

К МЕТОДОЛОГИИ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ВОЛН, ВОСПРОИЗВОДЯЩИХ КОММУТАЦИОННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИЗОЛЯЦИЮ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМ

А. А. ВОРОВЬЕВ, И. И. КАЛЯЦКИЙ, В. Ф. ПАНИН

Две характерные особенности развития современной энергетики: прогресс в области грозозащиты и переход к сверхвысоковольтным линиям электропередачи — обусловили значительное повышение роли коммутационных перенапряжений в установлении уровней изоляции высоковольтных систем. Значительная часть исследований, связанных с условиями работы изоляции при воздействии коммутационных перенапряжений, направлена на установление форм и уровней импульсных напряжений, которые бы равноценно воспроизводили эти воздействия на изоляцию.

Вследствие многообразия условий, в которых работает изоляция, и зависимости электрической прочности изолирующих сред от формы напряжения необходим комплексный подход к установлению форм испытательных импульсных напряжений, учитывающий степень опасности для изоляции данной формы волны и вероятность ее появления. Подобный подход должен обеспечить наиболее экономичные уровни изоляции с гарантированной надежностью ее работы.

Очевидно, что преимущества такого комплексного подхода к решению вопроса будут реализованы лишь при достаточно полных сведениях о распределении по вероятностям форм и кратностей коммутационных перенапряжений, а также сведениях о прочности современных изолирующих сред при воздействиях коммутационного характера.

На основе измерений на моделях, а также регистрацией перенапряжений непосредственно в системах накоплен некоторый материал по кратностям и формам коммутационных перенапряжений, требующий, однако, дальнейшего расширения и статистической обработки.

Большинство исследований поведения изоляции при коммутационных перенапряжениях направлено на установление воздействий, при которых условия работы изоляции наиболее тяжелы. Несмотря на успехи в установлении форм, опасных для линейной изоляции импульсных напряжений, которые могут иметь место в сверхвысоковольтных системах [1, 2], в настоящее время не выработана последовательная методология в определении форм наиболее опасных импульсных воздействий. Чаще всего за основной критерией прочности принимают продолжительность приложения напряжения некоторой

амплитуды, т. е. длительность волны и реже — длительность фронта ее.

Иллюстрацией такого подхода служит, например, рис. 1,а, где изображена волна перенапряжения, возникающая при отключении емкостной нагрузки. Согласно [3], указанной волне по воздействию на изоляцию адекватна полуволна 50 $\mu\text{с}$, имеющая равную амплитуду и тот же порядок длительности. Между тем, анализ современных представлений о характере предразрядных процессов в диэлектриках

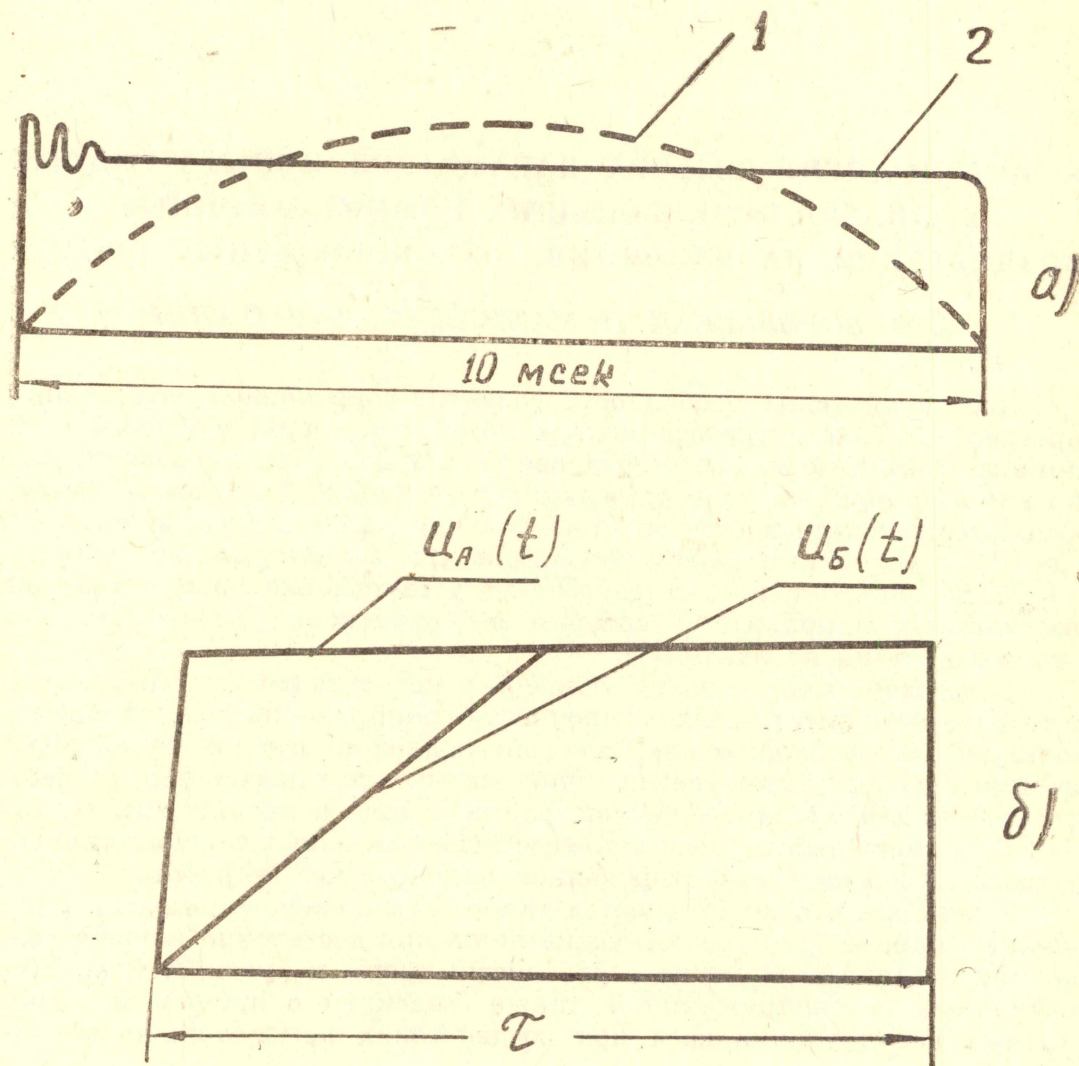


Рис. 1. К критерию выбора формы испытательной волны. 1,а — полуволна 50 $\mu\text{с}$; 2,а — волна перенапряжения при отключении емкостной нагрузки без повторных зажиганий в выключателе, по [3].

и, главным образом, анализ результатов непосредственных измерений электрической прочности различных изолирующих сред позволили сделать следующий вывод: наряду с амплитудой и длительностью приложенного напряжения одним из основных факторов, влияющих на прочность изоляции, следует рассматривать скорость нарастания напряжения на междуэлектродном промежутке. Другими словами, если на изоляционный промежуток подать поочередно два им-

пульса одинаковой амплитуды, длительности и полярности, но с разной скоростью нарастания напряжения: $U_A(t)$ и $U_B(t)$, (рис. 1,б) то, во-первых, эффект воздействия напряжения на промежуток в обоих случаях будет различным и, во-вторых, необязательно, что импульс $U_B(t)$ менее опасен для изоляции, нежели $U_A(t)$ — несмотря на то, что импульсы воздействия связаны условием:

$$\int_0^{\tau} U_A(t) dt > \int_0^{\tau} U_B(t) dt. \quad (1)$$

Действительно, при рассмотрении зависимостей прочности воздуха и некоторых твердых диэлектриков от крутизны воздействующего импульса по данным [4÷9] можно отметить следующую закономерность: при некоторой крутизне воздействующего напряжения, назовем ее критической, диэлектрик имеет минимум среднего разрядного или 50-процентного напряжения.

Для положительной полярности электрода большей кривизны наличие минимума проявляется более определенно, чем для отрицательной полярности. При крутизнах импульса в области критической крутизны наблюдается увеличение разброса величин электрической прочности. Для воздуха, по [1, 2], стандартное отклонение разрядного напряжения при крутизне, близкой к критической, в 3÷4 раза больше, чем при напряжении 50 гц и стандартных импульсах.

Таблица 1

ЗНАЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ КРУТИЗНЫ ДЛЯ ВОЗДУШНОЙ
ИЗОЛЯЦИИ (кв/мксек)

Длина промежутка (м)	Электродная система и полярность напряжения											
	С—С		С—П		ПР—ПР		ГИ, СТ. И		С—П		СТ, И	
	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—	+	—
0,2÷0,5				10÷12							6	нет
0,9										10	нет	
1	7,35	13,2	4	11	8,9	нет			4		9	нет
1,2										12	нет	
1,5	6	14,5		14								
2	10,5	15,3	5,2		9,6	нет	11	16	4,7			
2,5	12,7	15,7					8,5÷10	10÷17				
3	10,8		5,5				11,6	20	6			
4			5,2					17	5,35			
5			4,45					16	4			
6			3,32									
Автор	[Л4]				[Л5]				[Л6]			
									[Л7]			

Примечание. С — стержень, П — плоскость, Г. И. — гирлянда изоляторов, СТ. И — стержневые изоляторы, ПР — провод.

На рис. 2 представлены зависимости разрядных напряжений от крутизны a положительного импульса для длинных воздушных промежутков «стержень-плоскость», по данным [5]. Из рис. 2 видно, что в отношении электрической прочности промежутки длиной $1 \div 6$ м могут характеризоваться некоторой крутизной a_B , при которой разрядное напряжение их минимально. В табл. 1 представлены значе-

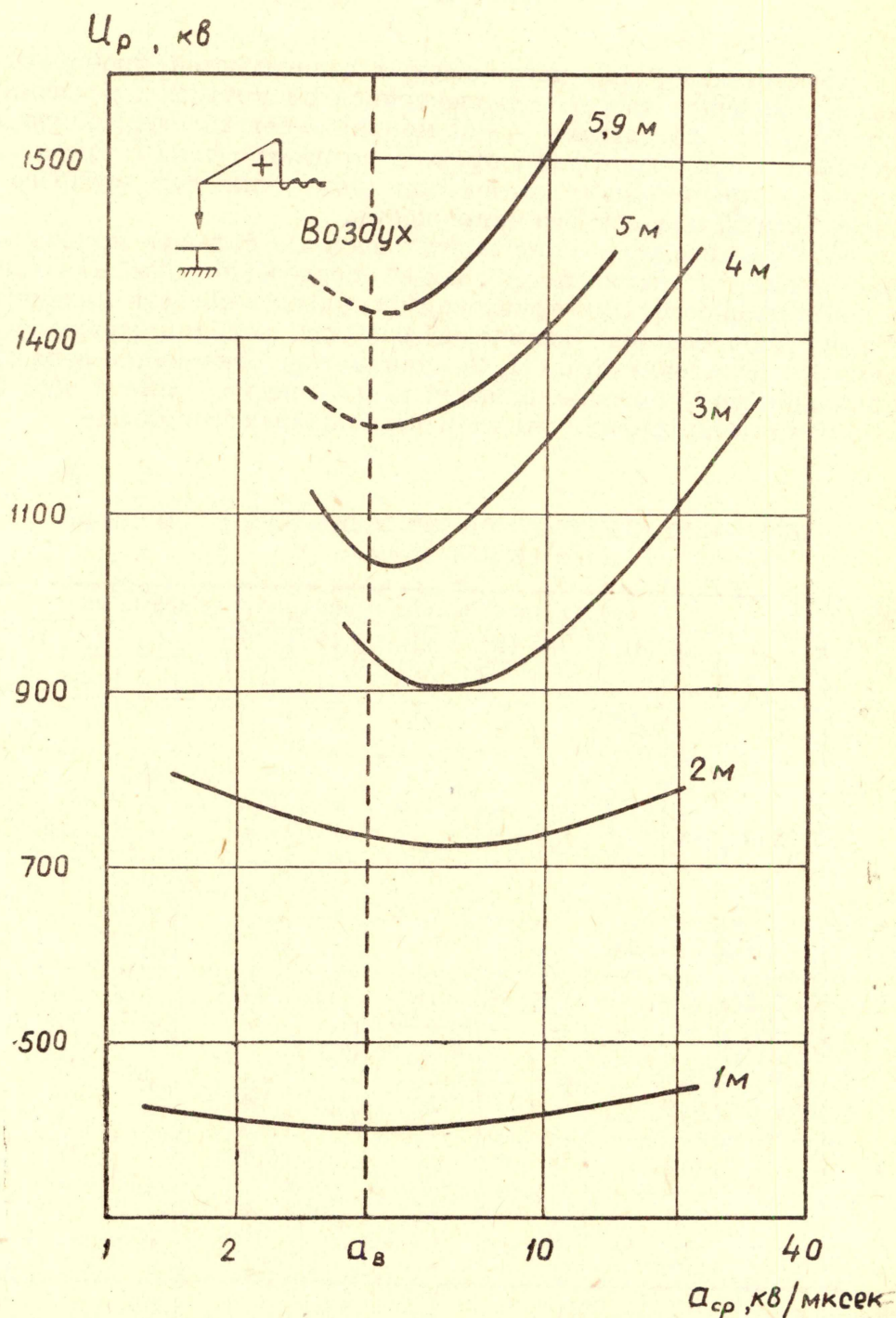


Рис. 2. Зависимости средних разрядных напряжений промежутка «стержень-плоскость» в воздухе от крутизны импульса, по [5].

Таблица 2

ЗНАЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ КРУТИЗНЫ ДЛЯ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Материал	Авторы	Электрич. системы	Длина промежутка (мм)	Полярность	Значение a_T (кв/мксек)
NaCl	[8,9]	О.—П.	0,7; 10	+	30; 37
				—	15; 30
	[8,10]	Ш.—П.	0,15	+	17,5; 17
				—	17,5; —
KCl	[8]	Ш.—П.	0,15	+	18
				—	18
KBr	[8]	Ш.—П.	0,15	+	18
				—	18
KI	[8]	Ш.—П.	0,15	+	20
				—	20
Орган Стекло	[9]	О.—П.	2	+	30
	[8]	Ш.—П.	0,05	+	нет
Лед	[9]	О.—П.	15	+	37
				—	22
		Ш.—П.	10	+	22
				—	—
Парафин	[9]	О.—П.	34	+	40
		—	—	—	40
		Ш.—П.	34	+	нет

Примечание. О — острие, Ш — шар. П — плоскость.

ния крутизны a_B , полученные при анализе данных [4 ÷ 7] для промежутков различной длины и с различной конфигурацией электрического поля. Несмотря на различие в использованной в работах [4 ÷ 7] методике исследований, значения критической крутизны достаточно близки, и ее среднее значение составляет 7 кв/мксек. В области этой крутизны среднее разрядное напряжение меньше, чем при напряжении 50 гц на 10 ÷ 30%.

На рис. 3 представлены аналогичные зависимости для твердых диэлектриков по данным [8, 9]. В исследованном интервале толщин 0,05 ÷ 34 мм импульсные пробивные напряжения твердых диэлектриков характеризуются критической крутизной a_T , при которой электрическая прочность минимальна. Из табл. 2, в которой представлены значения критической крутизны, полученные при анализе данных [8 ÷ 10], значение a_T можно оценить величиной 20 ÷ 30 кв/мксек. При этих крутизнах пробивные напряжения на 10 ÷ 20% ниже кратковременной прочности на постоянном напряжении и напряжении 50 гц [8, 9]. Явление снижения импульсной электрической прочности при крутизнах в области критической просматривается в работах [11, 12]. Следует отметить также факт меньшей импульсной прочности твердых диэлектриков по сравнению с прочностью на постоянном напряжении, отмеченный в [13 ÷ 15].

В этой связи интересно отметить, что в [16], где измерялась электрическая прочность трансформаторного масла, получено снижение

импульсного пробивного напряжения по сравнению с пробоем на постоянном напряжении на $23 \div 40\%$.

Многими авторами при исследовании прочности жидких диэлектриков на импульсах длительностью $10^{-6} \div 10^{-2}$ сек и с фронтом до нескольких микросекунд было установлено, что каждый междуэлектродный промежуток в жидкости в отношении электрической прочности может характеризоваться некоторым, характерным для него, временем воздействия напряжения, называемым часто [17] временем формирования разряда. При временах воздействия, меньших указанного, разрядные напряжения резко возрастают; при больших временах — остаются, примерно, на одном уровне, т. е. в ходе вольтсекундной зависимости имеет место «ступень», охватывающая по времени длительность до $2 \div 4$ порядков [19, 20]. Значение этого времени уменьшается вместе с длиной исследуемого промежутка [20].

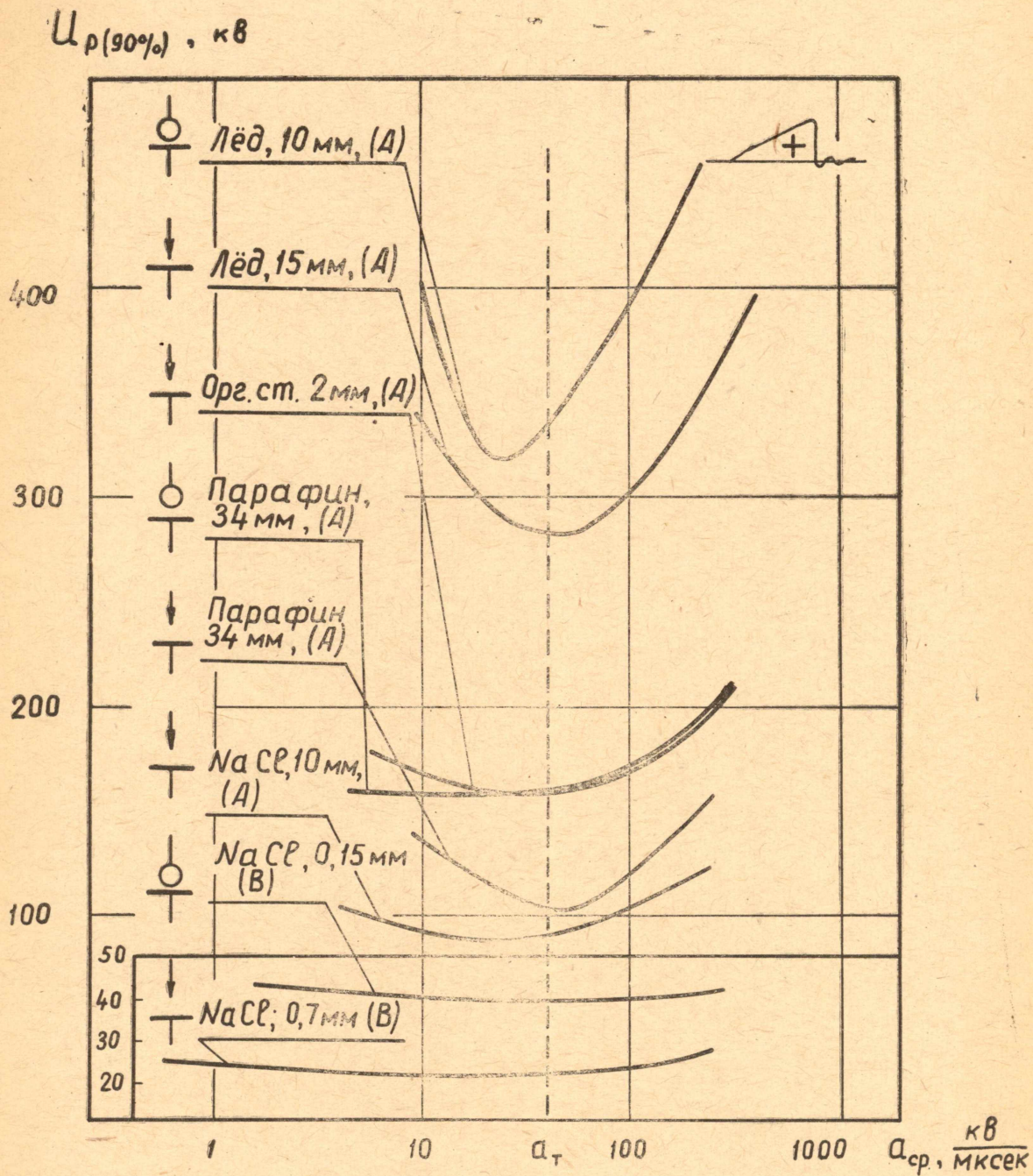
Установленные таким образом факты позволили предполагать, что каждый вид изолирующей среды: газообразная, твердая и жидкая — может характеризоваться собственной, критической крутизной линейно нарастающего напряжения. При критической крутизне имеют место наиболее благоприятные условия для развития электрического пробоя и, следовательно, минимальная импульсная прочность.

Для подтверждения изложенных выше соображений были выполнены эксперименты по пробое технически чистого трансформаторного масла [21, 22]. Пробой промежутков «острие-плоскость» длиной $5 \div 25$ см производился на экспоненциальном фронте импульса напряжения. Изменение средней скорости нарастания напряжения на междуэлектродном промежутке осуществлялось в пределах $0,7 \div 2200$ кВ/мксек. На рис. 4(а, б) представлены зависимости пробивного напряжения от крутизны импульса для промежутков длиной $5 \div 25$ см. Характерной особенностью зависимостей является наличие минимума электрической прочности в области крутизны $80 \div 200$ кВ/мксек (при положительной полярности острия). Следует отметить, что для трансформаторного масла, как и для воздуха, при крутизнах в области критической наблюдается большая нестабильность разрядных напряжений: стандартное отклонение достигало значений 20% [22]. Обычные же его значения на импульсах имеют величину $4 \div 10\%$ [19].

Таким образом, анализ имеющихся в литературе сведений о прочности диэлектриков на импульсах с фронтом разной длительности, а также результаты экспериментов по пробое промежутков в трансформаторном масле на косоугольной волне напряжения дают основания утверждать, что установление форм импульсных напряжений, наиболее опасных для высоковольтной изоляции, может быть основано на использовании зависимости прочности диэлектриков от скорости нарастания напряжения, т. е. исходя из условия наличия критической крутизны.

Для реализации указанного выше представляется необходимым выполнить исследования прочности различных изолирующих сред на косоугольных импульсах с целью установления критических крутизн, характеризующих каждую среду. Найденные таким образом критические скорости нарастания напряжения при установлении опасных воздействий на изоляцию разных классов напряжения можно получить, используя различную длительность фронта импульса.

Пусть критические крутизны для воздушной (a_B), твердой (a_T) и жидкой ($a_{Ж}$) сред — a_B , a_T , $a_{Ж}$ — определены. В связи с тем, что для воздушной, твердой и жидкой изоляции влияние длительно-



Р и с. 3. Зависимости пробивных напряжений твердых диэлектриков от крутизны импульса, В — по [8], А — по [9].

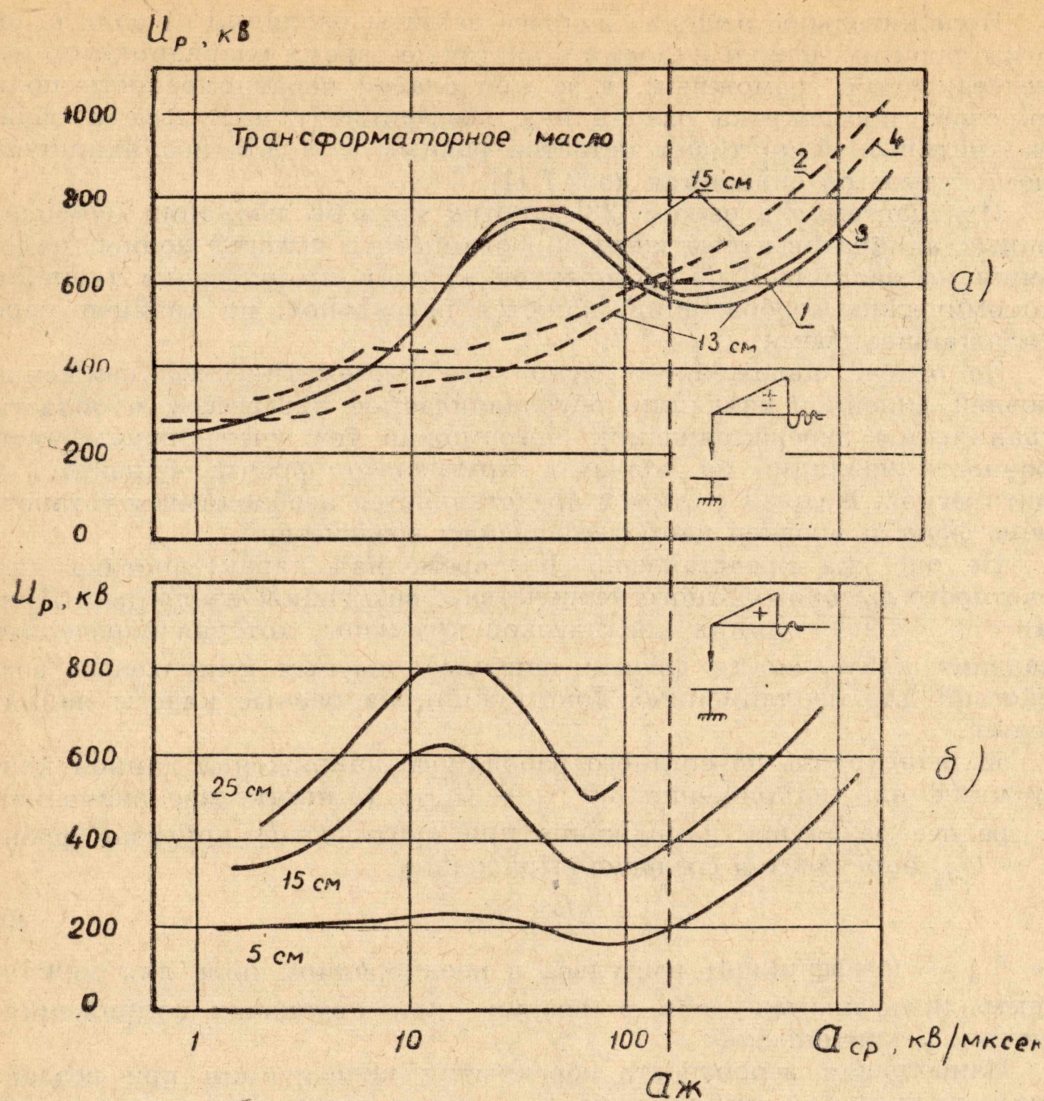


Рис. 4. Разрядные напряжения промежутков «острие-плоскость» в трансформаторном масле в зависимости от крутизны напряжения, по [21, 22],

1,а; 3,а — для положительной полярности острия,
2,а; 4,а — для отрицательной полярности острия.

Примечание. Данные рис. 4,а получены для пробоя промежутков в начальной части экспоненциального импульса.

сти приложенного напряжения (для данной крутизны фронта) различно, следует рассматривать каждый вид изоляции отдельно.

Воздушная изоляция. Необходимо принять во внимание следующие соображения.

В соответствии с результатами исследований многих лабораторий мира, изложенных в [6], наиболее опасными волнами для чисто воздушной изоляции систем при любых атмосферных условиях являются волны с длительностью фронта, обеспечивающей крутизну, близкую к критической.

В работе [1] установлено, что уровни линейной изоляции линий электропередачи напряжения 300 кВ и выше должны определяться с учетом снижения прочности ее на волнах с пологим фронтом, но не мокроразрядными напряжениями.

Положительное решение вопроса защиты изоляции от волн с пологим фронтом, используемыми в настоящее время разрядниками, не представляется возможным, т. к. при слабой неравномерности поля искрового промежутка разрядника коэффициент импульса в области критической крутизны остается равным 1, а для изоляционных промежутков он снижается до 0,7 [1].

Предлагаемая в работе [23] защита, хотя бы изоляции наиболее ценных аппаратов путем синхронизованного с пологой волной наложения на защищаемый промежуток крутого импульса из технико-экономических соображений, кажется нереальной, по крайней мере в ближайшее время.

На основе изложенного ясно, что систематическое снижение уровней линейной изоляции, обуславливаемое прогрессом в области ограничения перенапряжений, невозможно без учета пониженной прочности изоляции на волнах с крутизнами фронта, близкими к критической. В связи с этим и представляется необходимым установление форм и уровней наиболее опасных воздействий.

На рис. 4,а представлена вольтвременная характеристика для некоторого высоковольтного устройства с воздушной изоляцией. Прямая $a_B = \text{const}$ — линия критической крутизны, которая определяет значения длительности фронта наиболее опасных импульсных воздействий для изоляционных конструкций на разные классы напряжения.

Если исходить из среднего разрядного напряжения данной конструкции при напряжении 50 гц — U_{p50} (амплитудное значение), то среднее разрядное напряжение при критической крутизне фронта — U_{pk} определится согласно выражению:

$$U_{pk} = U_{p50} \cdot K_B, \quad (2)$$

где K_B — коэффициент импульса в неоднородном поле для междуэлектродных промежутков в воздухе при крутизнах напряжения, близких к критической.

Наибольшая вероятность перекрытия конструкции при воздействии импульса с амплитудой U_{pk} имеет место при критической крутизне a_B фронта импульса и, следовательно, длине фронта

$$\tau_{фр} = \frac{U_{pk}}{a_B}. \quad (3)$$

Если учесть, что для пологих волн среднее разрядное напряжение близко к 50-процентному напряжению перекрытия [24], особенно при длительностях фронта $10^{-5} \div 10^{-4}$ сек, то, очевидно, что импульс с амплитудой U_{pk} и фронтом $\tau_{фр}$ обеспечит вероятность перекрытия изоляции, близкую к 50%. Напряжение, до которого необходимо ограничивать воздействия с критической крутизной

$$U_{ак} = \frac{U_{p50} \cdot K_B \cdot \left(1 - \frac{2\sigma_k}{100}\right)}{k_{зк}}, \quad \text{где} \quad (4)$$

σ_k — стандартное отклонение разрядного напряжения при критической крутизне.

$k_{зк}$ — коэффициент запаса, устанавливаемый, например, из условия неустойчивости разрядных напряжений искровых промежутков защитных разрядников. Таким образом, $U_{ак}$ является минимальным

разрядным напряжением, соответствующим нижней границе области разброса разрядного напряжения, обычно принимаемой как 4σ .

Наибольшая опасность воздействия при амплитуде $U_{ак}$ обеспечится длительностью фронта, соответствующей критической крутизне a_B .

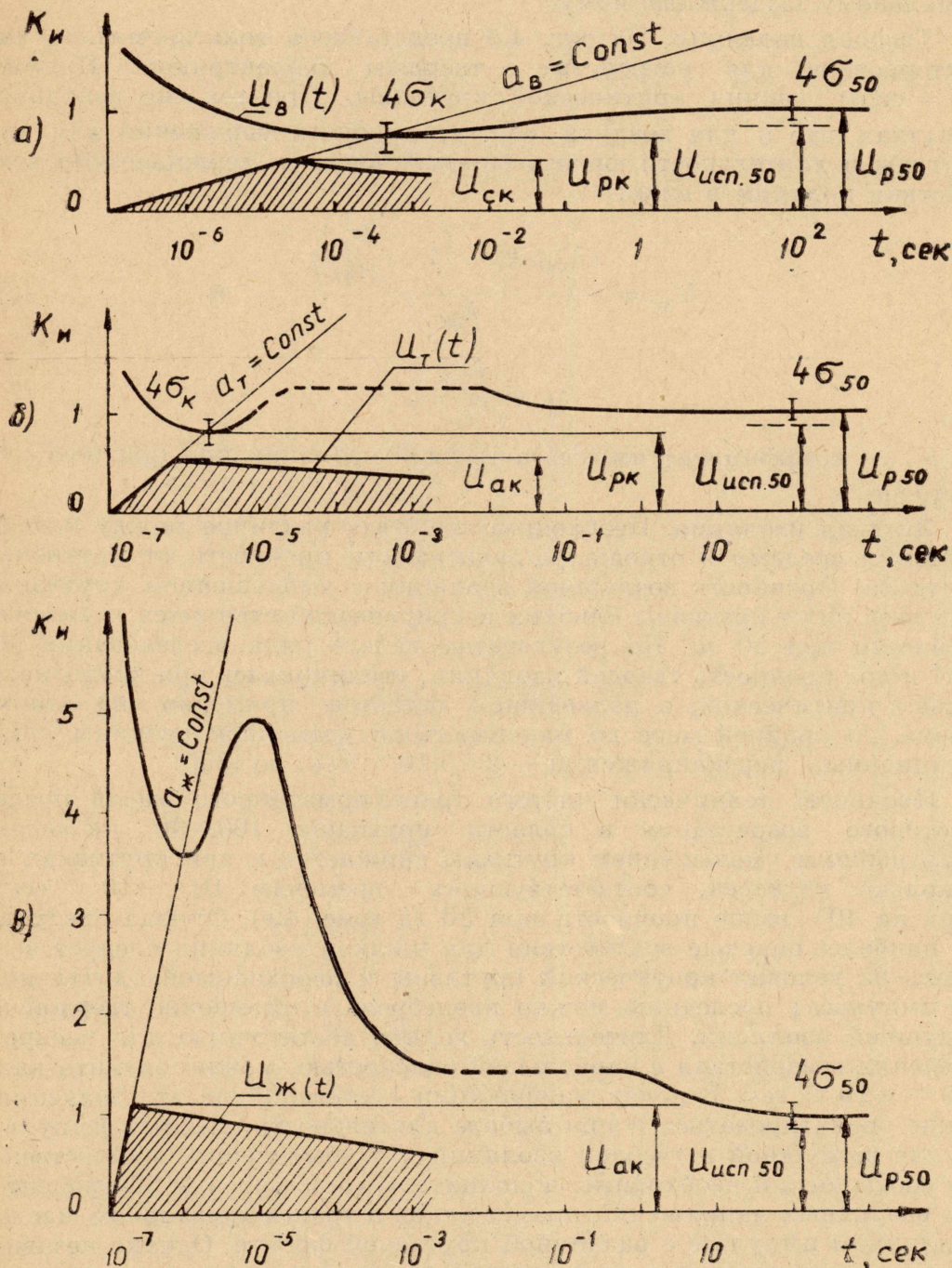


Рис. 5. К установлению наиболее опасных воздействий импульсным напряжением на различные изолирующие среды. 5а — для воздуха, 5б — для твердой изоляции, 5в — для жидкой изоляции. $U_B(t)$, $U_T(t)$, $U_{ж}(t)$ — временной ход наиболее опасных импульсных напряжений для различных изолирующих сред.

Остальные обозначения пояснены в тексте.

$$\tau_{\phi} = \frac{U_{\text{ак}}}{a_{\text{В}}} \quad (5)$$

При установлении параметров волны испытательного воздействия импульс напряжения с амплитудой $U_{\text{ак}}$ и фронтом τ_{ϕ} следует принимать как воспроизводящий воздействие, соответствующее минимальному выдерживаемому.

Твердая изоляция. На рис. 4,б представлена вольтвременная характеристика для устройства с твердым диэлектриком. Прямая $a_{\text{т}} = \text{const}$ — линия критической крутизны. При тех же исходных посылаках, что и для воздуха, соответствующие выражения для амплитуды и длительности фронта минимального выдерживаемого воздействия получим в виде:

$$U_{\text{ак}} = \frac{U_{\text{р50}} \cdot k_{\text{т}} \cdot \left(1 - \frac{2\sigma_{\text{к}}}{100}\right)}{k_{\text{Зк}}} \quad \text{и} \quad (6)$$

$$\tau_{\phi} = \frac{U_{\text{ак}}}{a_{\text{т}}} \quad (7)$$

где $K_{\text{т}}$ — коэффициент импульса твердой изоляции при критической крутизне.

Жидкая изоляция. Необходимо отметить различие между изолирующими средами в отношении зависимости прочности от крутизны импульса. Прочность воздушной изоляции с уменьшением крутизны импульса ниже крутизны близких к критической стремится к уровню прочности при 50 гц. По результатам целого ряда исследований [8, 9, 11 и др.] прочность твердой изоляции, увеличиваясь при крутизнах, меньше критической, в дальнейшем остается, примерно, на одном уровне, по крайней мере до максимальной временной границы коммутационных перенапряжений — $2 + 5,10^{-3}$ сек, по [25].

Прочность технически чистого трансформаторного масла после некоторого возрастания в области крутизны $100 + 30$ кв/мксек с дальнейшим уменьшением крутизны снижается и при крутизнах в несколько кв/мксек, соответствующих временам $10^{-4} + 10^{-3}$ сек, лишь на 40% выше прочности при 50 гц (рис. 4,в). Отсюда следует, что наиболее опасные воздействия для жидкой изоляции следует выбирать из условия критической крутизны и необходимой длительности импульса; последним можно пренебречь в отношении твердой и воздушной изоляции. Длительность волны, достаточную для воспроизведения воздействия с наибольшей опасностью, можно оценить как $5,10^{-3} + 10^{-2}$ сек. В целях унификации испытаний на эти значения можно ориентироваться и при выборе длительности опасных импульсов для воздушной и твердой изоляции. Для выяснения количественных соотношений необходимы дополнительные измерения 50-процентных разрядных напряжений промежутков в трансформаторном масле на длинном импульсе с различной крутизной фронта. Однако независимо от количественных соотношений выражения для амплитуды и длительности фронта минимального выдерживаемого импульсного воздействия останутся подобными (4), (6) и (5), (7), т. е.

$$U_{\text{ак}} = \frac{U_{\text{р50}} \cdot k_{\text{ж}} \cdot \left(1 - \frac{2\sigma_{\text{к}}}{100}\right)}{k_{\text{Зк}}}, \quad \text{где} \quad (8)$$

$K_{ж}$ — коэффициент импульса масляного промежутка при критической крутизне,

$K_{зк}$ — коэффициент запаса при коммутационных перенапряжениях, и

$$\tau_{\phi} = \frac{U_{ак}}{a_{ж}}. \quad (9)$$

Рассмотрим использование полученных выше соотношений применительно к имеющимся испытательным напряжениям при 50 гц для изоляционных конструкций с разными классами напряжения. Выразим U_{p50} через испытательное напряжение $U_{исп50}$.

$$U_{p50} = \frac{U_{исп50} \cdot K_{з50}}{1 - \frac{2\sigma_{50}}{100}}, \quad \text{где} \quad (10)$$

$K_{з50}$, σ_{50} — коэффициент запаса и стандартное отклонение при 50 гц.

Обозначим критическую крутизну $a_{\min}$, а коэффициент импульса при $a_{\min}$ — $k_{\min}$.

Тогда

$$U_{ак} = \frac{U_{исп50} \cdot K_{з50} \cdot K_{\min} \left(1 - \frac{2\sigma_k}{100}\right)}{K_{зк} \left(1 - \frac{2\sigma_{50}}{100}\right)}. \quad (11)$$

Относительная амплитуда минимального выдерживаемого импульса

$$U_{ак}^* = \frac{K_{з35} \cdot K_{\min} \left(1 - \frac{2\sigma_k}{100}\right)}{K_{зк} \left(1 - \frac{2\sigma_{50}}{100}\right)}, \quad (12)$$

где $U_{ак}^* = \frac{U_{ак}}{U_{исп50}}.$

Для одного вида изолирующей среды и разных классов напряжения можно ожидать, что $U_{ак}^* \neq \text{const}$, т. е.

$$U_{ак}^* = l(i, s), \quad \text{где} \quad (13)$$

i — класс напряжения,

s — вид изолирующей среды.

Зная $U_{ак}^*$ для любого класса напряжения при данной изолирующей среде, можно определить параметры минимальных выдерживаемых воздействий рассматриваемых конструкций:

$$U_{ак}(i, s) = U_{исп50}(i, s) \cdot U_{ак}^*(i, s) \quad (14)$$

$$\text{и } \tau_{\phi}(i, s) = \frac{U_{исп50}(i, s) \cdot U_{ак}^*(i, s)}{a_{\min}}. \quad (15)$$

Установленные таким образом минимальные выдерживаемые импульсные воздействия для различных изолирующих сред позволят определять параметры испытательных импульсных напряжений, удовлетворяющих условиям высокой экономичности используемой

изоляции при гарантированной надежности ее работы. Количественные соотношения, которые необходимы для расчета и выбора изоляции, могут быть получены на основе анализа распределения форм и кратностей коммутационных перенапряжений по вероятностям.

ВЫВОДЫ:

1. Рассмотрена методология определения импульсных испытательных напряжений, характеризующих прочность изоляционных конструкций при коммутационных перенапряжениях.

2. Установлено наличие критических крутизны линейно нарастающего напряжения, характеризующих электрическую прочность изолирующих сред.

3. Предложена методика определения наиболее опасных импульсных воздействий для различных изолирующих сред и разных классов напряжения, учитывающая существенное снижение электрической прочности при критических крутизнах импульса.

4. На основе установления наиболее опасных импульсных воздействий и анализа распределения форм и уровней коммутационных перенапряжений по вероятностям предложен подход к выбору наиболее экономичных испытательных напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Стекольников, Э. М. Базелян. «Электричество», № 7, 1962.
2. W. G. Standring, D. N. Browning, Proc. IEE, № 6, 1963, 1082.
3. B. Gänger, Brown Bov. Mit., № 4, 1960.
4. T. Udo, IEEE Trans. Pow. App. and Systems, № 5, 1964, 471.
5. И. С. Стекольников, Е. Н. Браго и Э. М. Базелян. ЖТФ, вып. 8, 1962.
6. P. Jacottet, ETZ — A, № 9, 1964.
7. В. П. Ларионов, А. Зейтун. Известия вузов, «Энергетика» № 1, 1964.
8. Г. А. Воробьев. Диссертация, Томск, 1956.
9. А. В. Астафуров. Диссертация, Томск, 1958.
10. В. Д. Кучин. Диссертация, Томск, 1958.
11. A. von Hippel and R. S. Alger, Phys. Rev., № 1, 1949, p. 127.
12. М. А. Мельников. Известия вузов. Физика, № 6, 1958.
13. Grünwald, Arch. El., T—12, № 1, 92, 1923.
14. В. Д. Кузнецов, З. А. Бардахова, Н. М. Фаткина ЖРФХО, LX, 1, 57, 1928.
15. А. А. Воробьев, А. Панов. Труды СФТИ, № 3, 1936.
16. E. Marx, Arch. El., B. 20, 1928, S. 589.
17. И. Е. Балыгин. Электрическая прочность жидких диэлектриков, М—Л., Энергия, 1964.
18. P. L. Bellaschi, L. B. Rademacher, AIEE Trans., 65, 1946, p. 1047.
19. H. E. Fiegel, I. S. Kresge, Pow. App. and Systems, № 28, 1957.
20. R. W. Crowe, Appl. Phys., 1956, 27, 2, 1956.
21. И. И. Каляцкий, В. Ф. Панин. Известия вузов. «Энергетика», № 6, 1966.
22. В. Ф. Панин. Известия ТПИ, 1965, т. 139, 1966.
23. Э. М. Базелян. Диссертация, Москва, 1964.
24. В. Л. Иванов. Диссертация, Ленинград, 1964.
25. R. Elsner, ETZ-A, № 1, 1965.