

**АНАЛИЗ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА
С ОБОСТРЕНИЕМ ФРОНТА
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ
НА СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОДОВ В ВОДЕ**

В. Я. СИМОНОВ, А. Ф. УСОВ, В. Я. УШАКОВ, А. Т. ЧЕПИКОВ

(Представлена научным семинаром НИИ высоких напряжений)

Введение

Использование генераторов импульсного напряжения — ГИН — для генерирования ударных волн в жидкости с целью полезного использования их энергии имеет ряд особенностей. В качестве источника импульсного напряжения в сотни киловольт используются собранные по схеме умножения Аркадьева-Маркса генераторы с емкостью в разряде не более нескольких десятков тысяч пикофарад. Нагрузкой генератора является жидкостный промежуток, сопротивление которого при использовании в качестве жидкой среды технической воды может не превышать нескольких десятков ом. При работе генератора имеют место значительные непроизводительные потери энергии за счет растекания импульсных токов в объеме жидкости в предпробивное время, вследствие чего коэффициент использования разрядного контура значительно меньше 1 [1].

Для устранения этих нежелательных явлений в [2] было предложено использовать принцип обострения фронта высоковольтных импульсов [3] и разработана методика выбора элементов схемы [4]. Не исключая возможности использования в качестве обостряющей емкости серийно выпускаемых отечественной промышленностью импульсных конденсаторов, в разработанной методике отдавалось предпочтение малоиндуктивным конденсаторам специальных конструкций.

В настоящей работе рассматриваются результаты экспериментальных исследований работы генератора с обострением фронта высоковольтных импульсов на импульсных конденсаторах типа ИМ 0,022/100 и дается анализ полученных результатов.

Методика эксперимента

В работе был использован генератор импульсных напряжений, собранный по схеме умножения Аркадьева-Маркса на конденсаторах КБГП. Отключением или закорачиванием части конденсаторов емкость генератора в разряде изменялась в пределах от 0,025 до 0,0625 мкф. Номинальное напряжение генератора составляло 400 кв. Обостряющая емкость в 0,0055 мкф была набрана из четырех импульсных конденсаторов ИМ 0,022 мкф/100 кв. В качестве обостряющего промежутка был использован шаровой разрядник с

диаметром электродов 125 мм. Форма импульсов напряжения регистрировалась осциллографом ОК-19М. Нагрузкой генератора служили электродные системы типа параллельных пластин, параллельных и соосных цилиндров и несимметричные системы типа стержень — плоскость, шар — плоскость.

В работе была использована разработанная в [1] методика анализа работы генератора на нагрузку из проводящей жидкости по коэффициенту снижения амплитуды и крутизны фронта импульса.

$$k_{\text{сп}} = \frac{U_{\text{хх}} - U_{\text{а}}}{U_{\text{хх}}} \cdot 100\%.$$

где $U_{\text{хх}}$ — амплитуда импульса при отключенной нагрузке (холостой ход),

$U_{\text{а}}$ — амплитуда импульса на подключенном электродном устройстве.

Для анализа экспериментально полученных зависимостей производился расчет параметров волны напряжения на нагрузке по ее низковольтному сопротивлению с использованием расчетных номограмм выходных параметров импульса. Для измерения сопротивления нагрузки и удельного сопротивления водопроводной воды использовалась мостовая схема Кольрауша с сосудом с платинированными электродами и источником переменного напряжения звуковой частоты — 3Г.

Результаты экспериментальных исследований

В работе были проведены исследования зависимости снижения напряжения от параметров генератора (амплитуда импульса и емкость в разряде) и параметров нагрузки (межэлектродное расстояние, поверхность растекания импульсных токов и электропроводность среды).

В результате экспериментальных исследований было показано, что коэффициент снижения амплитуды импульса не зависит от количества запасенной в генераторе энергии при изменении ее за счет изменения разрядной емкости или рабочего напряжения генератора. В электродной системе типа параллельных стержней с цилиндрическими наконечниками (диаметр 20 мм, высота 30 мм, длина рабочего промежутка 30 мм) коэффициент снижения $k_{\text{сп}}$ в диапазоне изменения рабочего напряжения генератора от 100 до 350 кВ и генерирующей емкости от 0,025 до 0,0625 мкФ оставался постоянным и равным 17—20 проц.

В табл. 1 приведены данные о зависимости коэффициента снижения амплитуды напряжения от величины межэлектродного расстояния. Как видно из табл. 1, изменение последнего от 10 до 60 мм не приводит к заметному изменению коэффициента снижения.

Таблица 1

S_0 , мм	10	20	30	40	50	60
R, ом	175	180	182,5	183	183	183
k_p	0,84	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88
$k_{\text{сп}}$	22%	20%	20%	20%	20%	20%

Приведенные данные получены для электродной системы типа сплошных соосных цилиндров (диаметр 20 мм, длина 30 мм).

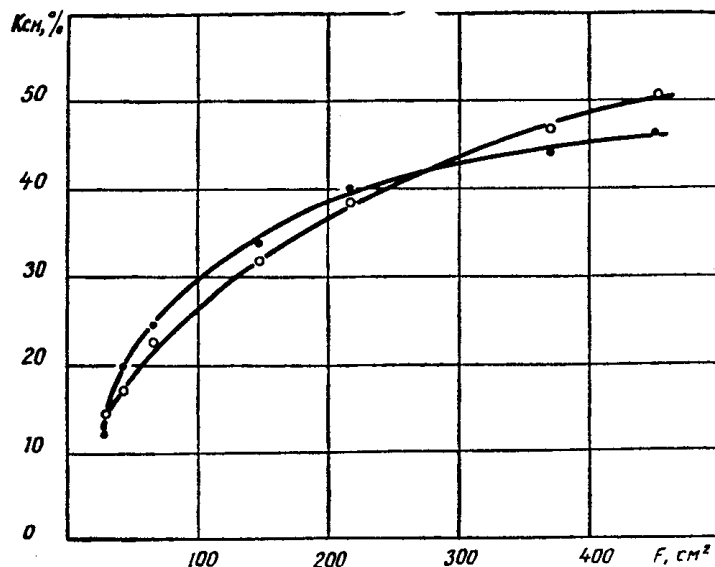


Рис. 1. Зависимость коэффициента снижения амплитуды напряжения от площади электрода:
 ● — экспериментальные данные,
 ○ — расчетные данные ($C_{уд} = 5,5 \cdot 10^{-9}$ ф,
 $L = 15 \cdot 10^{-6}$ гн)

Как показали исследования, существенное влияние на коэффициент снижения амплитуды напряжения оказывают лишь поверхность растекания импульсных токов и электропроводность среды.

На рис. 1 приведена зависимость коэффициента снижения от площади соприкасающейся с электропроводящей средой поверхности электродов. При изменении последней от 13 до 450 см² $k_{сн}$ увеличивается от 10 до 50 проц. Следует заметить, что в случае симметричных электродов снижение амплитуды напряжения при постоянной площади неизолированной поверхности электродов не зависит от геометрии пластинчатых электродов. Приведенные на рис. 1 точки 1—5 соответствуют случаю изменения поверхности электродов увеличением их длины, точки 5—7 — увеличением высоты электродов при постоянной длине их. Как видно из графика, в кривой $k_{сн} = f(F)$ не обнаруживается переломов и изгибов. Параметры электродных систем приведены в табл. 2.

Таблица 2

F, см ²	27	41	65	145	215	369	450
h, см	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	5,0	6,0
l, см	3	5	10	20	30	30	30
R, ом	189	170	131	93	77	54	46,5

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента снижения от удельного сопротивления жидкости — ρ . Изменение ρ воды от $5,1 \cdot 10^4$ до $8 \cdot 10^4$ ом·см сопровождается уменьшением коэффициента снижения от 88 проц. практически до нуля. Приведенные данные указывают на целесообразность применения способов увеличения удельного сопротивления воды при использовании ее в качестве жидкой среды в процессах электронно-ионной технологии.

Анализ результатов исследования

В [1] было показано, что с достаточной для практического применения точностью параметры волны напряжения на нагрузке из электропроводящей жидкости могут быть рассчитаны по низковольтному сопротивлению нагрузки. Введенный для оценки условий работы генератора коэффициент снижения амплитуды импульса связан с коэффициентом использования разрядного контура соотношением

$$k_{сн} = \frac{k_{рхх} - k_{рн}}{k_{рхх}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $k_{рхх}$ и $k_{рн}$ — коэффициенты использования разрядного контура соответственно при отключенной (холостой ход) и подключенной нагрузке.

На рис. 3 представлена схема замещения генератора с обострением фронта высоковольтных импульсов. Расчет переходного процесса относительно напряжения на нагрузке для данной полной схемы замещения достаточно сложен и, что самое главное, при имеющихся соот-

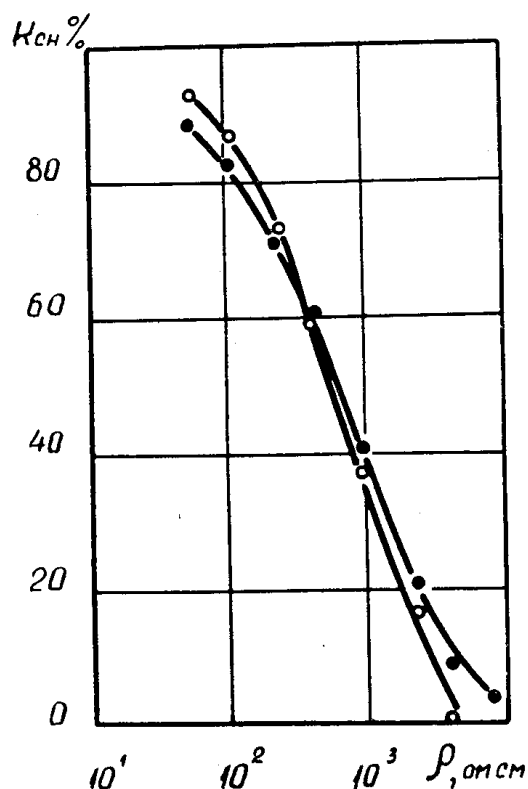


Рис. 2. Зависимость коэффициента снижения амплитуды напряжения от удельного сопротивления воды:

- — экспериментальные данные,
- — расчетные данные

ношениях параметров первичного и вторичного контуров не дает заметного увеличения точности в сравнении с упрощенными схемами замещения. Особенностью данной схемы является то, что после срабатывания обостряющего разрядника происходит одновременный разряд обостряющей емкости на нагрузку и на генерирующую емкость. В [4] пренебрегается последним и коэффициент использования разрядного контура генератора определяется как $k_p = k'_p \cdot k_{р0}$, где k'_p и

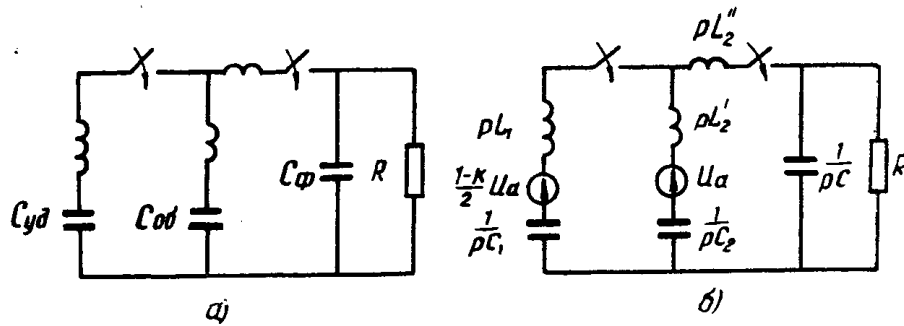


Рис. 3. Схема замещения разрядного контура генератора с обострением фронта импульса (а) и ее операторное изображение по Карсону (б)

k_{po} соответственно коэффициент перезаряда емкостей первичного контура и коэффициент использования контура обострения. Поскольку k'_p определяется лишь соотношением генерирующей и обостряющей емкостей и не зависит от нагрузки, то формула (2) может быть переписана через коэффициенты использования контура обострения при холостом ходе и при подключенной нагрузке.

Коэффициенты использования разрядного контура на холостом ходу и при подключенной нагрузке отсчитываются относительно напряжения на обостряющей емкости в момент срабатывания обостряющего разрядника U_a . При расчетной обработке данных по результатам обработки осциллограмм напряжения холостого хода было принято $k_{pхх} = 1,1$. Коэффициент использования контура обострения определялся с использованием расчетных номограмм выходных параметров импульса напряжения.

Разряд обостряющей емкости на генератор может быть учтен введением поправочного коэффициента, для оценки величины которого предлагается следующая методика. На рис. 3, б дана схема замещения генератора к моменту срабатывания обостряющего промежутка, причем за исходное напряжение взято напряжение в этот момент времени на обостряющей емкости $U_c = U_a$. Поправочный коэффициент Δk_p определяется из расчета уменьшения напряжения на обостряющей емкости ΔU_{c_2} при разряде ее на генерирующую емкость, полагая, что среднее значение напряжения обостряющей емкости в промежутке времени $0 \leq t \leq t_\phi$ $U_{c_2} = \frac{1 + k_p}{2} U_a$. В результате расчета имеем

$$\Delta k_p = \frac{\Delta U_{c_2}}{U_a} = \frac{(k + k_p)k}{2(1 + k)} \cdot (1 - \cos \omega t_\phi), \quad (3)$$

где k — коэффициент соотношения емкостей, $k = \frac{C_2}{C_1}$;

ω — угловая частота первичного контура, $\omega = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{(L_1 + L_2)C_1C_2}}$,

k_p , t_ϕ — соответственно коэффициент использования и длительность фронта импульса в контуре обострения.

Численное значение Δk_p , определенное по формуле (3), для условий, соответствующих экспериментальной зависимости $k_{сн} = f(C_{уд})$, не превышает 0,025 при $C_{уд} = 0,025$ мкф и 0,01 при $C_{уд} = 0,0625$ мкф, т. е. измеримо с точностью обработки экспериментальных данных. Это дает возможность при расчете параметров импульса на нагрузке не счи-

таться с обратным перезарядом емкостей и вести расчет по упрощенным схемам замещения. Расчетные значения $k_{сн}$ для зависимости $k_{сн} = f(C_{уд})$ соответствуют экспериментальным данным. В расчете было положено: $L_{об} = 15 \cdot 10^{-6}$ гн, $C_{об} = 5,5 \cdot 10^{-9}$ ф, $R_H = 145$ ом и получено $k_p = 0,88$, $k_{сн} = 20\%$.

Зависимости коэффициента снижения амплитуды напряжения от межэлектродного расстояния, напряжения и удельного сопротивления воды аналогичны полученным ранее для системы стержень — плоскость, что указывает на общность условий работы генератора на различные типы электродных устройств. Параметры волны напряжения на электродном устройстве определяются не типом электродной системы и специфичностью условий ее использования, а параметрами разрядного контура генератора. В этом смысле электродные системы различаются лишь величиной сопротивления и емкости нагрузки, зависящими не только от геометрии систем, но и от диэлектрических свойств среды (диэлектрическая проницаемость и удельное сопротивление раствора).

Коэффициенты использования разрядного контура k_p и снижения амплитуды напряжения $k_{сн}$ изменяются в соответствии с изменением сопротивления нагрузки. Малому изменению R с увеличением межэлектродного промежутка (табл. 1) соответствует практическое постоянство $k_{сн}$. Значительное уменьшение сопротивления нагрузки при увеличении площади электродов (табл. 2) и уменьшении удельного сопротивления жидкой среды (рис. 1) является причиной существенного роста $k_{сн}$.

Как показывают расчеты, снижением амплитуды напряжения можно пренебречь, если довести сопротивление электродной системы в воде до 500 ом. Указанный порядок величины сопротивления имеют двухэлектродные системы даже при использовании технической воды с удельным сопротивлением $3 \cdot 10^3$ ом·см. В многоэлектродных системах эти величины сопротивлений нагрузки могут быть получены лишь при использовании воды с повышенным удельным сопротивлением.

Выводы

1. Условия работы генератора импульсного напряжения на нагрузку из электропроводящей жидкости определяются не типом электродной системы и специфичностью условий ее применения, а параметрами нагрузки как элемента разрядного контура. Однотипные зависимости в различных электродных системах имеют один и тот же характер.

2. Значительная зависимость коэффициента снижения обнаруживается лишь от площади электродов и от удельного сопротивления жидкой среды. В соответствии с этим существенное увеличение сопротивления нагрузки может быть достигнуто лишь сокращением поверхности электродов и использованием в качестве жидкой среды жидкостей со значительным удельным сопротивлением. С точки зрения возможности получения волны напряжения с требуемыми параметрами достаточно довести удельное сопротивление среды до значений $5 \cdot 10^4 - 10^5$ ом·см. Дальнейшее повышение ρ вряд ли экономически целесообразно.

3. В работе решен ряд схемных вопросов, в частности, разработана методика расчета параметров волны напряжения на нагрузке в схеме обострения фронта высоковольтных импульсов с учетом обратного перезаряда емкостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **И. И. Каляцкий, А. Ф. Усов.** Пробой диэлектриков и полупроводников. Сб. докладов на IV Межвузовской конференции по пробое диэлектриков и полупроводников, «Энергия», М.-Л., 1964.
2. **А. Ф. Усов.** Изв. ТПИ, т. 139, стр. 88—96, 1965.
3. **Г. А. Месяц.** Авторское свидетельство № 156616 от 19 июня 1962.
4. **А. Ф. Усов.** Изв. ТПИ, т. 152, стр. 24—31, 1966.