

Определение параметров ударного трансформатора для испытаний на стойкость к токам короткого замыкания

БЕШЕНЦЕВ Н.А., ЛАРИН В.С., МИЛКИН Е.А., ТИМОХИН Д.А.

ВЭИ – филиал РФЯЦ-ВНИИТФ, Москва, Россия

Работа направлена на развитие отечественной экспериментальной базы больших мощностей. Приведены результаты исследований по определению технических характеристик специального испытательного трансформатора, входящего в схему ударного генератора ТИ-100-2 и предназначенного для существенного увеличения возможностей экспериментальной базы по проведению испытаний высоковольтного оборудования на динамическую и термическую стойкость к токам короткого замыкания. Выполнен анализ индуктивных нагрузок основных видов объектов испытаний: выключателей, разъединителей, КРУЭ, малоиндуктивных и индуктивных трансформаторов тока, генераторных токопроводов и ошиновок ОРУ. Проведены расчеты испытательного тока в зависимости от коэффициента трансформации испытательного трансформатора при изменении индуктивного сопротивления основных видов объектов испытаний с учетом внутреннего ограничения по термической и динамической стойкости ударного генератора ТИ-100-2. Установлен диапазон изменения коэффициента трансформации специального испытательного трансформатора, применение которого позволит поднять испытательные возможности отечественной экспериментальной базы.

Ключевые слова: экспериментальная база, ударный генератор, ударный трансформатор, динамическая стойкость, термическая стойкость, ток короткого замыкания

Для устойчивого развития электроэнергетической отрасли и создания надежного отечественного высоковольтного электротехнического оборудования (ЭТО) необходима современная испытательная лабораторная база, обеспечивающая весь комплекс испытаний, в том числе высокими напряжениями и токами. При этом для проведения испытаний ЭТО важную роль играет разработка новых и расширение области применения существующих специализированных испытательных установок.

При испытаниях ЭТО на стойкость при коротких замыканиях (КЗ), как правило, используют стенды большой мощности, включающие импульсный источник большой мощности (ударный генератор), вспомогательное оборудование испытательной схемы, а также систему управления и измерений. Ключевым параметром стендов является максимальный ток, который может быть достигнут при проведении испытаний на стойкость при КЗ.

Развитие электроэнергетики и систем генерации, передачи и распределения электрической энергии неразрывно связано с ростом мощности и токов КЗ в электрических сетях. В последние десятилетия отмечается значительное увеличение требуемых параметров при испытаниях на стойкость при КЗ, что требует увеличения выходных токов испытательных стендов большой мощности. В ответ на это ведущие мировые

испытательные лаборатории больших мощностей проводят модернизацию с увеличением количества и мощности установленных ударных генераторов. Например, в 2017 г. лаборатория больших мощностей *KEMA* (Нидерланды) ввела в работу два новых ударных генератора мощностью К3 2500 МВ·А, увеличив суммарную установленную мощность ударных генераторов до 15 ГВ·А [1, 2]. Незадолго до этого масштабную реконструкцию завершила лаборатория *XIHARI* (Китай), где установленная мощность ударных генераторов была увеличена на 13 ГВ·А за счет ввода в работу двух новых сверхмощных ударных генераторов 6500 МВ·А.

При испытаниях на термическую и электродинамическую стойкость при КЗ объектов, имеющих сравнительно небольшое индуктивное сопротивление (генераторных выключателей и токопроводов, ошиновок и трансформаторов тока), альтернативой увеличению мощности ударных генераторов является применение специальных ударных трансформаторов, повышающих ток генератора.

Статья посвящена возможности увеличения испытательных токов стендов на базе ударного генератора ТИ-100-2 (распространен в РФ) мощностью К3 2500 МВ·А путем применения специального испытательного ударного трансформатора. Ударные генераторы мощностью 2500 МВ·А применяются в лабораториях Нидерландов, Испании, Чехии, Швеции, Китая, Японии, Индии и других стран.

Развитие отечественной испытательной базы.

Начатое в середине 1930-х гг. бурное развитие отечественного высоковольтного ЭТО сопровождалось созданием экспериментальной базы, способной проводить исследования и испытания широкого спектра высоковольтной аппаратуры [3, 4]. Одним из уникальных элементов этой базы стал сооруженный во Всесоюзном электротехническом институте (ВЭИ) «Стенд разрывной мощности» с ударным генератором ТИ-12 с мощностью КЗ 250 МВ·А [5]. Стенд позволял в режиме КЗ получать ток 20 кА при напряжении 6 кВ. Это давало возможность проводить исследования и испытания коммутационной аппаратуры на отключающую способность [6–9]. Технический прогресс требовал постоянного расширения и усовершенствования экспериментальной базы. В 1950–1970-е гг. на базе ВЭИ были введены в работу колебательный контур 2,5 МДж (50 Гц), ударный генератор ТИ-100-2 и синтетическая схема 250 кВ, 100 кА.

В наши дни мощный испытательный стенд ВЭИ уже не полностью отвечает современным потребностям [10–13]. Испытания оборудования на стойкость к токам КЗ на стенде ударного генератора ТИ-100-2 (рис. 1) ограничены предельным током термической стойкости 40 кА в течение 1 с при малых индуктивных нагрузках ($X_{\text{но}} \leq 1,0 \text{ мОм}$), что является недостаточным.

Индуктивные сопротивления испытательной схемы и объектов испытаний. На рис. 2 приведена упрощенная схема замещения генератора ТИ-100-2 и основных элементов испытательной схемы. Испытательная схема представляет собой набор преимущественно индуктивных нагрузок, при этом активные сопротивления в большинстве случаев пренебрежимо малы [14, 15].

Рассмотрим характерные значения индуктивных элементов схемы (рис. 2). В табл. 1 представлены типичные индуктивные нагрузки основных видов испытуемого оборудования.

Коэффициент трансформации испытательного трансформатора K_t принимается равным отношению линейного напряжения холостого хода (ХХ) вторичной обмотки трансформатора, к которой подключен объект



Рис. 1. Ударный генератор ТИ-100-2

Fig. 1. Short-circuit generator TI-100-2

испытаний, к линейному напряжению ХХ первичной обмотки, подключенной к ударному генератору.

Расчетные значения индуктивного сопротивления объекта испытаний, приведенные к стороне генератора ($X_{\text{но(прив)}} = X_{\text{но}}/K_t^2$), в зависимости от коэффициента трансформации испытательного трансформатора K_t представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что индуктивное сопротивление объекта испытаний, приведенное к стороне генератора

Таблица 1

Характерные индуктивные сопротивления объектов испытаний

Typical values of test object reactances

Объект испытаний	Индуктивная нагрузка $X_{\text{но}}$, мОм	Испытательный ток, кА
Выключатель	2,6–3,0	50–63
Разъединитель	2,3–2,9	50–63
КРУЭ	2,9–3,2	50–63
Трансформатор тока малониндуктивный	1,3–2,0	50–63
Трансформатор тока индуктивный	4,6–5,2	50–63
Токопровод генераторный	2,6–3,3	50–63
Ошиновка ОРУ	около 10	50–63

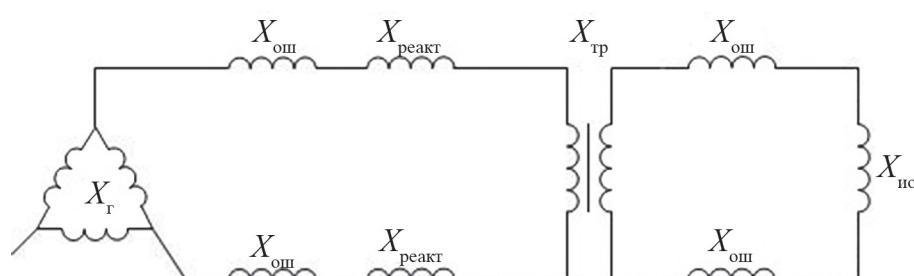


Рис. 2. Упрощенная схема стенда на базе ударного генератора ТИ-100-2: X_g , X_{osh} и $X_{\text{реакт}}$ – индуктивное сопротивление генератора, ошиновки и реакторов; X_{tp} – индуктивное сопротивление ударного трансформатора; $X_{\text{но}}$ – индуктивное сопротивление объекта испытаний

Fig. 2. Simplified diagram of the TI-100-2 short-circuit generator: X_g , X_{osh} and $X_{\text{реакт}}$ – reactance of the generator, busbars and reactors; X_{tp} – reactance of short-circuit transformer; $X_{\text{но}}$ – reactance of the test object

Таблица 2

Индуктивное сопротивление объекта испытаний, приведенное к стороне генератора
Equivalent reactance of test object at the generator side

K_r отн.ед.	X_{no} , мОм						
	0,5	1	2	5	10	20	40
	X_{on} , приведенное к стороне генератора, мОм						
1,00	0,50	1,00	2,00	5,00	10,0	20,0	40,0
0,60	1,39	2,78	5,56	13,9	27,8	55,6	111,1
0,40	3,13	6,25	12,5	31,3	62,5	125	250
0,20	12,5	25,0	50,0	125	250	500	1000
0,10	50,0	100	200	500	1000	2000	4000
0,05	200	400	800	2000	4000	8000	16000

ра, существенным образом зависит от коэффициента трансформации испытательного ударного трансформатора.

Сопротивление КЗ двухобмоточного трансформатора определяется как [16, 17]:

$$X_{tp} = \frac{u_k}{100} \frac{U_{bh}^2}{S_{nom}}. \quad (1)$$

Значения сопротивления КЗ испытательного трансформатора при напряжении стороны ВН ударного трансформатора $U_{bh} = 12$ кВ в зависимости от его мощности при минимально возможном значении $u_k = 1,5$ % представлены в табл. 3.

Из сопоставления данных табл. 1–3 видно, что чем больше мощность испытательного трансформатора, тем меньше его сопротивление КЗ ограничивает ток в объекте испытаний. Особенно это проявляется по мере снижения коэффициента трансформации K_r .

Расчет испытательного тока. Испытательный ток в зависимости от коэффициента трансформации испытательного трансформатора и параметров схемы определяется как [14]:

$$I_{K3} = \frac{I_r}{(X_r + 4X_{on} + 2X_{peak} + X_{tp} + X_{no(\text{прив})})K_{tp}}. \quad (2)$$

Используя данные по приведенным к стороне генератора значениям индуктивных параметров схемы по рис. 2 и характерные значения сопротивлений генератора и ошиновки ($X_r = 45,4$ мОм и $X_{on} = 9,2$ мОм), были

определены значения испытательных токов по (2). Результаты расчетов испытательного тока I_{K3} в зависимости от коэффициента трансформации испытательного трансформатора K_r при изменении индуктивного сопротивления объекта испытаний X_{no} от 0,5 до 40 мОм приведены в табл. 4.

Приведенные в табл. 4 данные свидетельствуют о существенном влиянии сопротивления испытуемого объекта и коэффициента трансформации испытательного трансформатора на наибольшее достижимое значение испытательного тока.

Длина ошиновки оказывает сильное влияние на предельные значения тока КЗ (см. (2)), в связи с чем рассматриваемый ударный трансформатор целесообразно размещать в непосредственной близости от ударного генератора [15].

Приведенные в табл. 4 значения не учитывают ограничения по току термической стойкости ударного генератора. Для генератора ТИ-100-2 предельно допустимый односекундный ток КЗ составляет 40 кА [6]. На рис. 3 приведены зависимости допустимых токов КЗ от сопротивления нагрузки, скорректированные с учетом ограничения по термической стойкости генератора. Ограничениями по термической стойкости являются односекундный ток КЗ 40 кА, принимаемый допустимым в течение рабочей смены испытаний, и односекундный ток КЗ 60 кА, принимаемый допустимым для первых опытов КЗ до нагрева генератора.

На рис. 4 приведены зависимости испытательного тока от коэффициента трансформации испытательного

Таблица 3

Сопротивление короткого замыкания испытательного трансформатора
Short-circuit impedance of the test transformer

Параметр	Значение				
Условная номинальная мощность S_{nom} , МВ·А	100	200	300	400	500
Напряжение КЗ u_k , %	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Индуктивное сопротивление трансформатора X_{tp} , мОм	21,6	10,8	7,2	5,4	4,32

Таблица 4

Предельные значения испытательного тока в зависимости от коэффициента трансформации

испытательного трансформатора и индуктивного сопротивления объекта испытаний

Limit values of the test current depending on the turn ratio of the test transformer and the reactance of the test object

K_t , отн.ед.	X_{ho} , мОм						
	0,5	1	2	5	10	20	40
	Расчетный испытательный ток I_{k3} , кА, при $K_t \leq 1,0$						
1,00	97,9	97,2	95,8	92,0	86,3	76,7	62,8
0,60	161	158	152	137	118	91,8	63,7
0,40	236	226	209	171	130	88,7	54,1
0,20	418	363	288	177	108	60,7	32,4
0,10	576	407	256	121	64,7	33,5	17,0
0,05	513	295	159	66,9	34,0	17,2	8,62

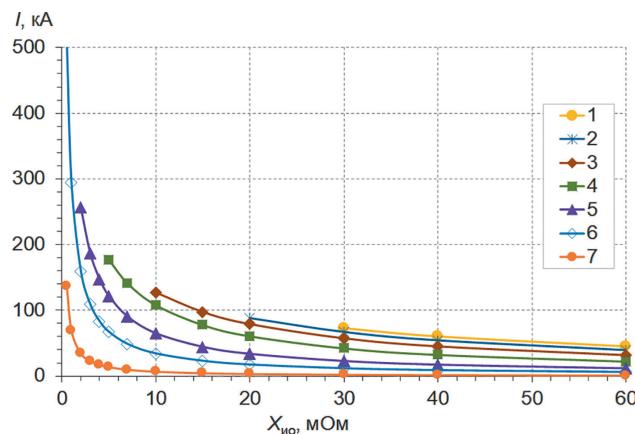


Рис. 3. Допустимые значения токов КЗ, ограниченных термической стойкостью генератора, в зависимости от сопротивления нагрузки: 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 – $K_t = 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0,05$ и $0,01$ соответственно

Fig. 3. Permissible values of short-circuit currents limited by the thermal durability of the generator, depending on the load reactance: 1, 2, 3, 4, 5, 6 and 7 – $K_t = 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0,05$ and $0,01$ correspondingly

трансформатора при различных значениях нагрузок, скорректированные с учетом ограничения по термической стойкости генератора односекундными токами 40 и 60 кА.

Из приведенных на рис. 4 зависимостей видно, что только при коэффициенте трансформации $K_t \leq 0,4$ (ниже кривой ограничения односекундным током 40 кА) возможно получение испытательного тока выше 100 кА. Для этой области K_t были выполнены дополнительные расчеты испытательных токов, результаты которых представлены в табл. 5 и 6 и на рис. 5 и 6.

Из рис. 5 и 6 и табл. 6 следует, что для аппаратов с индуктивным сопротивлением менее 5 мОм целесообразно использовать ударный трансформатор с коэффициентом трансформации 0,165–0,2. В этом случае можно обеспечить испытания аппаратов термическим током 150–200 кА при токе ударного генератора до 40 кА, что требуется в [10, 11]. Для аппаратов с относительно большим индуктивным сопротивлением (10–20 мОм) напротив: для увеличения испытательного тока необ-

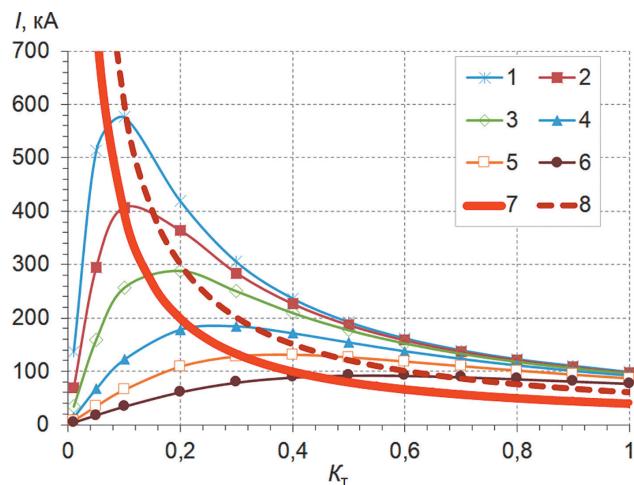


Рис. 4. Зависимости испытательного тока от коэффициента трансформации испытательного трансформатора при различных значениях нагрузки, скорректированные с учетом ограничения по термической стойкости генератора: 1, 2, 3, 4, 5 и 6 – $X_{ho} = 0,5; 1; 2; 5; 10$ и 20 мОм соответственно; 7 и 8 – ограничение по току термической стойкости 40 и 60 кА (1 с)

Fig. 4. Dependences of the test current versus the test transformer turn ratio at different load values, adjusted for the limitation on the thermal durability of the short-circuit generator: 1, 2, 3, 4, 5 and 6 – $X_{ho} = 0,5; 1; 2; 5; 10$ and 20 mΩ correspondingly; 7 and 8 – limit values of the thermal durability current 40 and 60 kA (1 s)

ходимо использовать ударный трансформатор с коэффициентом трансформации более 0,3.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наиболее эффективное использование специального испытательного трансформатора обеспечивается при переменном коэффициенте трансформации от 0,17 до 0,4. При этом условная номинальная мощность трансформатора должна быть не ниже 200 МВ·А при напряжении КЗ не более 1,5 %.

Выводы. Применение специального испытательного трансформатора с переменным понижающим коэффициентом трансформации K_t от 0,17 до 0,4 позволяет существенно увеличить испытательные мощности экспериментального стенда с генератором ТИ-100-2 и удовлетворить современные потребности в проведении испытаний основных видов электрооборудования

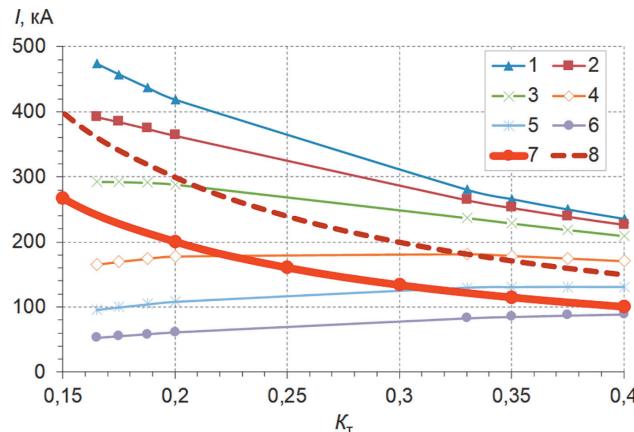


Рис. 5. Зависимости испытательного тока от коэффициента трансформации испытательного трансформатора ($0,165 \leq K_t \leq 0,4$) при различных значениях нагрузок, скорректированные с учетом ограничения по термической стойкости генератора: односекундными токами 40 и 60 кА: 1, 2, 3, 4, 5 и 6 – $X_{\text{ио}} = 0,5$; 1; 2; 5; 10 и 20 мОм соответственно; 7 и 8 – ограничение по току термической стойкости 40 кА и 60 кА (1 с)

Fig. 5. Dependences of the test current on the turn ratio to the test transformer ($0,165 \leq K_t \leq 0,4$) at different load values, adjusted taking into account the limitation on the thermal durability of the short-circuit generator: 1, 2, 3, 4, 5 and 6 – $X_{\text{ио}} = 0,5$; 1; 2; 5; 10 and 20 mΩ correspondingly; 7 and 8 – limit values of the thermal durability current 40 kA and 60 kA (1 s)

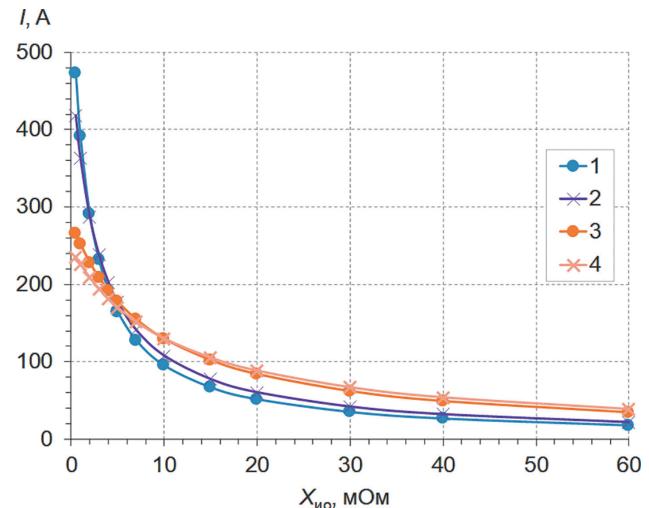


Рис. 6. Зависимости испытательного тока от сопротивления нагрузки при коэффициенте трансформации испытательного трансформатора с учетом ограничения по термической стойкости генератора: 1, 2, 3 и 4 – $K_t = 0,165$; 0,2; 0,35 и 0,4 соответственно

Fig. 6. Dependences of the test current on the impedance of the load at the turn ratio of the test transformer, taking into account the limitation on the thermal durability of the short-circuit generator: 1, 2, 3 and 4 – $K_t = 0,165$; 0,2; 0,35 and 0,4 correspondingly

Таблица 5

Значения испытательного тока в зависимости от коэффициента трансформации испытательного трансформатора $0,165 \leq K_t \leq 0,4$ и изменении индуктивного сопротивления объекта испытаний
The values of the test current depending on the turn ratio of the test transformer $0,165 \leq K_t \leq 0,4$ and the reactance of the test object

K_t , отн.ед.	Расчетный испытательный ток $I_{\text{кз}}$, кА, при $0,165 \leq K_t \leq 0,4$						
	0,5	1	2	5	10	20	40
	X _{ио} , мОм, при $K_t = 1,0$						
0,165	474	392	292	165	96,0	52,1	27,3
0,175	457	385	292	170	99,8	54,7	28,8
0,200	418	363	288	177	108	60,7	32,4
0,330	280	264	237	181	129	82,7	48,0
0,350	266	252	229	178	130	84,8	49,9
0,400	236	226	209	171	130	88,7	54,1

Таблица 6

Допустимые значения испытательных токов с учетом ограничений по термической стойкости ударного генератора

Permissible values of the test currents, taking into account the limitations on the thermal durability of the short-circuit generator

Параметр	Значение							
	0,165	0,175	0,1875	0,2	0,33	0,35	0,375	0,4
Максимально допустимый испытательный ток, кА, при ограничении тока генератора:								
40 кА	242	229	213	200	121	114	107	100
60 кА	364	343	320	300	182	171	160	150

на их динамическую и термическую стойкость к токам КЗ.

С учетом ограничения по термической стойкости обмотки генератора ТИ-100-2 односекундными токами 40 и 60 кА допустимые испытательные токи при значениях коэффициента трансформации испытательного трансформатора $K_t \leq 0,4$ многократно возрастают и достигают наибольших значений при типичных сопротивлениях объектов испытаний $X_{\text{но}} \leq 15$ мОм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smeets R.P.P., Hofstee A., Dekker M. Development of Synthetic Test Methods for High-Voltage Circuit Breakers 145–1200 kV. – 4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST), Xi'an, China, 2017, pp. 813–820, DOI: 10.1109/ICEPE-ST.2017.8188964.
2. Belda N.A., Smeets R.P.P. Test Circuits for HVDC Circuit Breakers. – IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, vol. 32, No. 1, pp. 285–293, DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2567783.
3. К 85-летию ВЭИ: сборник научных трудов / Под ред. В.Д. Ковалева. М.: Знак, 2006, 236 с.
4. Травин Л.В. Флагман отечественной электротехники: 90 лет ФГУП ВЭИ. М.: Три квадрата, 2011, 341 с.
5. 100 лет ВЭИ / под ред. Л.В. Травина, Е.В. Басова. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2021, 370 с.
6. Федченко И.К. Техника высоких напряжений. Киев: Вища школа, 1969, 544 с.
7. Каплан В.В. Колебательный контур А.А. Горева для испытания аппаратов высокого напряжения. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960, 216 с.
8. Дмоховская Л.Ф. и др. Техника высоких напряжений / Под ред. Д.В. Разевига. М.: Энергия, 1976, 488 с.
9. Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J. High Voltage Engineering: Fundamentals. Newnes, 2000, 560 p.
10. IEEE C37.23-2015. IEEE Standard for Metal-Enclosed Bus, 2016, DOI: 10.1109/IEEESTD.2016.7470712.
11. IEEE/IEC 62271-37-013-2021. High-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 37-013: Alternating Current Generator Circuit-Breakers, 2021, DOI: 10.1109/IEEESTD.2021.9586449.
12. IEC 62271-100: 2021. High-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100; Alternating-Current Circuit-Breakers, 2021, 600 p.
13. IEC 62271-101: 2021. High-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 101; Synthetic Testing, 2021.
14. ГОСТ Р 52736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. М.: Стандартинформ, 2007, 41 с.

15. Бугреев В.А. и др. Электрические машины. Ч. 2: Машины переменного тока. М.: МИИТ, 2019, 61 с.

16. ГОСТ Р 55188-2012 (МЭК 60076-5:2006). Трансформаторы силовые. Стойкость к коротким замыканиям. М.: Стандартинформ, 2014, 28 с.

17. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986, 528 с.

Поступила в редакцию [24.01.2023]
Принята к публикации [25.05.2023]

Авторы:



Бешенцев Николай Александрович – ведущий инженер-испытатель, Всероссийский электротехнический институт (ВЭИ) – филиал ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина» (РФЯЦ-ВНИИТФ), Москва, Россия.



Ларин Василий Сергеевич – кандидат техн. наук, начальник отдела исследований и испытаний трансформаторов, ВЭИ – филиал РФЯЦ-ВНИИТФ, Москва, Россия.



Милкин Евгений Александрович – заместитель директора – начальник испытательного центра, ВЭИ – филиал РФЯЦ-ВНИИТФ, Москва, Россия.



Тимохин Дмитрий Алексеевич – инженер-испытатель, ВЭИ – филиал РФЯЦ-ВНИИТФ, Москва, Россия.

Determination of Shock Transformer Parameters for Short-Circuit Current Withstand Tests

BESHENTSEV Nikolay A. (*All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of FSUE "RFNC-VNIITF n.a. academ. E.I. Zababakhin", Moscow, Russia*) – Lead Test Engineer.

LARIN Vasiliy S. (*All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of FSUE "RFNC-VNIITF n.a. academ. E.I. Zababakhin", Moscow, Russia*) – Head of the Transformer Dept., Cand. Sci. (Eng.).

MILKIN Evgeniy A. (*All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of FSUE "RFNC-VNIITF n.a. academ. E.I. Zababakhin", Moscow, Russia*) – Deputy Director of VEI, Head of Research and Testing of High-Voltage Equipment Division

TIMOHIN Dmitriy A. (*All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of FSUE "RFNC-VNIITF n.a. academ. E.I. Zababakhin", Moscow, Russia*) – Test Engineer.

The work is aimed at developing the domestic experimental base of large capacities. The article presents the results of studies on determining the technical characteristics of a dedicated test transformer included in the circuit of the TI-100-2 shock generator and intended for significantly increasing the capabilities of the experimental base for testing high-voltage equipment for peak and short-term withstand short-circuit currents. The study included an analysis of inductive loads of the main types of equipment tested: circuit breakers, disconnectors, gas insulated switchgears, low-inductive and inductive current transformers, generator bus ducts, and outdoor switchgear busbars. Test current values are calculated depending on the test transformer transformation ratio in varying the inductive reactance of the main types of equipment tested, taking into account the TI-100-2 shock generator internal limitation in terms of peak and short-term current. The variation range of the dedicated test transformer transformation ratio has been determined, the use of which will make it possible to enhance the domestic experimental base testing capabilities.

Key words: experimental base, shock generator, shock transformer, peak withstand current, short-term withstand current, short-circuit current

REFERENCES

1. **Smeets R.P.P., Hofstee A., Dekker M.** Development of Synthetic Test Methods for High-Voltage Circuit Breakers 145–1200 kV. – 4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST), Xi'an, China, 2017, pp. 813–820, DOI: 10.1109/ICEPE-ST.2017.8188964.
2. **Belda N.A., Smeets R.P.P.** Test Circuits for HVDC Circuit Breakers. – IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, vol. 32, No. 1, pp. 285–293, DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2567783.
3. **K 85-letiyu VEI: sbornik nauchnyh trudov** (To the 85th Anniversary of the VEI: Collection of Scientific Papers)/ Ed. by V.D. Kovalev. M: Znak, 2006, 236 p.
4. **Travin L.V. Flagman otechestvennoy elektrotehniki: 90 let FGUP VEI** (Flagship of Domestic Electrical Engineering: 90 Years of FSUE VEI). M.: Tri kvadrata, 2011, 341 p.
5. **100 let VEI** (100 years of VEI)/ Ed. by L.V. Travin, E.V. Basov. Snezhinsk: Izd-vo RFYATS- VNIITF, 2021, 370 p.
6. **Fedchenko I.K.** *Tekhnika vysokih napryazheniy* (High Voltage Technology). Kiev: Vishcha shkola, 1969, 544 p.
7. **Kaplan V.V. Kolebatel'nyy kontur A.A. Goreva dlya ispytaniya apparatov vysokogo napryazheniya** (Gorev's Oscillatory Circuit for Testing High Voltage Devices). M.-L.: Gosenergoizdat, 1960, 216 p.
8. **Dmohovskaya L.F. et al.** *Tekhnika vysokih napryazheniy* (High Voltage Technology) / Ed. by D.V. Razevig. M.: Energiya, 1976, 488 p.
9. **Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J.** *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Newnes, 2000, 560 p.
10. **IEEE C37.23-2015.** IEEE Standard for Metal-Enclosed Bus, 2016, DOI: 10.1109/IEEEESTD.2016.7470712.
11. **IEEE/IEC 62271-37-013-2021.** High-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 37-013: Alternating Current Generator Circuit-Breakers, 2021, DOI: 10.1109/IEEEESTD.2021.9586449.
12. **IEC 62271-100: 2021.** High-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: Alternating-Current Circuit-Breakers, 2021, 600 p.
13. **IEC 62271-101: 2021.** High-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 101; Synthetic Testing, 2021.
14. **GOST R 52736-2007.** *Korotkie zamykaniya v elektrostanovkah. Metody rascheta elektrodinamicheskogo i termicheskogo deystviya toka korotkogo zamykaniya* (Short-Circuits in Electrical Installations. Calculation Methods of Electrodynamics and Thermal Effects of Short-Circuit Current). M.: Standartinform, 2007, 41 p.
15. **Bugreev V.A. et al.** *Elektricheskie mashiny. Ch. 2: Mashiny peremennogo toka* (Electric Machines. Part 2: AC Machines). M.: MIIT, 2019, 61 p.
16. **GOST R 55188-2012 (MEK 60076-5:2006).** *Transformatory silovye. Stoykost' k korotkim zamykaniyam* (Power Transformers. Ability to Withstand Short Circuits). M.: Standartinform, 2014, 28 p.
17. **Tihomirov P.M.** *Raschet transformatorov* (Calculation of Transformers). M.: Energoatomizdat, 1986, 528 p.

*Received [24.01.2023]
Accepted [25.05.2023]*