

К МЕТОДИКЕ ПОЛУЧЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯМ КОММУТАЦИОННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ.

И. И. КАЛЯЦКИЙ, В. Ф. ПАНИН

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института
высоких напряжений)

Вместе с тенденцией к понижению существующих уровней изоляции, вызванному растущими требованиями к экономичности линий электропередачи и подстанций и успехами их защиты от грозовых перенапряжений, резко повысился интерес к внутренним перенапряжениям высоковольтных систем, так как уровни изоляции при напряжениях больше 220 кВ определяются коммутационными перенапряжениями, и стоит вопрос о снижении уровней изоляции в сетях 110—220 кВ.

В связи с этим возникает необходимость воспроизведения коммутационных воздействий — как в свое время появилась необходимость имитации грозовых перенапряжений — для исследования высоковольтной изоляции, испытания высоковольтных аппаратов, подвергающихся коммутационным воздействиям, и т. п.

В работе [1] на основании анализа исследований разных авторов показано, что изоляция высоковольтных сетей и аппаратов в процессе коммутационных операций подвергается совместному воздействию напряжения промышленной частоты или постоянного и импульсов затухающих высокочастотных колебаний определенной формы. Частоты колебаний в коммутационных волнах отечественными и зарубежными авторами [2 ÷ 6] оцениваются диапазоном 0,15 ÷ 25 кгц, соответственно, в среднем, время нарастания напряжения коммутационной волны до максимального значения ($3 \div 3,2 U_{\phi}$) можно оценить как $1,5 \cdot 10^{-3} \div 10^{-5}$ сек.

Известны попытки [1, 5] воспроизведения коммутационных волн, воздействующих на испытуемый объект после предварительного и с последующим приложением напряжения промышленной частоты и постоянного напряжения, т. е. воспроизведения воздействий, эквивалентных реальным. Однако идея комплексного воздействия не нашла широкого распространения в практике проведения исследований и испытаний, и в настоящее время в основном используются одиночные колебательные [2, 5, 7] или апериодические импульсы с фронтом длительностью до 10^{-3} сек [8 и др.] без предварительного воздействия других видов напряжения.

Колебательные импульсы получают при разряде емкости через индуктивность на другую емкость [1], а также с помощью специального устройства — генератора внутренних перенапряжений — ГВП [5], что связано в известными трудностями: как видно из [1, 5], получение высоковольтных колебательных импульсов с частотой до 25—0,15 кгц возмож-

но лишь с применением мощных высоковольтных конденсаторных батарей и реакторов, а в случае ГВП необходимо наличие каскада трансформаторов с относительно сложной системой синхронизации.

Эти трудности в значительной мере устраняются использованием для воспроизведения коммутационных воздействий аperiodических импульсов с длительностью фронта 10^{-3} сек и более, получаемых от обычного импульсного генератора с формирующей цепью RC. Единичные воздействия аperiodической волной на фронте с указанной длительностью в основном охватывают весь диапазон коммутационных воздействий и с достаточной эквивалентностью воспроизводят условия работы изоляции при коммутационных перенапряжениях.

Следует отметить, что во многих исследованиях прочности длинных воздушных промежутков используются косоугольные волны напряжения (аperiodическая волна с удлиненным фронтом). Результаты исследований прочности воздушной изоляции на волне, длительность фронта которой регулировалась изменением параметров формирующей цепи R, C [8], нашли свое отражение в рекомендациях МЭК.

В связи с изложенным представляют интерес вопросы использования действующих импульсных генераторов высоковольтных испытательных лабораторий для получения волн напряжения, воспроизводящих коммутационные воздействия. При этом ожидается значительное повышение рабочего времени крупных импульсных генераторов, которое, как и для других высоковольтных испытательных установок, весьма невелико.

Импульсы напряжения до 1500 кВ с фронтом до 500 мксек воспроизводились в высоковольтной лаборатории Томского политехнического института при использовании десятиступенчатого генератора импульсных напряжений подвешенного типа на 3 млн. вольт — ГИН-3 [9].

Емкость генератора в ударе C_p равнялась 7200 пф, зарядное сопротивление одной ступени ГИН, $R_{ст} = 1,2$ мом. Емкость экрана, смонтированного на высоковольтном конце ГИН-3, составляла около 370 пф. Емкость воздушного конденсатора C_{ϕ} , электродом которого являлась металлическая плоскость размерами 5×5 м при удалении от заземленной стены на 2,5 м, была равна 400 пф. Общая формирующая емкость, включающая, помимо C_{ϕ} , емкость омического делителя напряжения и соединительных шин, составляла около 500 пф.

Омический делитель напряжения (Д. Н.) с сопротивлением $R_{дн} = 1250$ ком выполнен с использованием полиэтиленовой трубы диаметром 54 мм, наполненной 70% раствором чистого глицерина в дистиллированной воде, электроды угольные. Согласно [10, 11], основание и высоковольтный конец делителя были экранированы металлическими кольцами диаметром 2 м, что способствовало некоторому выравниванию емкостного тока по его длине.

Максимально возможное расстояние ДН от ГИН-3 равно 3 м, расстояние ГИН-3 от воздушного конденсатора — 5,5 м.

На рис. 1 (а, б) представлены эскиз взаимного расположения элементов и электрическая схема испытательной установки, приведенная к одноступенчатому генератору.

Удлинение фронта импульса обычным способом — увеличением R_{ϕ} — дало результаты, приведенные на рис. 2 (а, б, в, г). Из рисунка видно, что полученные таким образом волны с удлиненным фронтом неприемлемы для испытаний изоляции, предусматривающих использование импульсов с длинным косоугольным фронтом, так как плавному экспоненциальному росту напряжения предшествует быстрый подъем его до величины 20% и более от амплитудного значения импульса — не-

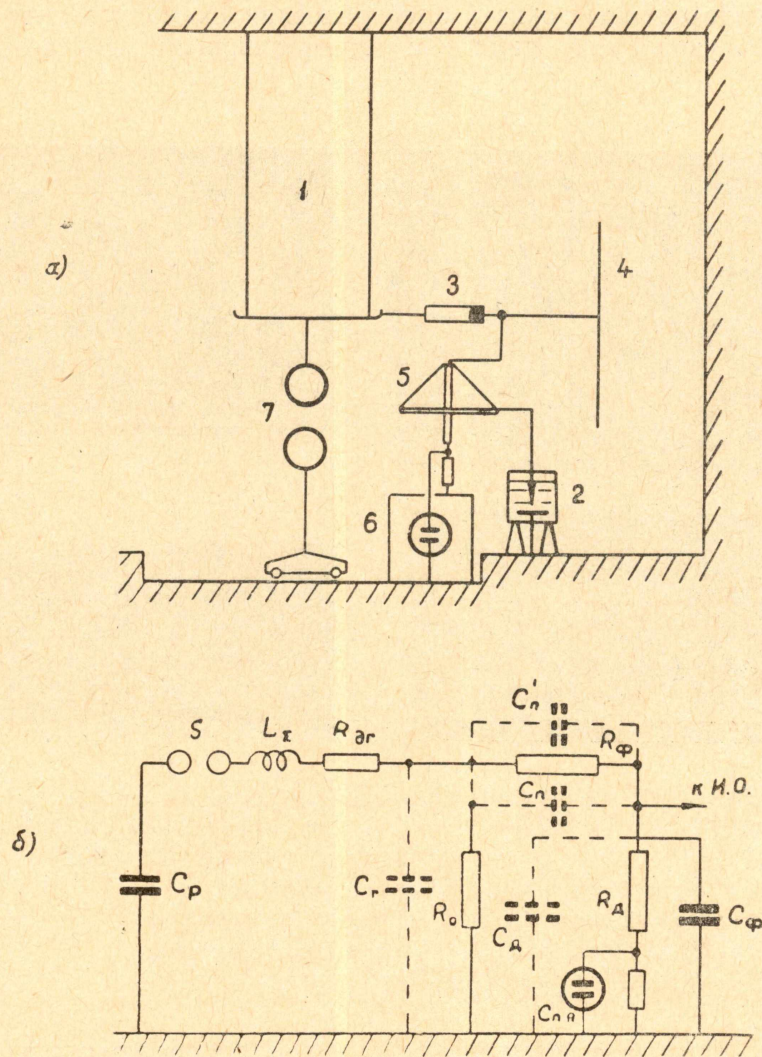


Рис. 1. Эскиз взаимного расположения элементов (а) и электрическая система испытательной установки, приведенной к одноступенчатому ГИН (б).

1—собственно ГИН-3, 2—испытуемый объект; 3—фронтное сопротивление— R_Φ , 4—фронтная емкость, 5—делитель напряжения—ДН, 6—осциллограф в экранирующей кабине, 7—измерительный шаровой разрядник, C_p —емкость ГИН в ударе, S —искровой промежуток, L_x —паразитная индуктивность разрядного контура ГИН, $R_{др}$ —суммарное демпфирующее сопротивление ГИН, C_r —результатирующая паразитная емкость элементов разрядного контура ГИН на землю, R_0 —результатирующее разрядное сопротивление ГИН, без $R_{дн}$, C_n и C_n' —паразитные емкости ГИН на делитель и элементы формирующей цепи, C_d —емкость делителя напряжения, $R_{дн}$ —сопротивление делителя напряжения, $C_{пя}$ —емкость пластин явления.

которая предварительная ступень потенциала. В нашем случае ступень ясно обозначалась уже при $R_{\phi} = 10 \text{ ком}$.

Аналогичные результаты были получены в работе [12]. На рис. 3 (а, б) представлены эскиз и электрическая схема установки, использованные в указанной работе, с обозначениями, соответствующими рис. 1.

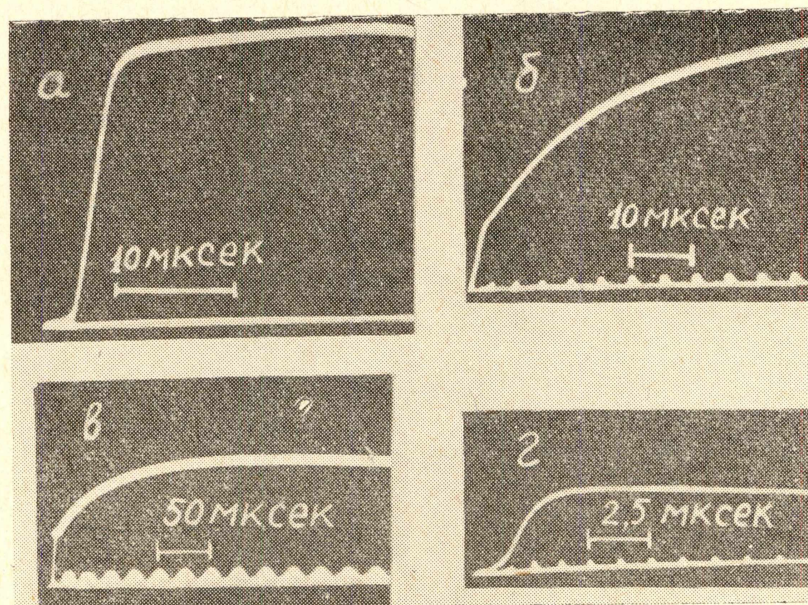


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения с удлинненным фронтом, полученных от ГИН-3 при включении R_{ϕ} различной величины: $U_{\text{зарядное}} = 90 \text{ кв}$, $R_{\text{дн}} = 500 \text{ ком}$.

- а — $R_{\phi} = 0$; $C_{\phi} + C_{\text{д}} = 500 \text{ пф}$, $U_m = 900 \text{ кв}$;
 б — $R_{\phi} = 75 \text{ ком}$; $C_{\phi} + C_{\text{д}} = 500 \text{ пф}$, $U_m = 810 \text{ кв}$;
 в — $R_{\phi} = 500 \text{ ком}$; $C_{\phi} + C_{\text{д}} = 500 \text{ пф}$, $U_m = 405 \text{ кв}$;
 г — $R_{\phi} = \infty$; $C_{\text{д}} = 100 \text{ пф}$, $U_m = 210 \text{ кв}$.

На рис. 4 (а, б, в, г) представлены осциллограммы срезанных волн с удлинненным фронтом, полученных на этой установке при различных R_{ϕ} . На осциллограммах б, г предварительная ступень составляет 54%, для осциллограмм а, в — 28% от амплитуды импульса. В работе [12] наличие ступени объясняется некоторым «приподниманием» импульса над нулевой линией из-за наводок на низковольтном электроде емкостного делителя, с предположением, что на испытуемый объект воздействует импульс высокого напряжения с экспоненциальным фронтом, без ступени.

Между тем анализ фактических электрических схем обеих установок с учетом паразитных емкостей между ГИН и формирующе-измерительными устройствами дает основания утверждать, что предварительная ступень на фронте рассмотренных импульсов имеет место и в высоковольтной волне, воздействующей на объект.

Действительно, все элементы ГИН: конденсаторы, сопротивления, шары и т. п. — во время разряда образуют единую спираль, каждый элемент которой имеет некоторую емкость. Ограничимся рассмотрением в качестве элементов спирали ступеней ГИН и обозначим емкость между любой ступенью ГИН и делителем напряжения C_i , а емкость между ступенью ГИН и формирующими элементами C_i , где $i = 1 \div n$;

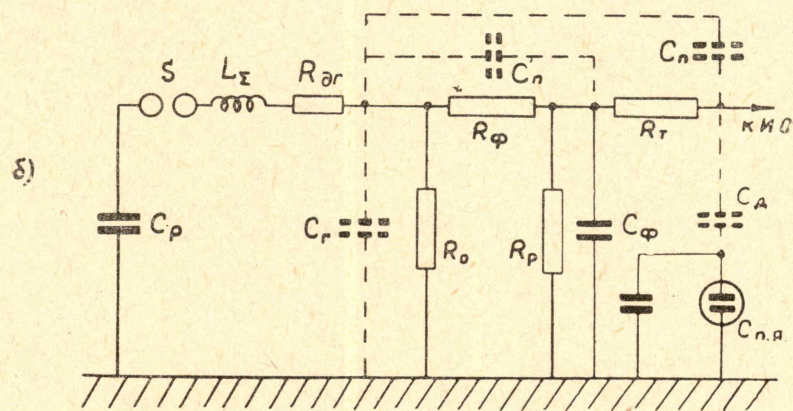
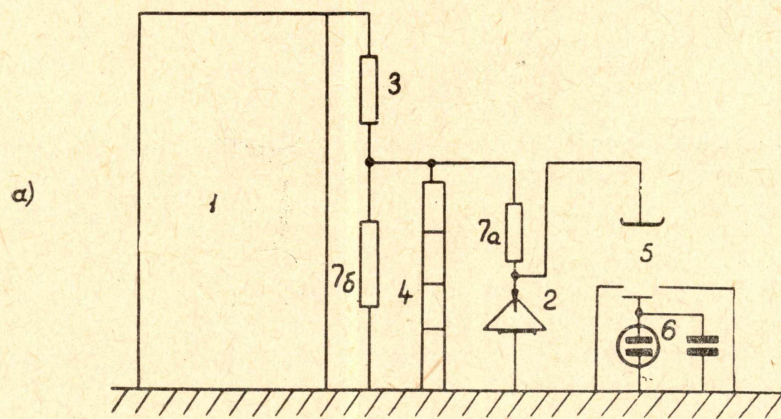


Рис. 3. Эскиз (а) и электрическая схема установки (б) [12].
 $7а$ — тормозное сопротивление — R_t
 $7б$ — разрядное сопротивление — R_p .

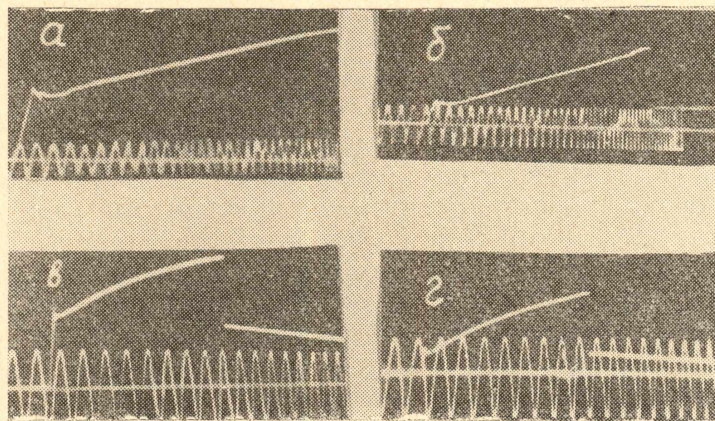


Рис. 4. Осциллограммы срезаемых волн напряжения с вытянутым фронтом при различных R_ϕ и расстояниях между ГИН и делителем напряжения [12].
 Частота калибровки 10^3 гц (а, б) и 10^5 гц (в, г),
 а, б — $R_\phi = 8$ ком, в, г — $R_\phi = 20$ ком; а, в — 4 м,
 б, г — 1,8 м.

n — число ступеней. При срабатывании первой ступени ГИН на делителе появляется напряжение

$$U_1 = U_0 \frac{c_1 + c'_1}{c_1 + C_d + c'_1 + C_\phi}, \quad (1)$$

где $U_0 \simeq U$ зарядному = U ступени и с условием, что для шин, соединяющих делитель, испытуемый объект и формирующие элементы можно полагать

$$R_{ш} = 0, \quad L_{ш} = 0, \quad (2)$$

$$C_{ио} \ll C_d \text{ и } C_\phi, \quad (3)$$

где $C_{ио}$ — емкость испытуемого объекта (ИО).

При срабатывании i -ой ступени к потенциалу делителя, фронтальной емкости и ИО добавляется

$$U_i = U_0 \frac{c_i + c'_i}{c_i + C_d + c'_i + C_\phi}. \quad (4)$$

После срабатывания последней ступени на делителе, фронтальной емкости и на ИО имеет место потенциал, равный сумме потенциалов, наведенных от всех ступеней:

$$U_d = U_0 \sum_{i=1}^{i=n} \frac{c_i + c'_i}{c_i + C_d + c'_i + C_\phi}. \quad (5)$$

Для одноступенчатой приведенной схемы ГИН (рис. 1, б) имеем

$$\sum_{i=1}^{i=n} (c_i + c'_i) = C_n + C'_n = C_{п_0}, \quad (6)$$

так как

$$c_i + c'_i \simeq c_{i+1} + c'_{i+1}, \quad (7)$$

где C_n и C'_n — паразитные емкости ГИН на делитель и элементы формирующей цепи, соответственно приведенные к одноступенчатой схеме.

$C_{п_0}$ — суммарная паразитная емкость ГИН на формирующее-измерительное устройство. Тогда

$$U_d = U_0 \frac{C_{п_0}}{c_i + C_d + c'_i + C_\phi}. \quad (8)$$

Как видно, U_d тем значительнее, чем больше $C_{п_0}$, т. е., в конечном счете, чем ближе ГИН к формирующе-измерительному устройству. Последнее наглядно иллюстрируется осциллограммами, представленными на рис. 4. Доля U_d в амплитуде импульса возрастает от 28%, при удалении делителя от ГИН на 4 м, до 54% — при удалении 1,8 м.

Согласно (8) U_d может быть пренебрежительно малым, если $c_i + C_\phi + c'_i + C_d \gg C_{п_0}$, но при выполнении условия (2).

В работе [12] $C_\phi = 4600 \text{ пф}$, а $C_{п_0}$ можно оценить в $100 \div 200 \text{ пф}$. Однако в рассматриваемой схеме (рис. 3, б) между C_ϕ и C_d включалось тормозное сопротивление $R_T = 15 \text{ ком}$, что препятствовало установлению на делителе и испытуемом объекте малого потенциала, соответствующего значению C_ϕ в выражении (8).

Таким образом, получение волн высокого напряжения с длительным косоугольным фронтом в помещении ограниченных размеров, с фронтальной емкостью, соизмеримой с паразитными емкостями между ГИН

и формирующе-измерительными устройствами, осложняется тем, что во время срабатывания ГИН на испытуемом объекте со скоростью, определяемой паразитными параметрами ГИН ($R_{п}, L_{п}, C_{п}$), устанавливается некоторый потенциал (8), и лишь после срабатывания последней ступени ГИН напряжение на И О растет со скоростью, соответствующей постоянной времени формирующей цепи $\tau_{ф} = R_{ф} \cdot C_{ф}$. При $\tau_{ф} \gg \tau(R_{п}, L_{п}, C_{п})$ и относительно большом значении предварительного потенциала $U_{д} - 15 \div 20\%$ и более — становится недопустимым искажение фронта импульса.

Для устранения искажения удлиненного фронта нами были предприняты опыты по увеличению времени срабатывания отдельных ступеней ГИН и, следовательно, всего ГИН в целом, для чего использовались паразитные емкости ступеней на землю. Если в расщелки ступеней ввести увеличенные демпфирующие сопротивления, то процесс срабатывания ступеней затянется до времени, пропорционального постоянной времени

$$\tau_i = R_{di} \cdot C_{pi},$$

где C_{pi} — паразитная емкость i -ой ступени.

Замедленному таким образом срабатыванию ГИН будет соответствовать замедленное в такой же мере возрастание предварительного потенциала $U_{д}$ на формирующе-измерительных устройствах и на И О. На рис. 1, б емкость $C_{г}$ эквивалентна суммарной паразитной емкости ступеней, $R_{дг}$ — сумме демпфирующих сопротивлений ступеней.

При $\tau_{г} = R_{дг} \cdot C_{г}$, соизмеримой с $\tau_{ф} = R_{ф} \cdot C_{ф}$, скорость наводки $U_{д}$ соизмерима со скоростью дозарядки $C_{ф}$, что способствует устранению искажения.

Ввиду известных трудностей в определении C_{pi} настройку ГИН на волну с косоугольным фронтом можно производить путем подбора соответствующих R_{di} . При этом нужно учитывать, что скорость сра-

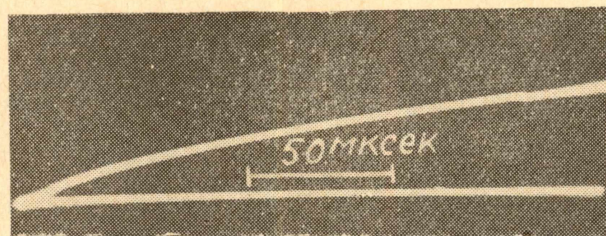


Рис. 5. Оциллограмма фронта косоугольной волны, полученного включением R_{di} в расщелки ступеней ГИН.

батывания ступеней, лежащих ближе к высоковольтному концу, больше скорости срабатывания более удаленных ступеней из-за больших напряжений на поджигающих шаровых промежутках. В соответствии с этим в расщелки ступеней, близких к высоковольтному концу ГИН, следует вводить большие демпфирующие сопротивления для выравнивания скоростей срабатывания ступеней ГИН.

В нашем случае (10-ступенчатый ГИН) удовлетворительные результаты дало включение R_{di} , находящихся в соотношении: 1:1:2:2:2:2:3:3:3:3 — начиная с первой ступени. На рис. 5 представлена оциллограмма фронта, полученного включением R_{di} в указанном соотношении ($R_{дг} = 45 \text{ ком}$) при $R_{ф} = 300 \text{ ком}$. Как видно, искажение фронта волны практически отсутствует:

Следует отметить, что при таком «переключении» части R_{ϕ} в рас-
сечки ГИН уменьшение коэффициента использования ГИН, вызывае-
мое большей частью ограниченным временем полуспада волны, сравни-
тельно невелико (табл. 1, $R_{\phi} = 0$).

U_0 (кв)	$R_{\partial r}$ (ком)	U_m (кв)	$\frac{U_m}{10U_0}$ (%)
122	0,4	1100	90
125	3,0	1050	84
125	100	* 1000	80

где U_0 — зарядное напряжение ГИН,
 U_m — амплитуда импульса.

Выводы

1. Рекомендуются использование уникальных действующих ГИН
высоковольтных испытательных лабораторий для воспроизведения ком-
мутационных воздействий на изоляцию аperiodической волной с косо-
угольным фронтом длительностью до 10^{-3} сек и более. При этом повы-
шается коэффициент использования дорогостоящего высоковольтного
оборудования.

2. Показано, что для устранения искажения фронта косоугольной
волны за счет возможных сильных емкостных связей между ГИН и
формирующе-измерительными устройствами целесообразно использова-
ние демпфирующих сопротивлений, соответственно распределенных по
ступеням ГИН.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Иванов, В. М. Нашатырь, И. Ф. Половой. Научно-технич. ин-
форм. бюлл. ЛПИ, 9, 77, 1958.
2. Р. Герт, Ю. Джирку, В. Колоусек, В. Вискосил. Энергетика за
рубежом. Уровни изоляции и внутренние перенапряжения в электрических системах,
55, М.—Л. ГЭИ, 1963.
3. Д. Г. Андерсон, Х. Е. Фигель, Д. Х. Хагенгут и А. Ф. Рольфс.
128, там же.
4. Vaatz H., Überspannungen in Energieversorgungsnetzen, Springer—Verlag,
Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1956.
5. Г. Н. Александров, В. Л. Иванов. Электричество, 9, 33, 1962.
6. С. Д. Мерхалев. Известия НИИПТ, 1, 199, 1957.
7. Jacottet P., ETZ—A 79, P. 337, 10, 1958.
8. И. С. Стекольников, Е. Н. Браго и Э. М. Базелян. ЖТФ, т. 32,
вып. 8, 1962.
9. В. С. Дмитриевский, А. А. Воробьев. Вестник электропромышлен-
ности, 7, 1960.
10. Б. Геллер и А. Веверка. Волновые процессы в электрических машинах,
438 М.—Л. ГЭИ, 1960.
11. Goosens R. F., Provoost P. G., Bul. Ass. Suisse El., S175, 1946.
12. А. В. Астафуров. Диссертация, Томск, 1958.