

## Application of lubricating brushes for wear decrease of the commutator electric machines commutating devices

A.I. IZOTOV, G.A. MAMAYEV, V.YA. BESPALOV, A.A. FOMINYKH, V.N. TIMOSHENKO, L.I. NOVIKOV, S.A. NIKULIN, S.A. IZOTOV

*One of problem possible solution of brushes and collector wear lowering in DC and AC commutator machines – to implement lubricating brushes (LB) made of the molibden disulphide. If to put the lubricating material optimally into a contact zone, its conductivity rests practically constant and lubricating ability, as well. LB use efficiency has been studied for collectors made of different materials, also LB influence on the machines performances and radio noise. Effect of the slip rings materials was evaluated on wearing of brushes provided with molibden disulphide.*

Key words: *electric machines, collector and brushes wearing, lubricating brush, machine performance*

### REFERENCES

1. Patent RU 2161161. *Uzel skol'zyashchego tokos'yema* (Node of sliding collector ring)/A.I. Izotov, G.A. Mamayev, V.I. Katayev, V.A. Shabardin, S.A. Izotov, S.L. Kolesov. 04.08.1999.

2. Izotov A.I., Mamayev G.A. *Primeneniye tverdoi smazki dlya snizheniya iznosov shchetok v mashinakh aviatsionnogo ispolneniya*. – *Tezisy dokladov VII Mezhdunarodnoi konf. «Aviatsiya i kosmonavtika-2008»* (Use of solid lubricant to reduce wear of the

brushes in the performance of aircraft engines. – Proc. VII Intern. Conf. «Aerospace-2008». St. Petersburg, Publ. «Masterskaya pechati», 2008, 208 p.

3. Plokhov I.V. *Elektrotehnika (Power Engineering)*, 2005, No. 2, pp. 28–33.

4. Izotov A.I., Mamayev G.A., Bepalov V.Ya., Nikulin A.V., Timoshenko V.N. *Elektrotehnika (Power Engineering)*, 2007, No. 6, pp. 33–39.

*Authors: Izotov Anatolii Ivanovich (Kirov, Russia) – Cand. Techn. Sci., Head of the Department, Vyatka State University (VyatSU).*

*Mamayev Gennadii Aleksandrovich (Kirov, Russia) – Cand. Techn. Sci., Associate Professor, VyatSU.*

*Bepalov Viktor Yakovlevich (Moscow, Russia) – Doctor Techn. Sci., Professor, Moscow Power Engineering Institute.*

*Fominykh Anton Anatol'yevich (Kirov, Russia) – Assistant in the Department, VyatSU.*

*Timoshenko Vyacheslav Nikolayevich (Kirov, Russia) – Assistant in the Department, VyatSU.*

*Novikov Leonid Ignat'yevich (Kirov, Russia) – Cand. Techn. Sci., Associate Professor, VyatSU.*

*Nikulin Sergei Viktorovich (Kirov, Russia) – Cand. Techn. Sci., Head of the Department, VyatSU.*

*Izotov Sergei Anatol'yevich (Kirov, Russia) – Cand. Techn. Sci., Associate Professor, VyatSU.*

\* \* \*

## Расчет «времени жизни» твердой изоляции для электроимпульсной технологии

ВАЖОВ В.Ф., КОЗЛОВА Н.В.

*Электроимпульсная технология бурения горных пород требует передачи импульсов высокого напряжения от генератора на забой скважины к буровому наконечнику. При этом в качестве изоляции используются жидкие и твердые диэлектрики. Надежность работы бурового снаряда определяется «временем жизни» твердой изоляции. В литературе отсутствуют методы расчета «времени жизни» твердой монолитной изоляции при длительном воздействии импульсов. Прогнозирование электрической прочности твердой изоляции при многократных импульсных воздействиях требуется не только для электроимпульсного бурения в горных породах. Решение этой проблемы очень важно при создании многих электрофизических установок, работающих в импульсно-периодических режимах: источников электромагнитных импульсов большой мощности (узкополосных и сверхширокополосных), пучков заряженных частиц, лазеров и т.д.). Предложена методика расчета числа импульсов до пробоя твердой полиэтиленовой изоляции, применяемой для электроимпульсных технологий, на базе результатов лабораторных исследований с использованием вероятностного закона*

Вейбулла. Приведен пример расчета числа импульсов до пробоя полиэтиленового изолятора для электроимпульсного бурового снаряда.

Ключевые слова: полиэтиленовая изоляция, импульсное напряжение, число импульсов до пробоя, вероятность пробоя

Электроимпульсные (ЭИ) технологии разрушения горных пород и искусственных материалов (бурение, резание, дробление, снятие поверхностных слоев, утилизация некондиционных бетонных и железобетонных изделий) основаны на применении высоких импульсных напряжений (сотни киловольт). При этом способе горная порода разрушается под действием электрического разряда, протекающего непосредственно в горной породе за время, меньшее  $10^{-5}$  с. Способ позволяет концентрировать в канале разряда мощность  $10^7$ – $10^8$  Вт за каждый акт прохождения электрического разряда. Такая мощность в пространстве между электродами создает локализованный взрыв, обеспечивающий высокую производительность отбойки горной массы при общей минимальной энергоемкости разрушения. Достоинства способа выводят его в ряд наиболее перспективных. Этим способом могут быть разрушены практически все горные породы. К настоящему времени способ изучен до уровня, позволяющего приступить к разработке технических средств и технологии бурения скважин в горных породах.

При ЭИ бурении для передачи импульса напряжения на забой скважины необходима передающая система (кабель) с высоким «временем жизни» и надежностью работы. В промышленном исполнении подобные кабели отсутствуют. В этой связи в Томском политехническом университете разработана передающая система, состоящая из коаксиального бурового снаряда, заполненного изоляционной жидкостью (трансформаторное масло, соляровое масло, трансформаторная жидкость Midell7131 и др.). В качестве изоляторов, центрирующих внутренний высоковольтный токопровод и удерживающих его в отдельных секциях бурового снаряда, используются твердые изоляционные материалы. Многолетние исследования и испытания различных твердых диэлектриков позволили выбрать полиэтилен, как наиболее соответствующий требованиям ЭИ бурения, разработать технологию изготовления подобных изоляторов и исследовать процессы старения их при длительных воздействиях импульсного напряжения. Срок службы и надежность работы бурового снаряда в первую очередь определяются надежностью работы твердой изоляции. Высокий класс напряжения и ограниченные размеры передающей линии (бурового снаряда) приводят к высоким градиентам электрического поля в изоляции. Твердая изоляция в этой связи имеет ограниченный срок службы и должна рассчитываться на основании вероятностно-стати-

стических методов [1–6]. Жидкая изоляция, которой заполняют передающую линию, имеет высокую электрическую прочность и при случайных пробоях восстанавливает свои изоляционные свойства. Наибольшие трудности представляет вопрос прогнозирования длительной электрической прочности твердой изоляции.

В литературе отсутствует метод расчета срока службы толстостенной монолитной изоляции при воздействии колебательных импульсов микросекундной длительности. Имеет место полуэмпирический подход к расчету конденсаторной пленочной изоляции толщиной десятки микрон, например [2].

Методика расчета времени жизни твердых полиэтиленовых изоляторов ЭИ бурового снаряда разрабатывалась с использованием вероятностно-статистических законов. При расчете времени жизни твердой изоляции в первую очередь возникает необходимость экстраполировать имеющиеся лабораторные результаты, полученные, как правило, при высоких градиентах и малых объемах, на рабочие режимы. Для этого используется известное и хорошо себя зарекомендовавшее выражение, которое называется уравнением «кривой жизни» [3, 5, 6]:

$$n = (n_0 E_0^m) E_{\text{исп}}^{-m}, \quad (1)$$

где  $m$  – параметр, характеризующий степень старения;  $n_0$  – число импульсов до пробоя при  $E_0$ ;  $E_{\text{исп}}$  – испытательная напряженность.

Современное состояние науки об отказах изоляции с большой степенью достоверности позволяет надежно прогнозировать до нижнего уровня напряженностей  $E_{\text{раб}} \approx (10, 15)$  кВ/мм [1]. Дальнейшее уменьшение  $E_{\text{раб}}$  при расчетах приводит к значительным запасам прочности изоляции.

Определенные трудности представляет выбор того или иного вероятностного закона распределения отказов изоляции. Но накопленные в литературе результаты позволяют выбрать в качестве наиболее удовлетворительного закон Вейбулла [3–6]. Распределение Вейбулла для описания вероятностей отказов изоляции имеет следующий упрощенный вид:

$$P(n) = 1 - \exp\left[-(n_1 / n_e)^b\right], \quad (2)$$

где  $b$  – параметр распределения Вейбулла, характеризующий дисперсию измеряемых величин;  $n_e$  – параметр распределения Вейбулла – число импульсов до пробоя при  $P = 0,632$ ;  $P(n)$  – вероятность пробоя изоляции при заданном числе импульсов.

Зная  $n_{e0}$  при  $E_0$ , по (1) можно определить число импульсов до пробоя для параметра Вейбулла  $n_e$  при рабочей напряженности  $E_{\text{раб}}$ . Нас интересует время жизни при определенном уровне безотказной работы, например, примем  $Q=0,99$ . Тогда вероятность пробоя должна быть не более  $P=1-Q=0,01$ . Число импульсов до пробоя при такой вероятности может быть определено из (2), но необходимо знать параметр  $b$ . Для лабораторных образцов полимерной изоляции на основании исследований в [7] приведена зависимость  $b$  в функции напряженности электрического поля:

$$b(E) = b_0 + KE_{\text{исп}}, \quad (3)$$

где  $E_{\text{исп}}$  в кВ/мм.

Это выражение не противоречит современным представлениям о поведении дисперсии в функции  $E$ . Таким образом, на основании приведенных трех уравнений, имея исходные экспериментальные данные, можно с заданной надежностью рассчитать время жизни изоляции.

Но, как правило, реальные изоляционные изделия имеют большие размеры, чем лабораторные образцы. Это приводит к необходимости учета изменения объема изоляции при расчетах, так как хорошо известно, что с увеличением объема изоляции электрическая прочность и «время жизни» уменьшаются. Работы ряда авторов на постоянном, импульсном и переменном напряжениях по влиянию объема на «время жизни» позволяют записать следующее выражение [5, 8]:

$$n(v) = (n_0 v_0^c) v_1^{-c}, \quad (4)$$

где  $c$  – коэффициент, характеризующий влияние изменения объема изоляции;  $n_0$  – число импульсов до пробоя при известном объеме  $v_0$ .

Это выражение применимо в диапазоне объемов, изменяющихся на шесть порядков. Рабочий объем рассчитываемого изолятора  $v_1 = 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , а объем экспериментальных коаксиальных образцов, которые приняты в качестве исходных,  $v_0 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ , т.е. разница составляет около трех порядков, что вполне приемлемо. Коэффициент  $c = 2,02$  для данных условий работы [7]. Подставляя в (4)  $n_e$  вместо  $n_1$ , найдем  $n_{e1}$  для нового объема  $v_1$ , а по уравнениям (1), (2), (3) определим  $n$  для заданного уровня надежности.

В (2) параметр  $b$  будет изменяться в функции объема  $v$ , поэтому необходимо для нового объема  $v_1$  иметь новое значение  $b$ . Изменение  $b = f(v)$  может быть представлено в виде [9]:

$$b_1 = b_0 + k_1 (\lg v_1 - \lg v_0), \quad (5)$$

где  $b_0$  – значение параметра  $b$  при  $v_0$ ;  $k_1$  – коэффициент.

Из (5) следует, что с ростом  $v$  дисперсия уменьшается, что также не противоречит современным представлениям о пробое. Для наших условий (5) может быть конкретизировано:

$$b_1 = 5,3 + 0,96 \lg v_1. \quad (6)$$

По изложенной методике рассчитан изолятор для коаксиальной линии электроимпульсного бурового снаряда БИ-325-120.

Исходные данные: внутренний диаметр наружной трубы передающей линии  $D = 310$  мм, наружный диаметр высоковольтного токопровода  $d = 108$  мм, отношение диаметров передающей линии  $D/d = 2,87$ , что очень близко к оптимальному, толщина изоляции 101 мм; расстояние между электродами 120 мм; рабочий объем изолятора  $v = 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ; рабочее напряжение при бурении гранита для БИ-325-120 по [10] составляет  $U_{\text{раб}} = 500$  кВ.

Максимальная напряженность электрического поля в изоляции для коаксиальной системы

$$E_{\text{раб}} = U_{\text{раб}} / (r \lg R / r) = 8,78 \text{ кВ/мм}, \quad (7)$$

где  $R$  и  $r$  – радиусы труб передающей линии.

Значения величин, необходимых для расчета по (1)–(6), полученные экспериментально на полиэтиленовых образцах коаксиального типа и приведенные в [4, 7], были следующими:  $v_0 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3$ ;  $E_0 = 50$  кВ/мм;  $n_{e0} = 1,03 \cdot 10^{10}$  имп.;  $m = 8,05$ ;  $c = 2,02$ ;  $b_0 = 4,8$ .

Для образцов объемом  $v_0 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  определим по (1) «время жизни» при  $E_{\text{раб}}$  для параметра  $n_e$ :  $n_{e1}(E) = 1,24 \cdot 10^{16}$  имп; для изолятора объемом  $v = 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  при  $E_{\text{раб}}$  по (4)  $n_{e2} = 1,1 \cdot 10^9$  имп.

В приведенных расчетах определен один параметр распределения Вейбулла  $n_{e2}$ , который соответствует отказу при вероятности  $P = 0,632$ . Необходимо определить число импульсов до отказа при  $P = 0,01$ . Для этого в (2) нужно знать другой параметр распределения  $b$ , который, в свою очередь, зависит от  $E_{\text{раб}}$  и  $v$ . Расчет по (3) и (6) дает значение  $b(E, v) = 3,17$ . Тогда по (2) после преобразований число импульсов до пробоя при  $P = 0,01$   $n_{0,01} = 2,58 \cdot 10^8$  имп.

При современном развитии ЭИ технологии бурения значение  $n_{0,01}$  позволяет пройти несколько тысяч метров скважин с малой вероятностью отказа изолятора.

Предложенная методика расчета числа импульсов до пробоя для единичного изолятора, применяемого при ЭИ бурении скважин в горных породах позволяет ориентировочно оценивать возможности работы изоляции и, как следствие, работоспособность бурового снаряда.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Койков С.Н., Цикин А.Н.** Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. — Л.: Энергия, 1968, 186 с.
2. **Кучинский Г.С.** Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. — Л.: Энергия, 1979, 224 с.
3. **Occhini E.** A statistical approach to the discussion of the dielectric strength in electric cables. — IEEE Trans. of Power Appar. and Syst., 1971, 90, No. 6, pp. 2671–2682.
4. **Багин В.В., Важов В.Ф., Сотников В.Г., Ушаков В.Я.** Исследование времени жизни полиэтиленовой изоляции при воздействии импульсного напряжения. — Электричество, 1977, №5, с. 75–78.
5. **Кучинский Г.С., Лысаковский Г.Г., Перфилов А.Н.** Надежность и долговечность полимерной изоляции импульсных кабелей при ограниченном сроке службы. — Электричество, 1978, №9, с. 42–48.
6. **Fabiani D., Simoni L.** Discussion on application of the Weibull distribution to electrical breakdown of insulating materials. — IEEE Trans. on Dielec. and Elect. Insul., 2005, vol. 12, No. 1, pp. 11–16.
7. **Важов В.Ф., Сотников В.Г.** Влияние различных факторов на число импульсов до пробоя полиэтиленовой изоляции. —

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 3, pp. 57–60.*

## Calculating the Lifetime of Insulators for Electroimpulse Technology

V.F. VAZHOV and N.V. KOZLOVA

*The electroimpulse technology of drilling rocks involves the need to transfer high-voltage impulses from a generator to the drill bit point at the borehole bottom. In so doing, liquid and solid dielectrics are used as insulation. The reliability of drilling assembly operation is determined by the lifetime of solid insulation. Unfortunately, methods for calculating the lifetime of solid monolith insulation subjected to a long-term effect of impulses are lacking in the literature. Prediction of the electric strength of solid insulations subjected to multiple impulse impacts is required not only for electroimpulse drilling in rocks. Methods for solving this problem are of much importance in constructing many electrophysical installations operating in impulse-periodic modes, such as sources of high-power electromagnetic impulses (both narrow-band and extra-wide-band ones), beams of charged particles, lasers, etc.). A procedure is proposed for calculating the number of impulse breakdown of solid polyethylene insulation used for electroimpulse technologies, which was developed based on the results of laboratory investigations using the Weibull probabilistic law. An example of calculating the number of impulses to break down of the polyethylene insulator for an electroimpulse drilling assembly is given.*

*Key words: polyethylene insulation, impulse voltage, number of impulses to break down, break down probability*

## REFERENCES

1. **Koikov S.N., Tsikin A.N.** *Elektricheskoye starenie tverdykh dielektrikov i nadezhnost' dielektricheskikh detalei* (Electrical aging of solid dielectrics and reliability dielectric parts). Leningrad, Publ. Energiya, 1968, 186 p.
2. **Kuchinskii G.S.** *Chastichnye razryady v vysokovol'tnykh konstruktsiyakh* (Partial discharges in high-voltage designs). Leningrad, Publ. Energiya, 1979, 224 p.
3. **Occhini E.** A statistical approach to the discussion of the dielectric strength in electric cables. — IEEE Trans. of Power Appar. and Syst., 1971, 90, No. 6, pp. 2671–2682.
4. **Bagin V.V., Vazhov V.F., Sotnikov V.G., Ushakov V.Ya.** *Elektrichestvo (Electricity), 1977, No. 5, pp. 75–78.*

Техника высоких напряжений и преобразователи. — Свердловск: Изд-во УПИ, 1977, с. 35–40.

8. **Oudin J.-M.** Friability reparability dispensability. Application and cable sa isolation extrude. — Rev. gen. clac., 1974, 83, pp. 146–158.

9. **Важов В.Ф., Гафаров Р.Р., Дацкевич С.Ю., Журков М.Ю., Кураков А.Г., Муратов В.М., Rodland A.** Электрическая прочность гранита при электроимпульсном разрушении. — Изв. вузов. Физика, 2011, т. 54, № 11/3, с. 163–167.

[26.05.14]

*Авторы: Важов Владислав Федорович окончил электроэнергетический факультет Томского политехнического института (ТПИ — ныне Научно-исследовательский Томский политехнический университет — НИ ТПУ) в 1963 г. В 1975 г. защитил в ТПИ кандидатскую диссертацию «Исследование многоимпульсной прочности полиэтиленовой изоляции». Доцент кафедры НИ ТПУ.*

*Козлова Наталия Владиславовна окончила факультет автоматики и электромеханики ТПИ в 1991 г. Старший преподаватель кафедры экономики НИ ТПУ.*

5. **Kuchinskii G.S., Lysakovskii G.G., Perfiletov A.N.** *Elektrichestvo (Electricity), 1978, No. 9, pp. 42–48.*

6. **Fabiani D., Simoni L.** Discussion on application of the Weibull distribution to electrical breakdown of insulating materials. — IEEE Trans. on Dielec. and Elect. Insul., 2005, vol. 12, No. 1, pp. 11–16.

7. **Vazhov V.F., Sotnikov V.G.** *Tekhnika vysokikh napryazhenii i preobrazovately* (High-voltage technology and converters). Sverdlovsk, Publ. of Ural Polytechn. Institute, 1977, pp. 35–40.

8. **Oudin J.-M.** Friability reparability dispensability. Application and cable sa isolation extrude. — Rev. gen. clac., 1974, 83, pp. 146–158.

9. **Vazhov V.F., Gafarov R.R., Datskevich S.Yu., Zhurkov M.Yu., Kurakov A.G., Muratov V.M., Rodland A.** *Izvestiya vuzov. Fizika (News of Higher Education Institutions. Physics), 2011, vol. 54, No. 11/3, pp. 163–167.*

*Authors: Vazhov Vladislav Fedorovich (Tomsk, Russia) — Cand. Techn. Sci., Associate Professor in the Department at the Scientific and Research Tomsk Polytechnic University (SRTPU).*

*Kozlova Nataliya Vladislavovna (Tomsk, Russia) — Senior Lecturer in the SRTPU.*

