

О ПРОБОЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА НА КОСОУГОЛЬНОЙ ВОЛНЕ НАПРЯЖЕНИЯ

В. Ф. ПАНИН

(Представлена научным семинаром кафедры техники высоких напряжений)

Исследования электрической прочности изоляции при коммутационных перенапряжениях начались в 30—40-х гг. [1, 2]. Однако изучение электрической прочности при воздействиях коммутационного характера остается актуальным, так как с переходом к сверхвысоковольтным системам уровни изоляции определяются внутренними перенапряжениями.

Исследованию электрической прочности трансформаторного масла—самой распространенной изоляции высоковольтных аппаратов—на волнах коммутационной длительности посвящены работы [2—8]). Этими работами охвачены основные длительности коммутационных воздействий $10^{-5} \div 10^{-3}$ сек и выяснены некоторые вопросы поведения трансформаторной изоляции при длительных импульсных воздействиях. Например, согласно [3], прочность в области 10^{-3} сек на 40% выше, чем при промышленной частоте. Ввиду малого объема исследований и различного методологического подхода к ним разных авторов к настоящему времени еще недостаточно изучены соотношения прочности при грозовых и коммутационных воздействиях в больших промежутках на волнах разной полярности. Не изучены зависимости вольтсекундных характеристик от формы воздействующего напряжения. Нет систематических данных по определению величин стандартного отклонения разрядных напряжений.

При исследовании указанных выше вопросов есть основания считать скорость нарастания напряжения на промежутке, или крутизну фронта импульса наряду с длительностью воздействия напряжения одним из важнейших факторов, определяющих его электрическую прочность.

На основании вышеизложенного представляют интерес исследования электрической прочности больших промежутков в трансформаторном масле в зависимости от крутизны импульса. В качестве исследуемого промежутка уместно использовать электродную систему «острие—плоскость», как одну из наиболее характерных.

Аппаратура и методика эксперимента

На рис. 1 представлена принципиальная схема эксперимента. Источником напряжения являлся генератор импульсных напряжений на

3000 кв с разрядной емкостью $C_p = 7200$ пф, ГИН-3000. В первом этапе исследований регулировка длительности фронта импульса осуществлялась в пределах $5 \cdot 10^{-7} \div 4 \cdot 10^{-4}$ сек. изменением величины фронтового сопротивления R_f и сопротивления R_d , вводимого в расщепки каждой из 10 ступеней ГИН-3000, при постоянной формирующей емкости $C_f = 500$ пф. Измерения производились шаровым разрядником с диаметром 1 м, с применением осциллографов ОК-19М2 и ДЭСО-1, емкостного

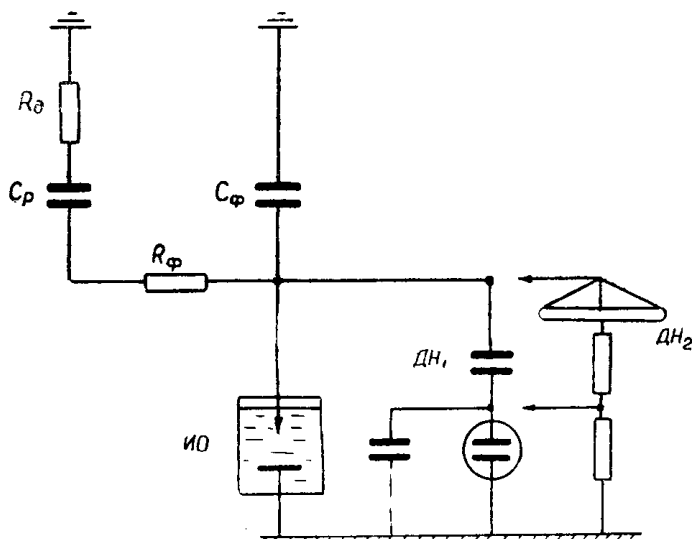


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема, использованная в экспериментах. R_d — демпфирующее сопротивление ГИН-3000, C_p — разрядная емкость ГИН-3000, R_f — фронтовое сопротивление, C_f — формирующая емкость, ИО — объект испытания, $ДН_1$ — емкостный делитель напряжения, $ДН_2$ — омический делитель напряжения.

и омического делителей напряжения. Исследуемое масло имело прочность в стандартном пробойнике $36 \div 40$ кв. Пробой осуществлялся на фронте косоугольного импульса при $75 \div 85\%$ его амплитуды в диапазоне времени $4 \cdot 10^{-7} \div 3 \cdot 10^{-4}$ сек. Согласно рекомендациям Тещнера [9], пауза между двумя последовательными разрядами составляла около 2 мин.

При повторных опытах были приняты изменения, которые позволили использовать один делитель — емкостный, осуществлять пробой при $50 \div 60\%$ значении амплитуды импульса; исключить разряды вне области исследуемого промежутка. Для последнего был сконструирован и изготовлен маслonaполненный ввод на импульсное напряжение 1 млн. вольт.

В результатах экспериментов использовались средние напряжения пробоя и предразрядного времени по $20 \div 30$ измерениям.

Стандартное отклонение σ , пределы вероятного разброса F , ошибка определения средних значений разрядных напряжений δ_n определялись по методике, приведенной в [10, 11].

Результаты экспериментов

На рис. 2 представлены вольтсекундные характеристики (рис. 2,а), зависимости средних разрядных напряжений U_p (рис. 2,б) и стандартного отклонения σ (рис. 2,в) от крутизны фронта импульса A для промежутков 5, 15, 25 см при положительной полярности острия. Для исследованного диапазона времени каждая вольтсекундная характеристика имеет три области изменения разрядных напряжений. Данные

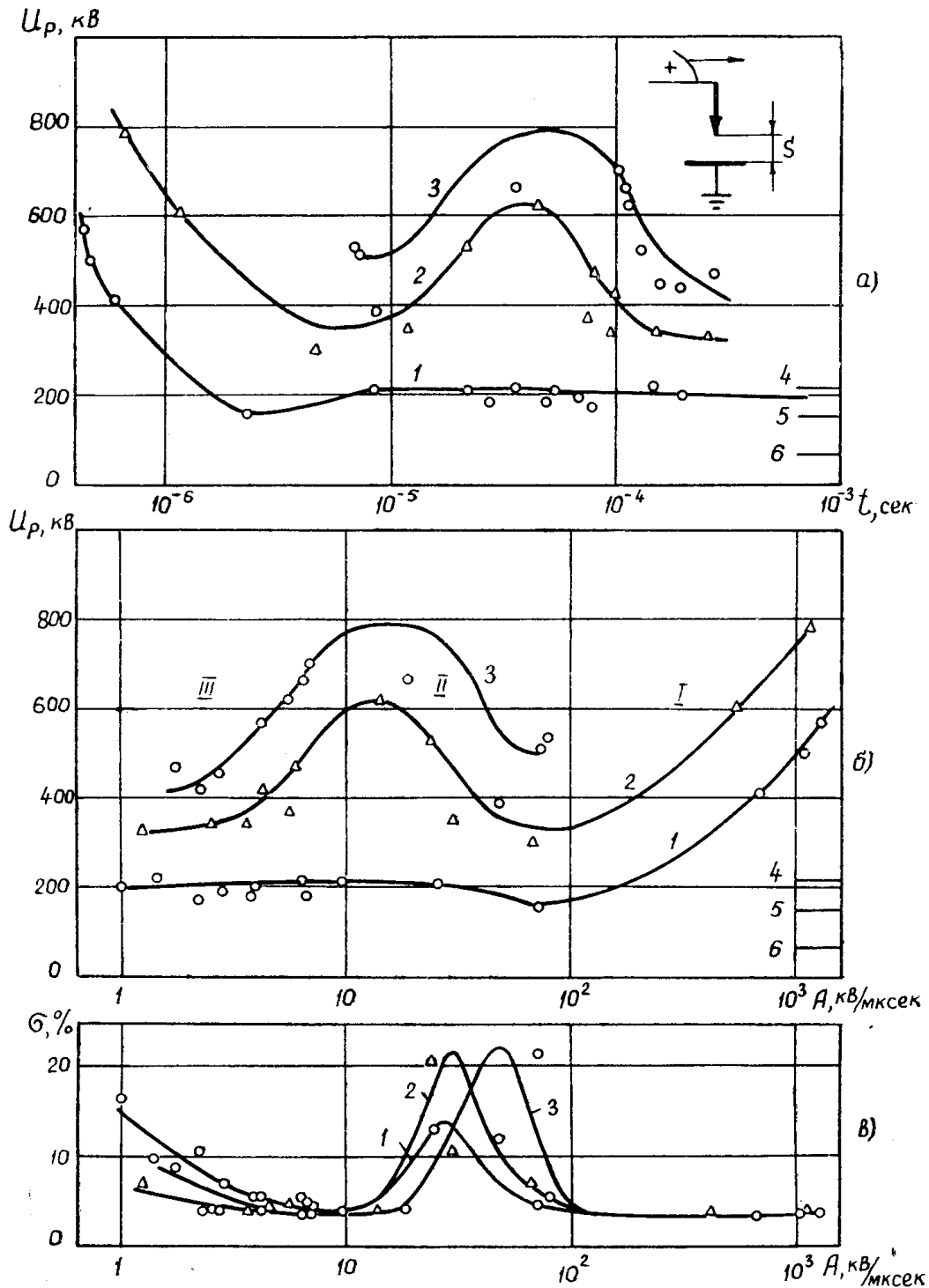


Рис. 2. Вольтсекундные характеристики (а), зависимости средних разрядных напряжений U_p от крутизны A фронта импульса (б) зависимости стандартного отклонения разрядных напряжений σ от крутизны A фронта импульса (в) для промежутка «острие — плоскость» в трансформаторном масле. Острие положительной полярности.

1, 2, 3 — зависимости для $S = 5, 15, 25$ см, соответственно, 4, 5, 6 — разрядные напряжения при 50 гц для $S = 5, 15, 25$ см.

для этих областей отражены в табл. 1, где S —длина промежутков, t —пределы времени для областей каждого промежутка, K_i —коэффициент импульса для областей изменения U_p . Как видно из табл. 1 и рис. 2, а, для второй области с увеличением длительности воздействующего напряжения имеет место существенное упрочнение промежутка: коэффициент импульса K_i растет от 2÷3 до 3÷4.

При рассмотрении зависимостей средних разрядных напряжений U_p от крутизны A , приведенных на рис. 2,б, обнаруживается, что крутизны, соответствующие изменению характера зависимости $U_p=f(A)$, для всех исследованных промежутков одинаковы. Область минимума электрической прочности соответствует крутизне фронта $A=100$ кв/мксек, область максимума—крутизне $A=15$ кв/мксек.

Для зависимости стандартного отклонения σ от крутизны A характерен максимум при $\sigma=13-20\%$ (рис. 2,в); этому значению стандартного отклонения соответствует наибольшее значение пределов вероятного разброса F до 80% и максимальная ошибка определения средних разрядных напряжений δ_n (16%).

На рис. 3 представлены результаты обследования прочности промежутков 15 и 13 см при обеих полярностях острия для крутизны $A=0,685-2200$ кв/мксек. Для положительной полярности получены результаты такие же, как и на рис. 2: минимум прочности промежутков приходится на крутизну $A=200$ кв/мксек, для максимума прочности крутизны фронта $A=30$ кв/мксек (рис. 3,б). Сдвиг зависимости $U_p=f(A)$ в сторону больших крутизн и разрядных напряжений обусловлен, видимо, пробоем промежутков 15 и 13 см в другой области фронта импульса, нежели пробой промежутков 5÷25 см.

Ход зависимости стандартного отклонения σ от крутизны A (рис. 3,б) аналогичен зависимости $\sigma=f(A)$, представленной на рис. 2,б. Максимум σ (до 10%) приходится на крутизны $A=60-100$ кв/мксек.

Для зависимости разрядных напряжений U_p от времени t и крутизны A воздействующего напряжения (рис. 3, а, б) при отрицательной полярности острия характерно непрерывное уменьшение U_p с уменьшением A или увеличением t . Для всех результатов измерений и обработки стандартное отклонение σ не превышало 8,6%.

Как видно из рис. 2,б, для крутизн $A=1000-150$ кв/мксек прочность при положительном острие меньше прочности при отрицательном острие на 10÷15%. В области же крутизн $A=100-10$ кв/мксек прочность при положительном острие на 50÷80% превышает прочность при отрицательном. При $A<10$ кв/мксек существует незначительное (до 10%) превышение прочности при отрицательной полярности.

Обсуждение результатов

Подтверждается различный характер вольтсекундных характеристик для волн типа стандартной и волн с экспоненциальным фронтом, установленный в [3] (рис. 3, а, кривые 1, 5, 6) для отрицательной полярности. Согласно [3], прочность трансформаторного масла в области времени $10^{-4}-10^{-3}$ сек на 40÷50% превышает прочность при промышленной частоте.

В отношении вольтсекундных характеристик при положительной полярности острия результаты настоящей работы не подтвердили данных [3]: в [3] заметной разницы в вольтсекундных характеристиках при положительном и отрицательном острие не обнаружено.

По соотношению прочностей при грозовых и коммутационных воздействиях результаты работы не могут быть сопоставлены с данными (4÷6), так как в последних прочность при грозовых воздействиях определялась 50%-ным пробоем на волне 1/50 мксек.

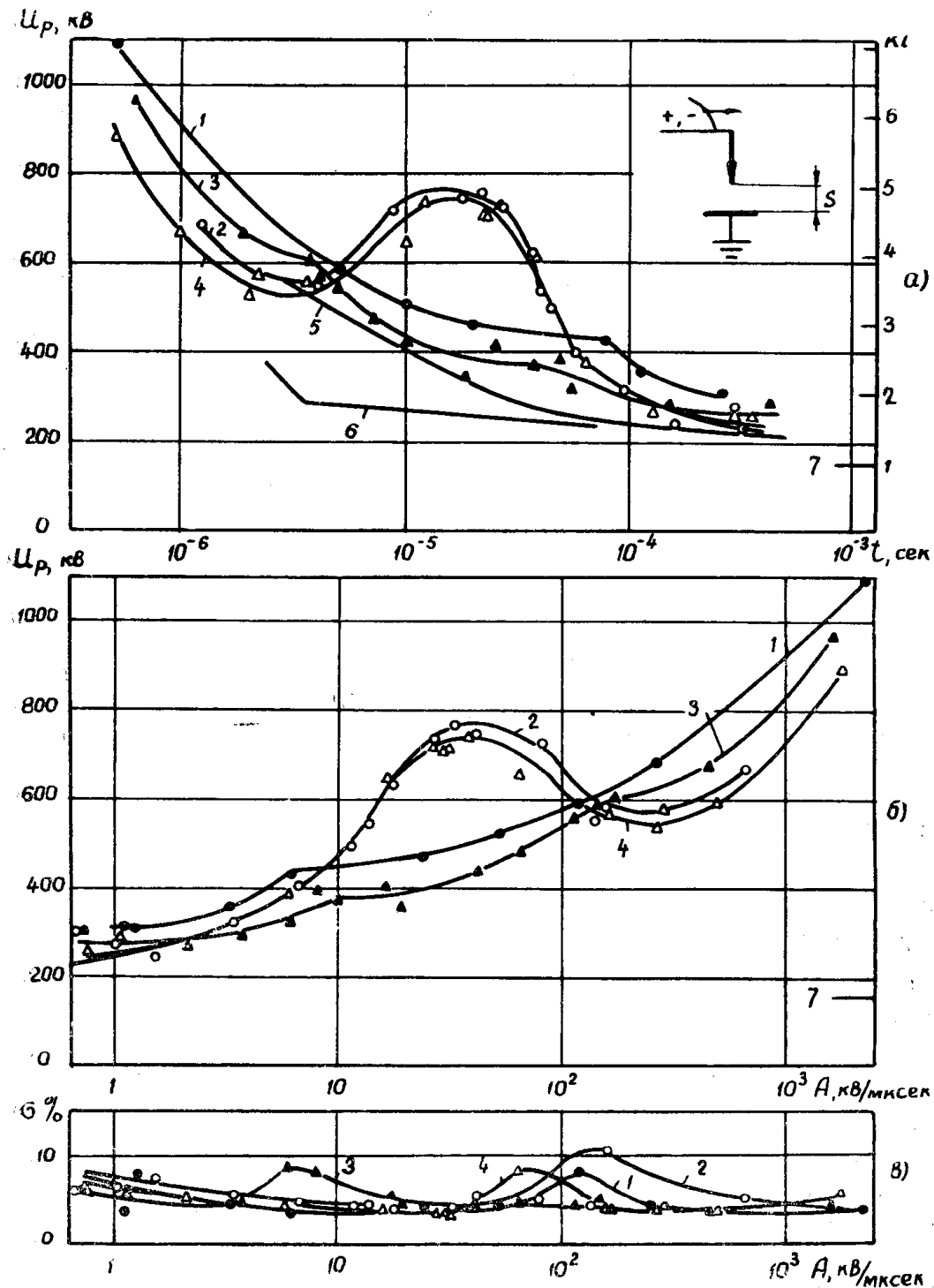


Рис. 3. Вольтсекундные характеристики (а), зависимости $U = t(A)$ (б), зависимости $\delta = t(A)$ (в) для промежутка «острие — плоскость» в трансформаторном масле. 1, 3 и 2, 4 — зависимости для острия отрицательной и положительной полярностей, соответственно. 1, 2 и 3, 4 — для $S = 15$ см и 13 см, соответственно. 5, 6 — вольтсекундные характеристики стержневого промежутка 76 мм в трансформаторном масле для волн с длинным экспоненциальным фронтом и $1/50$ мксек, отрицательной полярности, по [3]. 7 — разрядное напряжение промежутка «острие — плоскость» 15 см в трансформаторном масле для 50 гц. K — коэффициент импульса, только для кривых 1, 5, 6.

Установленный в работах (4÷6) эффект полярности для крутизны используемых напряжений $A = 0,1 \div 3$ кв/мксек и около 300 кв/мксек находится в соответствии с результатами настоящей работы.

Возможность превышения прочности промежутка в трансформаторном масле при положительной полярности острия обнаруживается в результатах [7]. Тецнер [7] установил, что для промежутков в трансформаторном масле при пульсирующих импульсных напряжениях с крутизной фронта около $30 \div 40$ кв/мксек время формирования разряда с положительного острия значительно больше, чем с отрицательного. Из этого следует, что при подаче на промежуток 2 волн одинаковой крутизны, но разной полярности разрядное напряжение для положительной волны будет выше.

В имеющихся работах [3—8] систематического анализа стандартного отклонения σ в зависимости от крутизны напряжения A не приводится, однако средние пределы σ в указанных работах определяются как 4—12%, что соответствует данным настоящей работы.

Использование принятой методики при пробое больших промежутков в трансформаторном масле позволило установить следующие характерные зависимости:

а) наличие упрочнения междуэлектродных промежутков в трансформаторном масле при крутизнах импульсах $10 \div 100$ кв/мксек при положительной полярности острия;

б) наличие максимума разброса разрядных напряжений для крутизны $40 \div 80$ кв/мксек при положительном острие;

в) непрерывное уменьшение прочности при уменьшении крутизны напряжения для отрицательного острия.

Полученные данные можно объяснить, исходя из представлений о стадии формирования разряда как о лидерном процессе, развитым для больших воздушных промежутков [12, 13] и для трансформаторного масла [14, 15]. Согласно (12) правая ветвь U -образной вольтсекундной характеристики длинного воздушного промежутка обусловлена избыточным объемным зарядом, внедренным в промежуток импульсной короной и короной лидера, и снижающим градиенты в приэлектродной области. Область минимума вольтсекундной характеристики объясняется относительно малой величиной объемного заряда, внедренного в промежуток при больших крутизнах напряжения и, следовательно, меньшим экранированием электродов.

В трансформаторном масле акты ионизации, подобные первичной короне и короне лидера в больших воздушных промежутках, не зафиксированы [14], однако это не исключает возможности протекания процесса формирования разряда путем подобных же актов ионизации, гораздо более локализованных из-за большей плотности жидкости.

При таком рассмотрении предразрядных процессов в трансформаторном масле правую ветвь зависимости $U_p = f(A)$ можно объяснить инерционностью развития первого акта ионизации (типа первичной короны в воздухе) и лидера.

Левая ветвь зависимости разрядных напряжений от крутизны обуславливается, по-видимому, внедрением в приэлектродную зону промежутка все большего по величине объемного заряда.

Большой заряд эффективнее противодействует продвижению канала лидера в сторону противоположного электрода. Возможные флуктуации в величине объемного заряда имеют, вероятно, максимум при крутизнах $A \div 40 \div 80$ кв/мксек, чем, возможно, и обусловлена большая нестабильность разрядных напряжений при этих крутизнах.

Повторное снижение разрядных напряжений для крутизны $A = 20 \div 30$ кв/мксек (в $3 \div 5$ раз при скорости подъема напряжения несколько

ко киловольт в секунду) можно рассматривать как следствие вторичных процессов, например образование мостиков из включений, постоянно присутствующих в жидкостях технической очистки.

Объяснение монотонности снижения разрядных напряжений с уменьшением крутизны для отрицательной полярности острия возможно при использовании имеющихся в литературе [16] указаний на различный способ продвижения канала разряда при разных полярностях острия.

Выводы

Установлено, что импульсная прочность промежутков длиной $5 \div 25$ см при электродах «острие—плоскость» в трансформаторном масле и воздействии косоугольной волны напряжения характеризуется следующим:

1. Наличие минимума разрядных напряжений для крутизн около 100 кв/мксек и возрастания средних разрядных напряжений в области крутизны $100 \div 10$ кв/мксек (до 30—50%) для положительной полярности острия.

2. Непрерывным уменьшением прочности промежутков с уменьшением крутизны импульса от 2200 кв/мксек до 0,685 кв/мк сек для отрицательной полярности острия.

3. $50 \div 80\%$ превышением разрядных напряжений промежутков при положительном острие над разрядными напряжениями промежутков при отрицательном острие для крутизн $100 \div 10$ кв/мксек.

4. $2 \div 3$ -кратным превышением прочности в области грозовых воздействий (10^{-6} сек) над прочностью в области коммутационных перенапряжений (10^{-4} сек).

5. Высокой нестабильностью разрядных напряжений для крутизн $40 \div 80$ кв/мксек (разброс до $40 \div 80\%$).

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Wagner, W. Huber, Brown Boveri Mit, № 12, 1940.
2. P. L. Bellaschi, L. P. Rademacher, AIEE Trans., 65, 1946.
3. H. E. Fiegel, I. S. Kresge, Power Apparatus and Systems, № 28, 1956.
4. P. Jacottet, ETZ—A, Hf. № 10, 1958.
5. B. Gänger, G. Hosemann, Brown Boveri Mit, № 5, 1959.
6. B. Gänger, Brown Boveri Mit, № 4, 1960.
7. V. Tetzner, Arch für Elektrotechnik, Hf. № 2, 1959.
8. П. Г. Тошев. Известия вузов, Энергетика, № 3, 1964.
9. V. Tetzner, Arch. für Elektrotechn., Hf. № 1, 1958.
10. I. B. Owens, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, № 3, 1964.
11. W. Baumann, ETZ—A, Hf. № 11, 1957.
12. И. С. Стекольников, Е. Н. Браго, Э. М. Базелян, ЖТФ, № 8, 1962.
13. Э. М. Базелян. ЖТФ, № 4, 1964.
14. В. С. Комельков. ЖТФ, № 8, 1961.
15. В. Я. Ушаков. Электрический пробой жидких диэлектриков на косоугольных волнах (настоящий сборник).
16. V. Tetzner, Arch. für Elektrotechnik, Hf. № 1, 1958.