

14. Gundareva S.V., Kalugina I.Ye., Gerastenok T.K., Temnikov A.G. *Metodika rascheta porazhayemosti molniyei nazemnykh vzryvoopasnykh ob'yektov* (Method of calculation affection lightning ground explosive objects). — Proc. of IV Intern. Conf. on Lightning Protection, St. Petersburg, 2014, pp. 42–50.

15. Temnikov A.G., Gundareva S.V., Kalugina I.Ye., Gerastenok T.K. *Pis'ma v ZhTF — in Russ. (Letters to the Technical Physics Journal)*, 2014, vol. 40, No. 3, pp. 42–48.

16. *Instruktsiya po primeneniyu skhem provetrivaniya vyyemochnykh uchastkov shakht s izolirovannym otvodom metana iz vyrabotannogo prostranstva s pomoshch'yu gazootsasyvayushchikh*

*ustanovok* (Instructions for use schemes airing exvation sites mines insulated tap methane using plants for removing gas). Series 05. Iss. 21. Moscow. JSC «Scientific and Technical Research Centre of Industrial Safety Problems», 2012, 128 p.

17. *Instruktsiya po proektirovaniyu, stroitel'stvu i ekspluatatsii nazemnoi gazootsasyvayushchei ventilyatornoi ustanovki na ugol'nykh shakhtakh Kuzbassa* (Instructions for design, constraxtion and operation of the ground ventilator installation in coal mines in Kuzbass). Kemerovo: PC «Scientific — Production Enterprise «Shahtpozhservis», 2005, 44 p.

\* \* \*

*Электричество*, 2016, № 10, с. 24–27.

## Электрическая прочность макета воздушно-барьерной главной изоляции обмоток сухого трансформатора при воздействии напряжения полного грозового импульса

ЛАРИН В.С., ДАНИШИНА А.А., СВИРИДОВ М.А.

*Представлены результаты исследований электрической прочности воздушно-барьерной изоляции, выполненных на масштабном макете главной изоляции обмоток сухого трансформатора высокого напряжения при воздействии напряжения полного грозового импульса отрицательной и положительной полярности. Сделано сравнение импульсной электрической прочности изоляции с прочностью при воздействии переменного напряжения и определены значения коэффициента импульса. Предложен инженерный метод расчета электрической прочности главной изоляции сухих трансформаторов при воздействии полного грозового импульса, основанный на определении эквивалентной длины изоляционного промежутка и дальнейшем применении для него известных зависимостей разрядных напряжений для промежутков «стержень—стержень».*

*Ключевые слова: сухой трансформатор, воздушно-барьерная изоляция, электрическая прочность, грозовой импульс, исследования*

В [1] были представлены результаты исследований электрической прочности макета воздушно-барьерной изоляции и предложен подход к оценке электрической прочности воздушно-барьерной изоляции сухих трансформаторов при воздействии кратковременного переменного напряжения.

Согласно национальным нормативным документам [2–4] применительно к сухим силовым трансформаторам помимо испытаний кратковременным переменным напряжением нормированы испытания напряжением полного и срезанного грозового импульса (ПГИ, СГИ) как положительной, так и отрицательной полярности. Отношение испытательных напряжения полного грозового импульса и амплитудного значения кратковременного переменного напряжения, нормированных в указанных стандартах, для классов напряжения 10 кВ и выше составляет  $1,6 \div 1,9$ . Это вызвано, главным образом, учетом при координации изоляции и нормировании испытательных напряжений импульсной прочности масляных трансформаторов и коэффициента импульса маслобарьерной изоляции, принятого равным 1,9. Применительно к сухим трансформаторам с воздушной главной изоляцией

коэффициент импульса, определяемый как отношение напряжения полного разряда при воздействии ПГИ к амплитудному значению напряжения полного разряда при воздействии переменного напряжения, существенно меньше 1,6, и потому для сухих трансформаторов определяющим при выборе главной изоляции, как правило, является напряжение ПГИ. Это делает вопрос определения импульсной прочности воздушной изоляции одним из ключевых на стадии проектирования изоляции сухих трансформаторов.

В статье представлены результаты исследований электрической прочности макета главной изоляции обмоток при воздействии напряжения полного грозового импульса положительной и отрицательной полярности.

**Объект и методика исследований.** Исследования проведены на масштабном макете воздушно-барьерной изоляции [1], имитирующем главную изоляцию между обмотками высшего и низшего напряжений (ВН и НН) сухого трансформатора высокого напряжения.

Исследования проведены для двух значений расстояния между обмотками  $S$ , равных 100 и 150 мм,

при вылете барьера над обмотками С, равном 100, 50, 30 и 0 мм (обмотки НН и ВН во всех случаях находились на одном уровне по высоте).

Исследования электрической прочности изоляции проводились при воздействии напряжения стандартного ПГИ с длительностью фронта 1,2 мкс и длительностью импульса 50 мкс («1,2/50») положительной и отрицательной полярности.

Для оценки значения 50%-го разрядного напряжения  $U_{50\%}$  использован метод «вверх–вниз». В каждой серии приложений напряжения испытания проводились до 10 полных разрядов.

Для уточнения полученного значения  $U_{50\%}$  и оценки стандартного отклонения использовался метод «двух точек», в котором для снижения вероятности нежелательного повреждения твердой изоляции (барьеров и реек) на каждом из двух уровней напряжения выполнялось по 20 приложений напряжения.

Испытания проведены при следующих условиях: атмосферное давление 977–1018 мбар; температура воздуха +14÷+22 °С; относительная влажность воздуха 24–65%. Полученные напряжения полного разряда приводились к нормальным условиям согласно [5].

**Результаты.** По методам «вверх–вниз» и «двух точек» получены в целом идентичные значения  $U_{50\%}$ . Для полученных значений  $U_{50\%}$  определены коэффициенты импульса воздушно-барьерной изоляции:

$$K_{и} = \frac{U_{50\%}}{\sqrt{2}U_{пр.ср.50Гц}}, \quad (1)$$

где  $U_{50\%}$  – наименьшее из значений 50%-го разрядного напряжения по методам «вверх–вниз» и «двух точек»;  $U_{пр.ср.50Гц}$  – среднеразрядного напряжения при воздействии кратковременного напряжения.

Наименьшие из значений  $U_{50\%}$  по двум методам для ПГИ положительной и отрицательной полярности приведены в таблице. По итогам испытаний по методу «двух точек» стандартное отклонение для рассмотренных вариантов не превышает 2–3%.

Полученные по результатам исследований значения  $U_{50\%}$  и  $K_{и}$  для ПГИ отрицательной полярности оказались меньше аналогичных значений для ПГИ положительной полярности, что связано с тем, что при приложении к обмотке ВН грозовых импульсов отрицательной полярности заземленная внутренняя обмотка НН с меньшими диаметром и эквивалентным радиусом кривизны имела положительную полярность.

По итогам фоторегистрации полных разрядов в модели можно сделать вывод, что полный разряд в

Расстояние между обмотками S, мм	«Вылет» барьера С, мм	Длина пути полного разряда L, мм	Значение 50%-го разрядного напряжения* $U_{50\%}$ , кВ	Коэффициент импульса воздушно-барьерной изоляции* $K_{и}$
100	50	161	139/–	1,23/–
	30	129	122/151	1,19/1,47
	0	100	103/161	1,19/1,85
150	100	304	253/–	1,27/–
	50	211	174/207	1,20/1,43
	0	150	142/219	1,15/1,78

\*Числитель – значение при отрицательной полярности, знаменатель – при положительной.

воздушно-барьерной изоляции при достаточной электрической прочности изоляционных цилиндров происходит по огибающей вдоль их поверхности (рис. 1). В этом случае оценка минимальной длины пути полного разряда может быть сделана аналогично [1] – по кратчайшему расстоянию между обмотками в обход изоляционных цилиндров (по «трапеции»), которое для исследуемого макета может быть определено следующим образом:

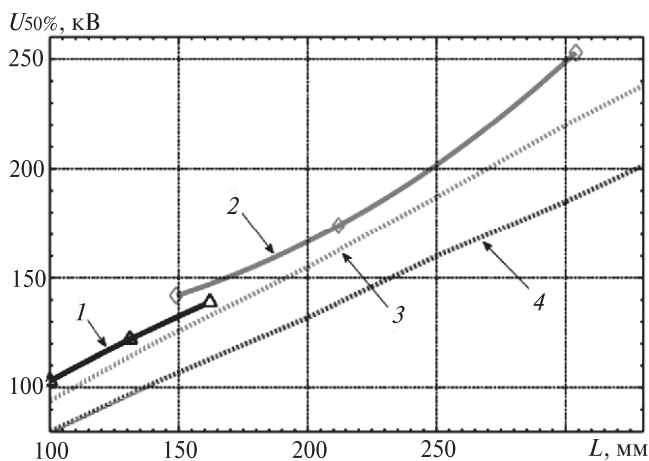
$$L = \sqrt{C^2 + S_1^2} + (S - S_1 - S_2) + \sqrt{C^2 + S_2^2}, \quad (2)$$

где  $S_1$ ,  $S_2$  – ширина воздушного канала, прилегающего к наружной поверхности обмотки НН и ко внутренней поверхности обмотки ВН соответственно.

Полученные зависимости  $U_{50\%} = f(L)$  при воздействии импульсного напряжения отрицательной полярности для двух расстояний между обмотками представлены на рис. 2, где также показаны зависимости 50%-х напряжений для характерных промежутков «стержень–плоскость» и «стержень–стержень» [6].



Рис. 1. Вид полного разряда в воздушно-барьерной изоляции макета



**Рис. 2.** Зависимость  $U_{50\%}$  главной изоляции макета от минимальной длины пути полного разряда  $L$  и зависимость 50%-х напряжений для характерных промежутков: 1 —  $S=100$  мм; 2 — 150 мм; 3 — стержень—стержень; 4 — стержень—плоскость (положительная полярность)

Как видно из рис. 2, полученные зависимости  $U_{50\%}$  при воздействии напряжения отрицательной полярности в исследуемом диапазоне значений длины пути разряда имеют практически линейный характер и в целом хорошо согласуются с 50%-м напряжением промежутка «стержень—стержень». Имеющиеся отклонения в большую сторону в значениях полученных напряжений  $U_{50\%}$  можно объяснить, в первую очередь, меньшей неоднородностью электрического поля в макете по сравнению с промежутком «стержень—стержень» и отличием фактической длины разряда от принятого кратчайшего расстояния между обмотками, определенного по (2).

Таким образом, оценка электрической прочности воздушно-барьерной изоляции макета с определенным запасом может быть выполнена аналогично [1] путем определения кратчайшей длины пути разряда с учетом расположения барьеров между обмотками и использования зависимости  $U_{50\%}$  для промежутка «стержень—стержень».

**Выводы.** 1. В исследованном диапазоне геометрических параметров макета 50%-е разрядное напряжение с увеличением расстояния изменяется практически линейно.

2. Коэффициент импульса составил в пределах 1,15–1,3 при положительной полярности импульса напряжения, прикладываемого к обмотке ВН, и не менее 1,4 — при отрицательной полярности импульса напряжения. Для практических расчетов при ненулевом вылете барьеров над обмотками коэффициент импульса может быть принят равным 1,2.

3. Как и в случае кратковременного переменного напряжения, при воздействии напряжения пол-

ного грозового импульса оценка электрической прочности макета воздушно-барьерной изоляции с некоторым запасом может быть выполнена путем определения кратчайшей длины пути разряда между обмотками и использования зависимости 50%-го напряжения промежутка «стержень—стержень».

4. Экстраполяция полученных результатов на большие размеры изоляционных расстояний требует отдельной экспериментальной проверки в связи с возможностью перехода разряда в лидерную форму при большей длине пути разряда.

Авторы выражают благодарность А.Ю. Волкову, Е.С. Сарнецкому и С.А. Тузову, принимавшим участие в подготовке и проведении испытаний.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларин В.С., Данишина А.А., Свиридов М.А. Электрическая прочность макета воздушно-барьерной главной изоляции обмоток сухого трансформатора при воздействии переменного напряжения. — *Электричество*, 2015, № 6, с. 20–23.
2. ГОСТ Р 54827–2011 (МЭК 60076-11: 2004) Трансформаторы сухие. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2013, 40 с.
3. ГОСТ Р 55195–2012. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. — М.: Стандартинформ, 2014, 48 с.
4. ГОСТ Р 56738–2015. Трансформаторы силовые и реакторы. Требования и методы испытаний электрической прочности изоляции. — М.: Стандартинформ, 2016, 84 с.
5. ГОСТ Р 55194–2012. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. — М.: Стандартинформ, 2014, 94 с.
6. Техническая информация ТИ 420.2. Пробой воздуха при импульсах. МТЗ, 1946.

А в т о р ы : Ларин Василий Серафимович окончил в 2004 г. Институт электроэнергетики Московского энергетического института (МЭИ — ныне Научно-исследовательский университет «МЭИ» — НИУ «МЭИ»). В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка эффективного метода расчета внутренней изоляции силовых трансформаторов». Начальник отдела трансформаторов Всероссийского электротехнического института (ВЭИ). Доцент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений (ТЭВН) НИУ «МЭИ». Регулярный член Исследовательского комитета А2 «Трансформаторы» СИГРЭ.

Данишина Александра Андреевна — инженер отдела трансформаторов ВЭИ.

Свиридов Михаил Александрович окончил Институт электроэнергетики МЭИ (ТУ) в 2012 г. Аспирант кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ». Инженер отдела трансформаторов ВЭИ.

## The Electric Strength of a Mockup of the Main Air Barrier Insulation of Dry-Type Transformer Windings under the Impact of Full Lightning Impulse

**LARIN Vasily Serafimovich** (*All-Russian Electrotechnical Institute (AREI), Moscow, Russia*) – Head of the Department. Regular member of the CIGRE Study Committee A2 «Transformers», Cand. Sci. (Eng.)

**DANISHINA Aleksandra Andreyevna** (*AREI, Moscow, Russia*) – Engineer

**SVIRIDOV Mikhail Aleksandrovich** (*AREI, Moscow, Russia*) – Engineer

*The article presents the results from investigations of the electric strength of air barrier insulation carried out on a scale mockup of main winding insulation of a dry high-voltage transformer under the effect of a full lightning impulse with positive and negative polarity. The impulse electric strength of insulation is compared with its AC electric strength, and the impulse factor values are determined. An engineering method is proposed for calculating the electric strength of the main insulation of dry-type transformers under the effect of a full lightning impulse, which is based on determining the equivalent insulation gap length followed by applying for it the well-known relations of breakdown voltages for rod-to-rod gaps.*

**Key words:** *dry transformer, air barrier insulation, electric strength, lightning impulse, investigations*

### REFERENCES

1. **Larin V.S., Danishina A.A., Sviridov M.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 6, pp. 20–23.
2. **GOST R 54827–2011** (IEC 60076-11:2004) Dry-type transformers. General specifications. Moscow, Standardinform, 2013, 40 p.
3. **GOST R 55195–2012.** Electrical equipment and installations for AC voltages from 1 up to 750 kV. Requirements for dielectric strength of insulation. Moscow, Standardinform, 2014, 48 p.
4. **GOST R 56738–2015** (IEC 60076-3:2013). Power transformers and reactors. Requirements and methods for dielectric tests. Moscow, Standardinform, 2016, 84 p.
5. **GOST R 55194–2012.** Electrical equipment and installation for AC voltages from 1 up to 750 kV. General methods of dielectric tests. Moscow, Standardinform, 2014, 94 p.
6. **Tekhnicheskaya informatsiya TI 420.2. Proboi vozdukh pri impul'sakh** (Technical information TI 420.2. Breakdown of air insulation under impact of impulse voltage). Moscow Transformer Works, 1946 .

\* \* \*

### Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать (желательно и на английском языке):

полные имена и отчества всех авторов;  
какой факультет, какого вуза и когда закончил;  
когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;  
место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять реферат (не менее 100 слов) на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.