

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.3.019:622:519.2

**ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ
РЕМОНТНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
КОММУТАЦИОННО-ПУСКОВОЙ АППАРАТУРЫ
С ДИАГНОСТИКОЙ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ***Г.С. Кузьмин**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Кузьмин Г.С., 2021

Аннотация. В статье приведена целевая функция, представляющая вероятностную экономико-математическую модель оптимизации периодичностей технического обслуживания коммутационно-пусковых аппаратов. Модель разработана для стратегии обслуживания, при которой решение о ремонте или замене аппарата принимается по результатам периодически проводимого контроля сопротивления изоляции, совмещенного с ремонтным осмотром и проверкой исправности механических частей. В качестве целевой функции взяты удельные ремонтно-профилактические затраты.

Ключевые слова: электрические коммутационно-пусковые аппараты, ремонт, профилактика, обслуживание, модель оптимизации, целевая функция, надежность, наработка на отказ, электрическая изоляция.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-45-49**ВВЕДЕНИЕ**

Оптимизация мероприятий по техническому обслуживанию (ТО) производится на основе математических моделей [1], адекватно отражающих основные стратегии обслуживания разных типов электрооборудования (ЭО).

Под стратегией обслуживания понимается определенный порядок выполнения мероприятий по ТО, зависящий от некоторого набора возможных действий как послеаварийного, так и предупредительного характера, которым располагает персонал. Типы стратегий обслуживания обусловлены правилами технической эксплуатации [2], а также разнообразием и различием факторов и особенностей проведения ТО для разных типовых групп ЭО.

Классификация мероприятий ТО и основных стратегий обслуживания, характерных для низковольтного взрывобезопасного ЭО, а именно электродвигателей и коммутационно-пусковых аппаратов (КПА) (магнитных пускателей и автоматических фидерных выключателей), эксплуатируемых на предприятиях угольной промышленности, приводится в работе [3]. Там же показано, что в отличие от двигателей для КПА целесообразна плановая стратегия группового ТО с диагностикой состояния и минимальным аварийным ремонтом (АРМ) при отказе (стратегия ТО с АРМ). Обслуживание производится циклически по истечении определенного календарного времени $T_{п}$. Основным контролируемым параметром является омическое сопротивление изоляции [4].

Если отказы электродвигателей определяются в основном отказами изоляции и при обсуждении периодичности ТО можно пренебречь отказами механических элементов, то для КПА подобное решение может привести к серьезным ошибкам, поскольку значительная часть отказов пускателей и автоматических выключателей вызвана неисправностями механических элементов [3].

Отказы КПА, возникающие в межпрофилактический период, устраняются в основном минимальным ремонтом. При этом уровень сопротивления изоляции КПА при проведении такого ремонта остается неизменным и при дальнейшей эксплуатации продолжает снижаться до критического состояния [5], что может привести к отказу, если не осуществить своевременную диагностику.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИСХОДА ДИАГНОСТИКИ

Состояние КПА после проведения диагностики опишем функцией $Z = (0 \vee 1)$, которая принимает значение 0, если КПА выдержал диагностическую проверку (если сопротивление изоляции выше критического и отсутствуют неисправности механических элементов), в противном случае оно равно 1. Тогда $P\{Z = 0\}$ – вероятность того, что КПА выдержит диагностическую проверку и останется функционировать на следующий межпрофилактический период, а $P\{Z = 1\}$ – вероятность того, что КПА окажется дефективным. Поскольку события $\{Z = 0\}$ и $\{Z = 1\}$ несовместимы и противоположны, то $P\{Z = 1\} = 1 - P\{Z = 0\}$.

С учетом вышеизложенного вероятность $P\{Z = 1\}$ отрицательного исхода после проведения диагностики определится как вероятность события, состоящего в том, что изоляция КПА откажет на интервале $(T_{\Pi}, 2T_{\Pi})$ (т. е. сопротивление изоляции опустится ниже критического уровня в предстоящий межпрофилактический период) при условии отсутствия полных восстановлений ее в течение времени $t = T_{\Pi}$ (отработанного межпрофилактического периода). Тогда

$$P\{Z = 1\} = P\{T_{\Pi} < t \leq 2T_{\Pi} | T_{\Pi} < t\}.$$

Для любых двух событий А и В

$$P\{A|B\} = P\{A \cap B\} / P\{B\}.$$

Однако событие $\{T_{\Pi} < t \leq 2T_{\Pi}\} \cap \{T_{\Pi} < t\}$ совпадает с событием $\{T_{\Pi} < t \leq 2T_{\Pi}\}$.

Тогда

$$P\{Z = 1\} = \frac{P\{T_{\Pi} < t \leq 2T_{\Pi}\}}{P\{T_{\Pi} < t\}} = \frac{F(2T_{\Pi}) - F(T_{\Pi})}{\Psi(T_{\Pi})}, \quad (1)$$

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

Вероятность положительного исхода диагностики определится как вероятность противоположного события:

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

Процесс технического обслуживания КПА можно описать случайным процессом $x(t)$, характеризующим в общем случае состояние электроаппаратуры в произвольный момент времени t :

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

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

При организации ТО все издержки как от аварийных ремонтов, так и от профилактических осмотров входят в себестоимость продукции и оказывают существенное влияние на общие показатели работы. Поэтому при определении T_{Π} в качестве целевой функции оптимизации необходимо использовать удельные стоимостные затраты в единицу времени работы оборудования, руб./ч, которые в общем виде при плановом режиме обслуживания, как показано в [1], находят из выражения

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

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

Обозначим

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

При этом $G_n^1 = G_n^0 + G_3$, где G_3 – дополнительные стоимостные затраты на ремонт электроаппарата, не выдержавшего диагностики, руб.

Тогда

$$MG^{(2)} = G_n^0 \cdot P\{Z = 0\}; \quad MG^{(3)} = G_n^1 \cdot P\{Z = 1\}. \quad (4)$$

Как показано в [3], минимальные аварийные ремонты, производимые при отказах механических элементов КПА, не оказывают влияния на состояние контролируемого параметра (сопротивления изоляции). Для подобных случаев [1] математическое ожидание количества отказов на интервале $(0, T_{\Pi})$ определяется выражением $\int_0^{T_{\Pi}} \lambda(t) dt$, где $\lambda(t)$ – интенсивность отказов КПА. Тогда

$$MG^{(1)} = G_M \cdot \int_0^{T_{\Pi}} \lambda(t) dt, \quad (5)$$

Подставив равенства (4) и (5) в формулу (3) с учетом выражений (1) и (2), получим формулу для удельных стоимостных затрат при стратегии ТО КПА с АРМ при отказе:

$$C = \frac{1}{T_n} \left\{ G_M \cdot \int_0^{T_n} \lambda(t) dt + G_n^0 + G_3 \left[1 - \frac{\Psi(2T_n)}{\Psi(T_n)} \right] \right\}. \quad (6)$$

Оптимальная периодичность ТО T_n^* определяется как аргумент, соответствующий минимуму функции (6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования получена математическая модель, описывающая отрицательный и положительный исход диагностирования КПА, и выведена целевая функция оптимизации ТО КПА с диагностикой состояния и минимальным аварийным ремонтом, позволяющая определить оптимальную периодичность обслуживания. Полученная модель позволит эффективно управлять удельными ремонтно-профилактическими затратами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. М.: Советское радио, 1971. 272 с.
2. Орлова Т.М. 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: сборник научно-практических трудов* / под ред. А.Н. Макарова. 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: сборник научно-практических трудов* / под ред. А.Н. Макарова. Вып. 8. Тверь: ТвГТУ, 2020. С. 188–192.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КУЗЬМИН Геннадий Серафимович – канд. техн. 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 коммутационно-пусковой аппаратуры с диагностикой состояния изоляции // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 3 (11). С. 45–49.

**ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMIZATION
OF REPAIR AND PREVENTIVE MAINTENANCE OF SWITCHING
AND STARTING EQUIPMENT WITH DIAGNOSTICS
OF THE INSULATION CONDITION****G.S. Kuzmin***Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The article presents the conclusion of the objective function, which is a probabilistic economic and mathematical model for optimizing the frequency of maintenance of switching and starting devices. The model is designed for a maintenance strategy, in which the decision to repair or replace the device is made based on the results of periodic monitoring of the insulation resistance, combined with a repair inspection and checking the serviceability of mechanical parts. The specific repair and maintenance costs are taken as the target function.

Keywords: electrical switching and starting devices, repair, prevention, maintenance, optimization model, target function, reliability, time to failure, electrical insulation.

REFERENCES

1. Barzilovich E.Yu., Kashtanov V.A. Some mathematical questions of the theory of complex systems maintenance. M.: Sovetskoe radio, 1971. 272 p. (In Russian).
2. Orlova T.M. Rules of technical operation of electrical installations of consumers. M.: KnoRus, 2013. 280 p. (In Russian).
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* / ed. by A.N. Makarov. Is. 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* / ed. by A.N. Makarov. Is. 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 switching and starting equipment with diagnostics of the insulation condition // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 3 (11), pp. 45–49.