обострения при произвольном выборе величины волнового сопротивления кабеля.

и при  $\beta\gamma^2\kappa < 1$

$$\frac{\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\beta\gamma^2\kappa} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\beta\gamma^2\kappa} - 1}} = \frac{1 + \beta\gamma^3\kappa}{1 + \gamma} \quad (12)$$

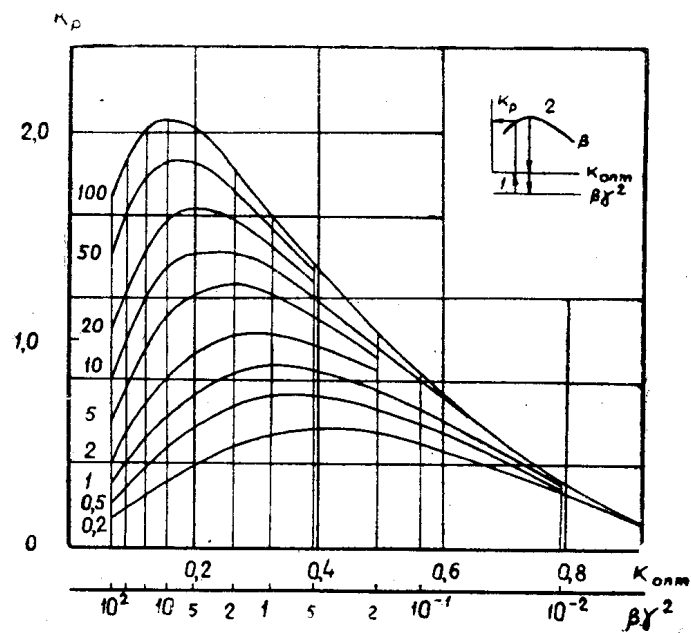


Рис. 5. Номограмма коэффициента использования разрядного контура в схеме обострения с кабелем при произвольном выборе величины компенсирующей емкости.

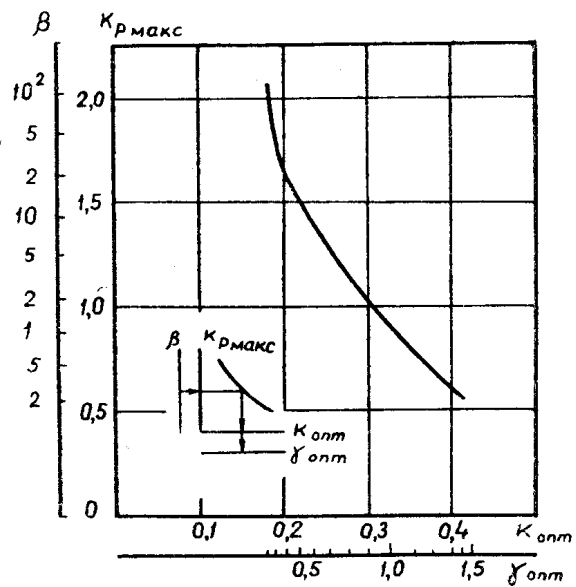


Рис. 6. К методике выбора оптимальных соотношений параметров в схеме обострения с кабелем.



Соответствующие номограммы представлены на рис. 4 и 5.

Совместное решение уравнений 9, 10, 11 и 12 и схема выбора оптимальных параметров  $k$  и  $\gamma$  представлены на рис. 6. По заданному значению  $\beta$  определяются  $k_{\text{опт}}$ ,  $\gamma_{\text{опт}}$  и максимально достижимый при данном  $\beta$  коэффициент использования разрядного контура.

Использование полученных оптимальных соотношений при выборе параметров отдельных элементов схемы электроимпульсных установок является важнейшим резервом повышения их технико-экономических показателей.

#### 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. Гостоптехиздат, 1950.
3. Э. И. Арш, Г. К. Виторт. Изв. Днепропетровского горного института, т. 38, Днепропетровск, 1960.
4. Л. А. Юткин. Электрогидравлический эффект. Машгиз, 1955.
5. И. М. Астраханов. Деление на ударной волне при сильном искровом разряде в воде. Нефть — газ, № 10, стр. 87—92, 1959.
6. H—J. Mürtz, Hochspannungs — Vezformung, ETZ — В, H18, 1964.
7. Н. Б. Филиппов, В. В. Журин, В. Д. Сулаев. 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., 29, 310, 1951.
10. А. Ф. Усов. Об особенностях использования импульсного пробоя при сверхвысоких напряжениях. Изв. ТПИ, т. 139, 1965.
11. Г. А. Месяц. Авторское свидетельство № 15661 с приоритетом от 19 июня 1962.
12. Г. А. Месяц, В. В. Кремнев. Увеличение крутизны фронта высоковольтного импульса, получаемого от генератора импульсного напряжения. Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, № 2, 1963.