

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 $0,15 \div 25$ 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-

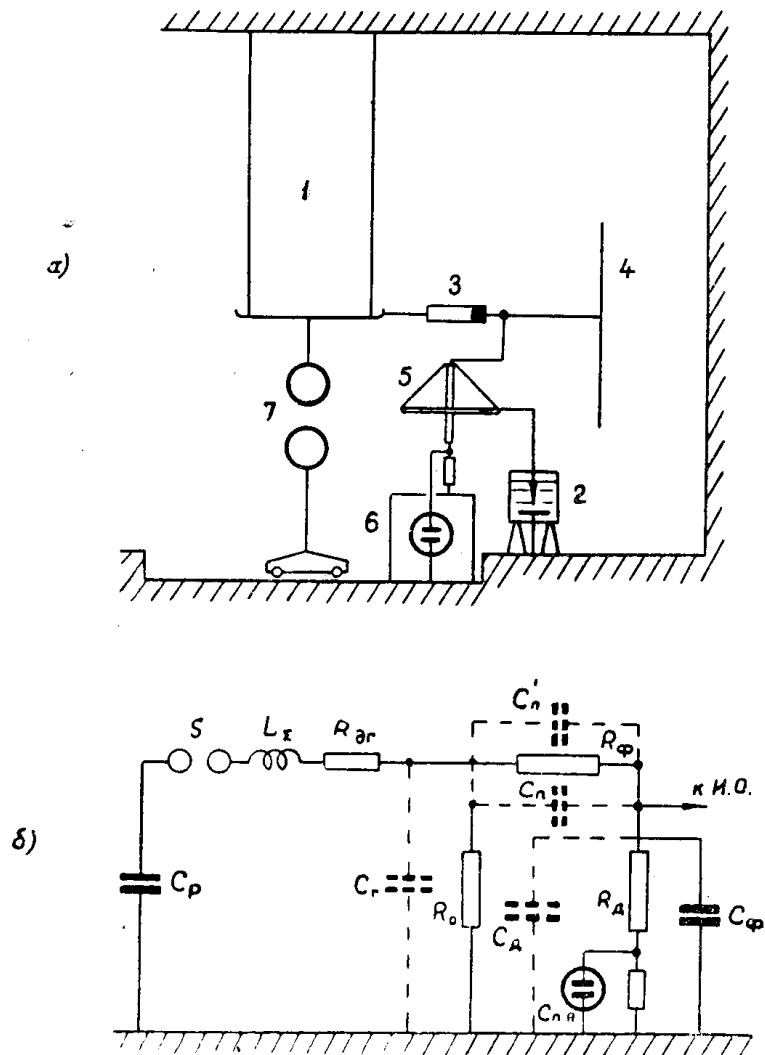


Рис. 1. Эскиз взаимного расположения элементов (а) и электрическая система испытательной установки, приведенной к одноступенчатому ГИН (б).

1 — собственно ГИН-3, 2 — испытуемый объект; 3 — фронтовое сопротивление — $R_{\text{ф}}$, 4 — фронтовая 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, $R_{\text{др}}$ — суммарное демпфирующее сопротивление ГИН, C_r — результирующая паразитная емкость элементов разрядного контура ГИН на землю, R_0 — результирующее разрядное сопротивление ГИН, без $R_{\text{ДН}}$, C_n и C'_n — паразитные емкости ГИН на делитель и элементы формирующей цепи, C_d — емкость делителя напряжения, $R_{\text{ДН}}$ — сопротивление делителя напряжения, $C_{\text{пн}}$ — 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.

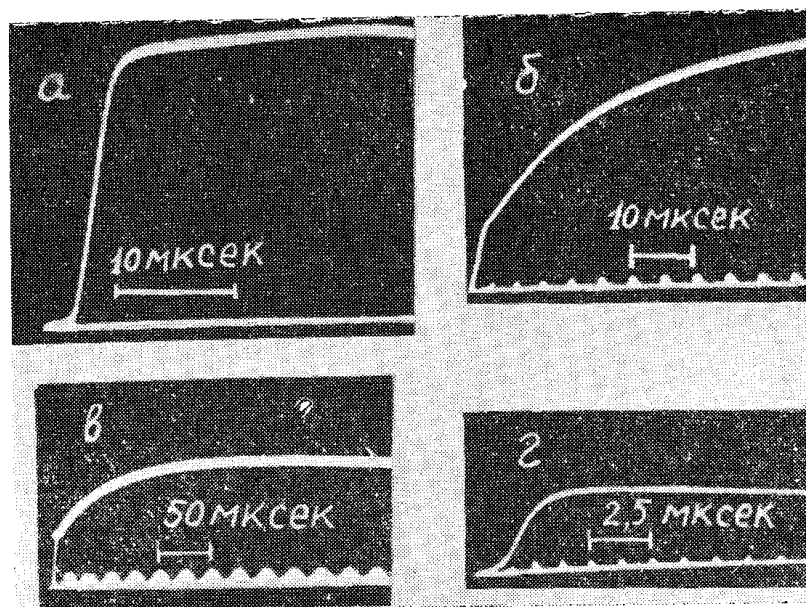


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения с удлинненным фронтом, полученных от ГИН-3 при включении R_{ϕ} различной величины: $U_{\text{зарядное}} = 90 \text{ кв}$, $R_{\text{дн}} = 500 \text{ ком}$.

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

На рис. 4 (а, б, в, г) представлены осциллограммы срезаанных 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 $i = 1 \div n$;

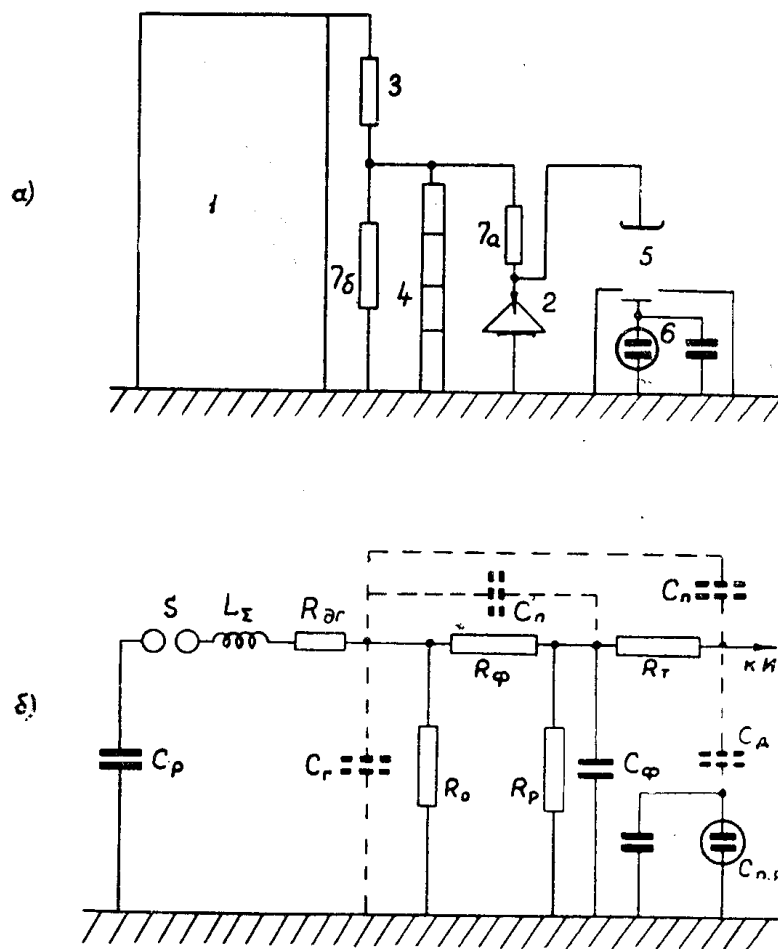


Рис. 3. Эскиз (а) и электрическая схема установки(б) [12].
 $7a$ — тормозное сопротивление — R_T
 $7б$ — разрядное сопротивление — R_p .

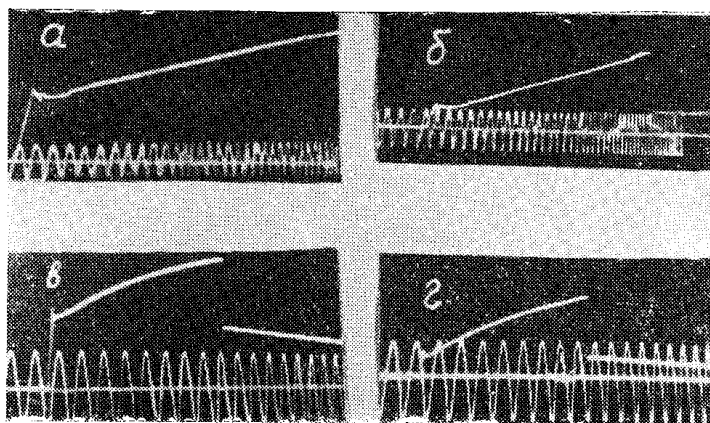


Рис. 4. Осциллограммы срезанных волн напряжения с вытянутым фронтом при различных R_{ϕ} и расстояниях между ГИН и делителем напряжения [12].
 Частота калибровки 10^3 гц (а, б) и 10^5 гц (в, г),
 а, б — $R_{\phi} = 8$ ком, в, г — $R_{\phi} = 20$ ком; а, в — 4 м,
 б, г — 1,8 м.

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, фронт-вой 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, фронт-вой 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 формирующе-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 фронт-вой 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_n, L_n, C_n), устанавливается некоторый потенциал (8), и лишь после срабатывания последней ступени ГИН напряжение на И О растет со скоростью, соответствующей постоянной времени формирующей цепи $\tau_\phi = R_\phi \cdot C_\phi$. При $\tau_\phi \gg \tau(R_n, L_n, C_n)$ и относительно большом значении предварительного потенциала U_d — 15 ÷ 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 рассечки 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_d на формирующе-измерительных устройствах и на И О. На рис. 1, б емкость C_r эквивалентна суммарной паразитной емкости ступеней, R_{dr} — сумме демпфирующих сопротивлений ступеней.

При $\tau_r = R_{dr} \cdot C_r$, соизмеримой с $\tau_\phi = R_\phi \cdot C_\phi$, скорость наводки U_d соизмерима со скоростью дозарядки C_ϕ , 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-

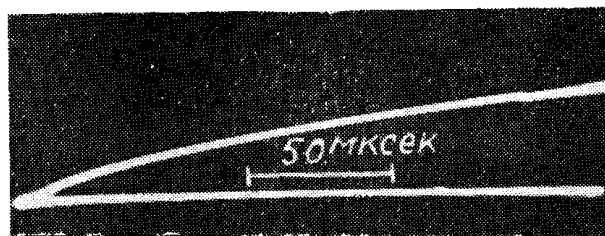


Рис. 5. Осциллограмма фронта косоугольной волны, полученного включением R_{di} в рассечки ступеней ГИН.

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 рассечки 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 осциллограмма фронта, полученного включением R_{di} в указанном соотношении ($R_{dr} = 45 \text{ ком}$) при $R_\phi = 300 \text{ ком}$. 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. Рекомендуется использование уникальных действующих ГИН
высоковольтных испытательных лабораторий для воспроизведения ком-
мутационных воздействий на изоляцию апериодической 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. Baatz 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.