- 4. Kachanovsky F.V. Connection of electrical conductivity of precipitation falling in Tver with weather factors. *Vestnik of Tver State Technical University*. *Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 3 (7), pp. 69–76. (In Russian).
- 5. Kachanovsky F.V. Electrical specific conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 4 (8), pp. 89–97. (In Russian).
- 6. Golicyn A.N. Inzhenernaya geoekologiya [Engineering geoecology]. Moscow: Oniks. 2007. 202 p.
- 7. Gmurman V.E. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola. 1999. 479 p.
- 8. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. Statisticheskij analiz dannyh na komp'yutere [Statistical analysis of data on a computer]. Moscow: INFRA-M. 1998. 528 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KACHANOVSKY Felix Vjacheslavovich – Associate Professor of the Department of Hydraulics, Heat Engineering and Hydraulic Drive, Tver State Technical University, 22, embankment Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: *felix.kachanovscky@yandex.ru*

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. What happens of a lengthening of time series for electrical conductivity of the precipitation in Tver // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 4 (12), pp. 66–74.

УДК 621.3.019:622:519.2

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РЕМОНТНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ДИАГНОСТИКОЙ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Г.С. Кузьмин

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Кузьмин Г.С., 2021

Аннотация. В статье представлены вероятностная экономико-математическая модель и целевая функция для оптимизации периодичностей технического обслуживания электродвигателей с учетом эксплуатационных профилактических испытаний электрической изоляции и полным аварийным ремонтом при отказе.

Ключевые слова: электродвигатель, ремонт, профилактика, обслуживание, функция распределения, надежность, наработка на отказ, электрическая изоляция, целевая функция, вероятностная модель.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-4-74-79

ВВЕДЕНИЕ

Повышение требований к электрооборудованию (ЭО) вызывает необходимость анализа связи между математическими методами расчета надежности и физической природой отказов. Так, для решения экономико-математических задач технического обслуживания (ТО) ЭО необходимо обоснованно выбрать функцию распределения уровней надежности изоляции, обусловленную реальными физическими процессами ее разрушения. Поскольку функция распределения представляет собой некоторую зависимость распределения числа отказов от времени (наработки, срока службы), то для ее выбора необходимо воспользоваться временными характеристиками изменения диэлектрических свойств изоляции в процессе эксплуатации.

Для того чтобы ЭО было работоспособно, сопротивление изоляции не должно быть ниже установленного критического уровня. В противном случае либо происходит пробой изоляции, либо начинаются сбои в работе ЭО, что квалифицируется как отказ. Поэтому время безотказной работы в основном определяется моментом, когда сопротивление изоляции становится ниже критического уровня.

Обычно процесс постоянного ухудшения свойств изоляции связывают с ее тепловым старением, возникающим при перегрузках ЭО. При этом срок службы изоляции определяется на основании учета рабочих температур, а при длительных перегрузках выполняется соответствующая корректировка. Однако, как показывают статистические исследования надежности ЭО, эксплуатационный срок службы изоляции во много раз меньше срока ее теплового старения, а основной причиной выхода из строя изоляции становятся местные дефекты [3, 4].

Значительно снизить аварийность ЭО и поднять уровень его надежности в эксплуатации можно посредством дальнейшего совершенствования системы ТО, более качественного проведения контроля исправности, осмотров и ремонтов. Анализ действующих ремонтных нормативов показывает, что система ТО ЭО не лишена недостатков и нуждается в совершенствовании [3, 4]. В частности, существующая структура ТО низковольтного ЭО предусматривает большое число ремонтных осмотров, а сроки их проведения планируются без дифференцированного учета надежности различных видов ЭО и условий его эксплуатации.

Оптимизация мероприятий по ТО производится на основе математических моделей [3, 4], адекватно отражающих основные стратегии обслуживания разных типов ЭО. Под стратегией обслуживания понимается определенный порядок выполнения мероприятий по ТО, обусловленный некоторым набором возможных действий как послеаварийного, так и предупредительного характера.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИСХОДА ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В работе [1] дана классификация мероприятий ТО и сформулированы типовые стратегии обслуживания для низковольтного взрывобезопасного ЭО, эксплуатируемого на предприятиях угольной промышленности. Показано, что для электродвигателей целесообразна плановая стратегия группового ТО с диагностикой состояния изоляции и полным аварийным ремонтом (АРП) при отказе (стратегия ТО с АРП при отказе). Обслуживание производится циклически по истечении определенного календарного времени T_{Π} . Основным контролируемым параметром является омическое сопротивление изоляции.

Состояние изоляции после проведения диагностики опишем функцией $Z=(0 \lor 1)$, которая принимает значение 0, если ее сопротивление выше критического [2] и отсутствуют неисправности механических элементов, или 1- в противном случае. Вероятности соответствующих событий обозначим $P\{Z=0\}$ и $P\{Z=1\}$.

Случайный процесс x(t) ТО электродвигателей при стратегии ТО с АРП при отказе имеет одно рабочее состояние E_0 , три восстановительных состояния E_i ($i=1,\ 2,\ 3$) и описывается выражением вида

$$x(t) = \begin{cases} E_0, \text{ если в момент } t \text{ электродвигатель исправен (работает);} \\ E_1, \text{ если в момент } t \text{ производится AP\Pi;} \\ E_2, \text{ если в момент } t \text{ произведена диагностика и } Z = 0; \\ E_3, \text{ если в момент } t \text{ произведена диагностика и } Z = 1. \end{cases}$$

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В качестве целевой функции оптимизации размера T_Π из экономических соображений целесообразно использовать удельные стоимостные затраты в единицу времени работы ЭО (руб./ч):

$$C = \sum_{i=1}^{3} MG^{(i)} / T_{II}, \tag{1}$$

где T_{II} – периодичность планового ТО, ч; i – номер восстановительной работы (i = 1, 2, 3), соответствующей состоянию E_i ; $MG^{(i)}$ – средние суммарные стоимостные затраты (математическое ожидание) при нахождении электродвигателя в i-м восстановительном состоянии E_i за межпрофилактический период T_{II} , руб.; $G^{(i)}$ – средняя стоимость i-й восстановительной работы, руб.

Опишем $G^{(i)}$ составной функцией вида

$$G^{(i)} = \begin{cases} G_a, & i = 1, \ x(t) \in E_1; \\ G_n^0, & i = 2, \ x(t) \in E_2; \\ G_n^1 = G_n^0 + G_3, & i = 3, \ x(t) \in E_3, \end{cases}$$

где G_3 — дополнительные стоимостные затраты на ремонт электродвигателя, не выдержавшего диагностику, руб.

При этом затраты на проведение восстановительных работ будут складываться из затрат на АРП и TO, определяемых из выражений:

$$MG^{(1)} = G_a \cdot H(T_{II}); \quad MG^{(2)} = G_n^0 \cdot P\{Z = 0\}; \quad MG^{(3)} = G_n^1 \cdot P\{Z = 1\},$$
 (2)

где $H(T_{\Pi})$ — функция восстановления отказов (как изоляции, так и механических элементов) электродвигателей, соответствующая среднему количеству отказов на интервале $(0,T_{\Pi})$.

Тогда, подставив (2) в (1), получим

$$C = \frac{1}{T_{\Pi}} \left\{ G_a \cdot H(T_{\Pi}) + G_n^0 \cdot P\{Z = 0\} + G_n^1 \cdot P\{Z = 1\} \right\}.$$
 (3)

Для осуществления возможности вычислений оптимальной периодичности ТО электродвигателей по (3) определим аналитическое выражение для $P\{Z=0\}$ при данной стратегии обслуживания.

Событие $\{Z=0\}$, состоящее в том, что изоляция электродвигателя не содержит дефектов, способных привести к снижению сопротивления и отказу на интервале $(T_{\Pi}, 2T_{\Pi}]$, при условии ее безотказной работы до момента времени T_{Π} может осуществиться по одному из двух вариантов:

- а) электродвигатель безотказно проработает время $t = T_{\Pi}$ и после проведения диагностики сопротивление изоляции будет выше критического;
- б) в некоторый момент $t = \tau (0 < \tau \le T_{\Pi})$ окончится внеплановый АРП, далее двигатель проработает безотказно на интервале $(\tau, T_{\Pi}]$ и диагностическая проверка в момент T_{Π} не обнаружит дефектов изоляции, способных привести к отказу на интервале $(T_{\Pi}, 2T_{\Pi}]$, т.е. сопротивление изоляции будет выше критического.

Вероятность события $\{Z=0\}$ (положительного исхода диагностики) в ситуации «а» может быть представлена в виде

$$P\{Z=0\} = 1 - P\{Z=1\} = \frac{\Psi(2T_{\Pi})}{\Psi(T_{\Pi})},$$
 (4)

где $\Psi(t) = 1 - F(t)$ – значения функции распределения уровней надежности (безотказной работы) изоляции электродвигателя в моменты времени $t = T_{\Pi}$ и $t = 2T_{\Pi}$; F(t) – значения функции распределения наработок на отказ изоляции электродвигателя для моментов времени $t = T_{\Pi}$ и $t = 2T_{\Pi}$.

При определении вероятности события $\{Z=0\}$ в ситуации «б» рассмотрим процесс восстановления, образуемый моментами АРП на интервале $(0,\,T_\Pi]$. Если обозначить через h(t)=H'(t) плотность восстановления в момент времени t, то можно определить вероятность того, что момент АРП наступит в интервале $(t,\,t+\Delta t)$. Эта вероятность определяется как

$$h(t) \cdot \Delta t + O(\Delta t) = H'(t) \cdot \Delta t + O(\Delta t),$$

где $O(\Delta t)$ – исчезающе малая величина более высокого порядка приближения.

Учитывая этот вероятностный смысл функции восстановления H(t), определим вероятность события $\{Z=0\}$ в ситуации «б» по формуле полной вероятности

$$\int_{0}^{T_{\Pi}} \frac{\Psi(2T_{\Pi}-\tau)}{\Psi(T_{\Pi}-\tau)} dH(\tau) = \int_{0}^{T_{\Pi}} \frac{\Psi(2T_{\Pi}-\tau)}{\Psi(T_{\Pi}-\tau)} h(\tau) d\tau.$$

Тогда

$$P\{Z=0\} = \frac{\Psi(2T_{II})}{\Psi(T_{II})} + \int_{0}^{T_{II}} \frac{\Psi(2T_{II}-\tau)}{\Psi(T_{II}-\tau)} h(\tau) d\tau.$$
 (5)

Подставив (5) в (3) и учитывая, что $P\{Z=1\}=1-P\{Z=0\}$ и $G_n^1=G_n^0+G_3$, окончательно получим выражение целевой функции оптимизации для определения периодичности ТО электродвигателей:

$$C = \frac{1}{T_{\Pi}} \left\{ G_a \cdot H(T_{\Pi}) + G_n^0 + G_3 \cdot \left[\frac{\Psi(T_{\Pi}) - \Psi(2T_{\Pi})}{\Psi(T_{\Pi})} - \int_0^{T_{\Pi}} \frac{\Psi(2T_{\Pi} - \tau)}{\Psi(T_{\Pi} - \tau)} h(\tau) d\tau \right] \right\}. \tag{6}$$

Заметим, что для некоторых законов распределения трудно определить в явном виде функцию восстановления $H(T_{\Pi})$. В этом случае, как показано в [3], можно воспользоваться приближенной оценкой:

$$H(\mathbf{T}_{\Pi}) \approx \int_{0}^{\mathbf{T}_{\Pi}} f(t)dt = F(\mathbf{T}_{\Pi}),$$

Поскольку оптимальный период ТО меньше величины наработки на отказ изделия, вероятность того, что за время T_{II} изделие откажет больше двух раз, очень мала. Максимальная погрешность упрощенного метода определения $H(T_{II})$ не превышает 8 %, что приемлемо для инженерных расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная математическая модель целевой функции ТО электродвигателей направлена на определение оптимального интервала обслуживания двигателя с целью сокращения затрат при стратегии ТО с диагностикой состояния изоляции и АРП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. М.: Советское радио. 1981.
- 2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. М.: КноРус. 2013. 280 с.
- 3. Кузьмин Г.С. Выбор стратегий технического обслуживания электрооборудования для построения моделей оптимизации. Энергоресурсосбережение в промышленности: сб. научно-практических трудов. Вып. 8. Тверь: ТвГТУ. 2020. С. 192–197.
- 4. Кузьмин Г.С. Характер отказов взрывозащищенного электрооборудования и выбор параметров неразрушающего контроля его надежности в процессе эксплуатации. Энергоресурсосбережение в промышленности: сб. научно-практических трудов. Вып. 8. Тверь: ТвГТУ. 2020. С. 188–192.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

KУЗЬМИН Γ еннадий Cерафимович — кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: rucndthm@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Кузьмин Г.С. Экономико-математическая модель оптимизации ремонтно-профилактического обслуживания электродвигателей с диагностикой состояния изоляции // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 4 (12). С. 74–79.

ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMIZATION OF REPAIR AND PREVENTIVE MAINTENANCE OF ELECTRIC MOTORS WITH DIAGNOSTICS OF THE INSULATION CONDITION

G.S. Kuzmin

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article presents a probabilistic, economic and mathematical model and the output of the objective function for optimizing the frequency of maintenance of electric motors, taking into account operational preventive tests of electrical insulation and complete emergency repairs in case of failure.

Keywords: electric motor, repair, prevention, maintenance, distribution function, reliability, time to failure, electrical isolation, objective function, probability model.

REFERENCES

- 1. Barzilovich E.Yu., Kashtanov V.A. Nekotorye matematicheskie voprosy teorii obsluzhivaniya slozhnyh sistem [Some mathematical questions of the theory of complex systems maintenance]. Moscow: Sovetskoe radio. 1971. 272 p.
- 2. Pravila tekhnicheskoj ekspluatacii elektroustanovok potrebitelej [Rules of technical operation of electrical installations of consumers]. Moscow: KnoRus. 2013. 280 p.
- 3. Kuzmin G.S. The choice of strategies for maintenance of electrical equipment for building optimization models. *Energy resource saving in industry: Collection of scientific and practical works.* Issue 8. Tver: TvSTU. 2020, pp. 192–197. (In Russian).
- 4. Kuzmin G.S. The nature of failures of explosion-proof electrical equipment and the choice of parameters of non-destructive testing of its reliability during operation. *Energy resource saving in industry: Collection of scientific and practical works*. Issue 8. Tver: TvSTU. 2020, pp. 188–192. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KUZMIN Gennadiy Serafimovich – Candidate of Technical Sciences, Associated Professor of Department of Power Supply and Electrical Equipment, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: rucndthm@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kuzmin G.S. Economic and mathematical model of optimization of repair and preventive maintenance of electric motors with diagnostics of the insulation condition // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 4 (12), pp. 74–79.