

Прогноз-модель оценки ресурса объекта диагноза с учетом изменения стоимости пропуска дефекта

С.В. Барсуков✉, С.В. Пахомов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉bars_irkutsk@mail.ru

Резюме

Важнейшей составной частью технической эксплуатации оборудования является диагностика его технического состояния. Качественная и своевременная диагностика объекта диагноза является важным средством повышения эффективности его эксплуатации. Сущность оценки технического состояния объекта диагноза заключается в сборе и анализе его эксплуатационных параметров, а также в периодическом анализе тенденции и скорости изменения параметров с нарабаткой, обусловленной ухудшением технического состояния изделия. Об изменении технического состояния объекта судят по значениям диагностических (контролируемых) параметров, позволяющих определить техническое состояние объекта без его разборки. Чем больше диагностических параметров используется при диагностике объекта и чем чаще производится диагностика, тем точнее и достовернее диагноз. И наоборот, чем меньше диагностических параметров используется и чем реже проводятся замеры при диагностике, тем экономически дешевле и менее эффективно осуществляется эксплуатация оборудования. Это заставляет выбирать оптимальное количество диагностируемых параметров и периодичность их измерения. При оценке технического состояния объекта диагноза присутствует неопределенность принятия решения в постановке диагноза. В процессе диагностики технических объектов широко применяются статистические методы, или методы статистических решений. Решающее правило выбирается исходя из некоторых условий оптимальности, например, из условия минимального риска принятия ошибочного решения при диагнозе. В работе в качестве инструмента исследования выбран метод Неймана – Пирсона. Рассматривается технология распознавания состояния объекта диагноза при наличии одного диагностического параметра. Отмечена роль оценки стоимости ошибок диагноза при разработке периодичности контрольных проверок оборудования и в количестве измеряемых диагностических признаков. Таким образом, в предлагаемой работе показана разработка методики отбора необходимых и достаточных диагностических признаков на основе метода Неймана – Пирсона для достоверного диагностирования технического состояния силового трансформатора с учетом изменения стоимости пропуска дефекта.

Ключевые слова

прогноз-модель, диагностический параметр, техническое состояние объекта, диагностика объекта, стоимость пропуска дефекта, метод Неймана – Пирсона

Для цитирования

Барсуков С.В. Прогноз-модель оценки ресурса объекта диагноза с учетом изменения стоимости пропуска дефекта / С.В. Барсуков, С.В. Пахомов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 144–152. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).144-152.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 26.12.2022 г.; принята к публикации: 27.12.2022 г.

Forecast model for evaluating the resource of the diagnosed object taking into account changes in the cost of missing a defect

S.V. Barsukov✉, S.V. Pakhomov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉bars_irkutsk@mail.ru

Abstract

The most important component of the technical operation of the equipment is the diagnosis of its technical condition. High-quality and timely technical diagnostics of an object is an important means of increasing the efficiency of its operation. The essence of the assessment of the technical condition of the diagnosed object is to collect and analyze the operational parameters of the object in question, as well as periodic analysis of the trend and rate of change of parameters with operating time due to the deterioration of the product's technical condition. A change in the technical condition of an object is judged by the values of diagnostic (controlled) parameters allowing to determine the technical condition of the object without disassembling it, in the process of their control. The more diagnostic parameters are used in the diagnosis of the object and the more often the diagnosis is made, the more accurate and reliable the diagnosis is. But the fewer diagnostic parameters are used, the less measurements are taken during diagnostics, the cheaper and more efficient the operation of the equipment is. This makes it necessary to choose the

optimal number of diagnostic parameters and the frequency of their measurement. When assessing the technical condition of the object of diagnosis, there is uncertainty of decision-making in the diagnosis. Statistical methods, the so-called methods of statistical solutions, are widely used in the diagnosis of technical objects. In this case, the decisive rule is chosen based on certain optimality conditions, for example, from the condition of minimal risk of making an erroneous decision during diagnosis. In this paper, the Neumann–Pearson method was chosen as a research tool. The technology of identifying the state of the object of diagnosis in the presence of one diagnostic parameter is considered. The role of estimating the cost of diagnostic errors in the development of the frequency of control checks of equipment and in the number of measured diagnostic signs is shown. Thus, the proposed work shows the development of a methodology for selecting necessary and sufficient diagnostic features based on the Neumann–Pearson method for reliable diagnosis of the technical condition of a power transformer, taking into account changes in the cost of passing a defect.

Keywords

forecast-model, diagnostic parameter, technical condition of the object, diagnostics of the object, the cost of missing the defect, the Neumann–Pearson’s method

For citation

Barsukov S.V., Pakhomov S.V. Prognoz-model’ otsenki resursa ob’ekta diagnoza s uchetom izmeneniya stoimosti propuska defekta [Forecast model for evaluating the resource of the diagnosed object taking into account changes in the cost of missing a defect]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 144–152. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).144-152.

Article info

Received: October 20, 2022; Revised: December 26, 2022; Accepted: December 27, 2022.

Введение

Известны основные классические подходы, используемые при организации ремонтно-профилактических мероприятий на больших парках однотипного оборудования [1–5]:

1. Система плано-предупредительного ремонта (эксплуатация «по назначенному ресурсу»).

2. Принцип технической эксплуатации (ТЭ) блоков, агрегатов и элементов конструкций «по техническому состоянию».

В настоящее время широко внедряется стратегия технического обслуживания и ремонта (ТОиР) оборудования «по техническому состоянию». Основная цель перехода на стратегию ТОиР «по техническому состоянию» является:

– повышение безотказности;

– снижение затрат на ТЭ.

Указанные подходы отличаются тем, что при их использовании по-разному назначается периодичность и объемы работ при обслуживании объекта диагноза (ОД).

При развитии стратегии ТОиР «по техническому состоянию» необходимо наличие достаточных диагностических признаков для выявления текущего технического состояния ОД. Нужно также иметь информацию об уровне риска ошибок при постановке диагноза оборудования.

Данная работа посвящена разработке методики оценки количества диагностических признаков для постановки верного диагноза о текущем техническом состоянии оборудования с учетом стоимости пропуска дефекта.

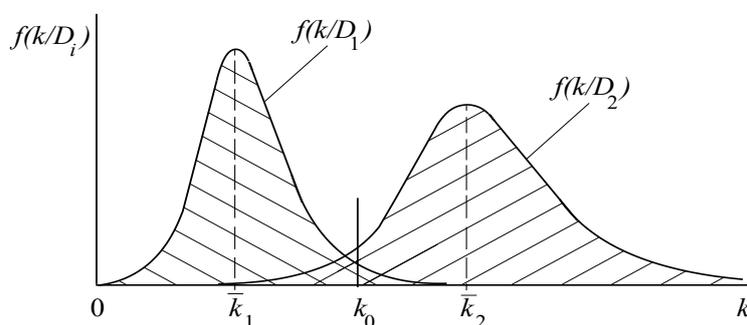


Рис. 1. Плотность вероятности диагностического признака k для двух состояний объекта диагноза (\bar{k}_1 и \bar{k}_2 – средние значения (математические ожидания) диагностического признака k)

Fig. 1. Probability density of diagnostic feature k for two states of the object of diagnosis (\bar{k}_1 and \bar{k}_2 – average values (mathematical expectations) of the diagnostic feature k)

Имеются статистические методы распознавания признаков, которые позволяют определить границу принятия решения о техническом состоянии ОД, а также количественно оценить возможные ошибки при постановке диагноза [6–12]. Вероятность принятия ошибочного решения о диагнозе оценивается средним риском. При этом определяется плотность вероятности некоторого диагностического параметра k для выявления исправного (D_1) и неисправного (D_2) состояния ОД. Обозначим k как выходной эксплуатационный параметр ОД, а k_0 – граничное значение выходного эксплуатационного параметра. Параметр k_0 позволяет судить о степени исправности оборудования:

- при $k < k_0$, $k \in D_1$ – ОД исправен;
- при $k > k_0$, $k \in D_2$ – ОД неисправен (присутствует дефект).

На рис. 1 приведены значения плотности вероятности диагностического параметра k для двух состояний ОД.

В реальных системах обычно встречаются ситуации, когда плотности вероятности $f(k/D_1)$ и $f(k/D_2)$ имеют общую область. При этом выбор граничной величины k_0 связан с определенным риском постановки неверного диагноза о текущем техническом состоянии ОД.

Возможными ошибками постановки диагноза ОД являются ложная тревога (ошибка первого рода) и вероятность пропуска дефекта (ошибка второго рода).

В первом случае исправный ОД признается дефектным: ОД исправен (реальное состояние ОД – D_1), но параметр k превышает его предельное значение ($k > k_0$). Во втором случае ОД, имеющий дефект, признается исправным (реальное состояние ОД – D_2), но параметр k не превышает его предельное значение ($k < k_0$).

Ошибочное решение при постановке диагноза ОД складывается из вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска дефекта.

Если добавить экономическую оценку ущерба от этих ошибок, то получим обобщающий показатель оценки ошибочных решений – величина среднего риска (ожидаемая величина потерь, в том числе экономических). Количественно вероятность ошибочного решения (средний риск) определяется как сумма вероятных событий:

$R = C_{11} \cdot P(H_{11}) + C_{21} \cdot P(H_{21}) + C_{12} \cdot P(H_{12}) + C_{22} \cdot P(H_{22})$, (1)
где C_{11} , C_{22} – экономические оценки стоимости правильных решений при постановке диагноза

(отсутствие ложной тревоги и пропуска дефекта соответственно); C_{21} , C_{12} – экономическая оценка стоимости ложной тревоги и пропуска дефекта соответственно; $P(H_{11})$, $P(H_{22})$ – вероятности правильных решений при постановке диагноза (вероятности отсутствия ложной тревоги и пропуска дефекта соответственно):

– вероятность ложной тревоги –

$$P(H_{21}) = P(D_1) \cdot P(k > k_0 / D_1) = P_1 \cdot \int_{k_0}^{\infty} f(k / D_1) \cdot dk ;$$

– вероятность пропуска дефекта –

$$P(H_{12}) = P(D_2) \cdot P(k < k_0 / D_2) = P_2 \cdot \int_{-\infty}^{k_0} f(k / D_2) \cdot dk .$$

В качестве инструмента минимизации вероятности пропуска дефекта при заданном допустимом уровне вероятности ложной тревоги использован метод Неймана – Пирсона.

В качестве объекта диагноза выбран силовой трансформатор с жидким диэлектриком. На этом ОД апробирована методика отбора необходимого и достаточного количества диагностических признаков на основе метода Неймана–Пирсона с учетом стоимости пропуска дефекта.

Согласно назначенному регламенту, диагностика состояния трансформатора проводится через каждые пять лет эксплуатации. Оценка его состояния осуществляется по количеству примесей железа в диэлектрической жидкости (в масле) трансформатора (параметр k): если $k < k_0$, то $k \in D_1$ (трансформатор признается исправным); если $k > k_0$, то $k \in D_2$ (трансформатор признается неисправным).

Для реализации стратегии обслуживания трансформатора «по техническому состоянию» предлагается замерять содержание железа в масле бака не через каждые пять лет эксплуатации, а каждый год. Более частая диагностика трансформатора становится экономически приемлемой в условиях развития методов и технологий контроля параметров работы трансформатора технологически более простыми методами и с меньшими затратами.

На рис. 2 показаны результаты расчета значений плотности вероятности диагностического параметра k , а также распределения граничного значения параметра k_0 по годам эксплуатации при исправном D_1 и неисправном D_2 состояниях трансформатора при принятом соотношении стоимостей $C_{12} / C_{21} = 20$. Также показано распределение граничного параметра k_0 по

годам эксплуатации трансформатора ($k_1 - k_5$).

На рис. 3 показаны расчетные изменения вероятности ложной тревоги, вероятности пропуска дефекта и среднего риска по годам эксплуатации трансформатора при этих же условиях.

Анализ зависимости среднего риска по годам эксплуатации показывает: для того, чтобы реализовать стратегию технического обслуживания и профилактического ремонта оборудования «по техническому состоянию» нет необходимости использовать большое количе-

ство диагностических признаков для постановки диагноза о реальном техническом состоянии оборудования. Вероятность ошибки типа «пропуск дефекта» с ростом наработки ОД уменьшается. Оценка предельного уровня риска R_{\max}^{don} принятия ошибочного решения о техническом состоянии трансформатора позволяет выделить научно-обоснованный этап эксплуатации объекта диагноза (после второго года эксплуатации), когда количество измеряемых диагностических признаков для оценки реального техни-

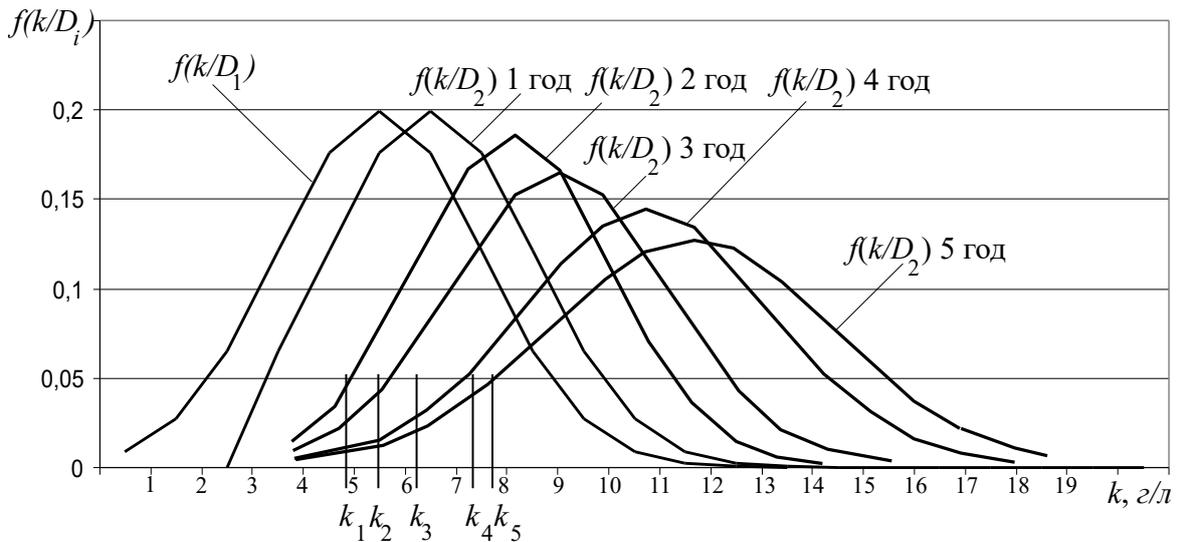


Рис. 2. Изменение плотности вероятности диагностического параметра k по годам эксплуатации трансформатора при принятом соотношении $C_{12} / C_{21} = 20$

Fig. 2. Change in the probability density of the diagnostic parameter k over the years of operation of the transformer with the accepted ratio $C_{12} / C_{21} = 20$

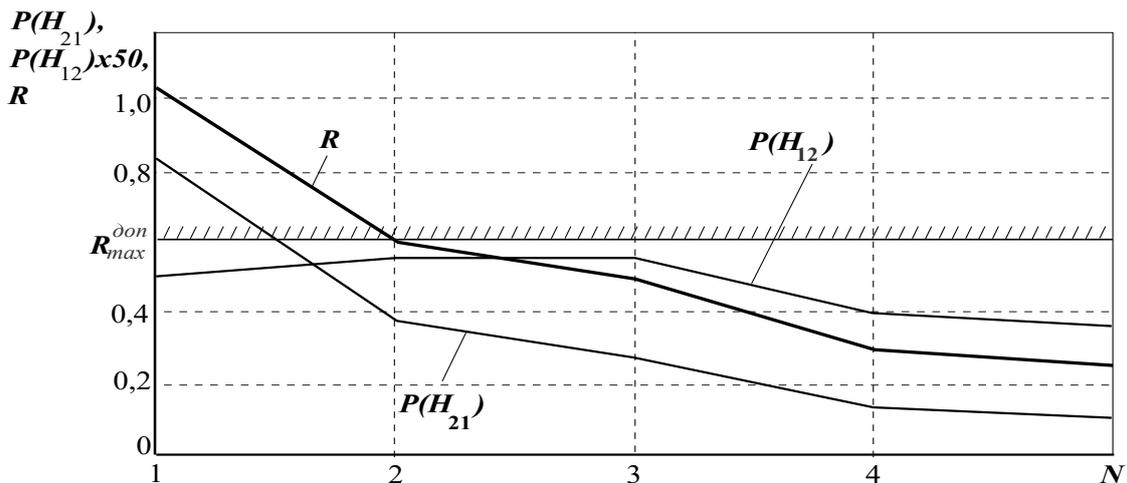


Рис. 3. Изменение вероятности ложной тревоги $P(H_{21})$, вероятности пропуска дефекта $P(H_{12})$ и среднего риска R по годам эксплуатации (N) силового трансформатора при принятом соотношении $C_{12} / C_{21} = 20$

ческого состояния оборудования можно сократить до минимума. Это позволяет в целом снизить затраты на диагностику ОД [13–15].

Рассмотренный подход к постановке диагноза одним из методов статистических решений позволяет учитывать экономическую составляющую в принятии решения об исправности или неисправности ОД.

На рис. 4 показано изменение плотности вероятности диагностического параметра k при исправном D_1 и неисправном D_2 состояниях трансформатора по годам эксплуатации с учетом зависимости от стоимости пропуска дефекта C_{12} . Граничное значение количества примесей железа в жидкой изоляции трансформатора (k_0) по годам эксплуатации и при фиксированной стоимости пропуска дефекта C_{12} смещается слева направо. Но при прочих равных условиях по мере увеличения стоимости пропуска дефекта C_{12} диапазон изменения граничного значения k_0 смещается влево по графику.

Например, при максимальном выбранном соотношении $C_{12} / C_{21} = 20$ диапазон изменения граничного значения k_0 смещен максимально влево по графику рис. 4. При этом уменьшается зона «перекрывания» функций распределения $f(k/D_1)$ и $f(k/D_2)$.

В этой области графика высока вероят-

ность исправного состояния трансформатора (состояние D_1). Вероятность неисправного состояния трансформатора (состояние D_2) – мала. Это соотношение в целом повышает вероятность ошибочного диагноза «ложная тревога» и уменьшает вероятность ошибочного диагноза «пропуск дефекта».

Ошибка диагноза – «ложная тревога» – наносит экономический ущерб. Это выражается в том, что оборудование в плановом порядке досрочно снимается с эксплуатации (досрочно проводятся капитальные и другие виды ремонтов и профилактических мероприятий). Оборудование не вырабатывает полностью свой ресурс до капитального ремонта (или полного обновления). Ремонтно-профилактические мероприятия на ОД проводятся чаще, чем это экономически целесообразно. При повышении стоимости оборудования повышается величина ущерба, наносимого ошибочным диагнозом «ложная тревога».

Ошибка диагноза – «пропуск дефекта» – наносит экономический ущерб потому, что оборудование, считающееся исправным, с высокой вероятностью отказывается неожиданно. Часто это сопровождается катастрофическими последствиями (разрушения, пожары, взрывы). Ремонтно-профилактические мероприятия, замена

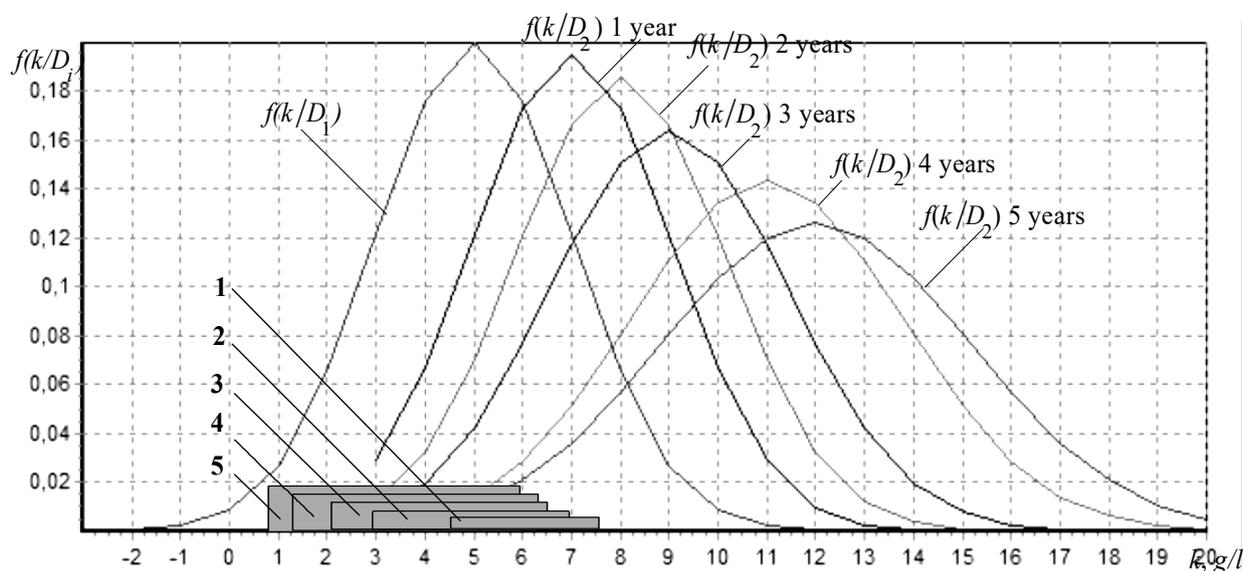


Рис. 4. Изменение плотности вероятности диагностического параметра k при исправном D_1 и неисправном D_2 состояниях трансформатора по годам эксплуатации с учетом стоимости пропуска дефекта C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

Fig. 4. Change in the probability density of the diagnostic parameter k with a serviceable D_1 and faulty D_2 transformer states by years of operation, taking into account the cost of skipping the defect C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

отказавшего оборудования проводятся в авральном порядке, без всякого планирования. Не считаясь с экономическими затратами, в кратчайшие сроки формируют ремонтные бригады, аккумулируют ресурсы для ремонта, доставляют заменяемые узлы и агрегаты.

Все мероприятия направлены на уменьшение времени простоя оборудования и на устранение возможных последствий его отказа. При повышении стоимости оборудования повышается величина ущерба, наносимого ошибочным диагнозом «пропуск дефекта». Стоимость ущерба от пропуска дефекта гораздо выше, чем от ложной тревоги [16–19].

На рис. 5 показано изменение вероятности ложной тревоги по годам эксплуатации в зависимости от стоимости пропуска дефекта C_{12} . Расчеты показывают, что при низкой стоимости оборудования и экономических послед-

ствий его отказа вероятность ошибки диагноза «ложная тревога» снижается по годам эксплуатации в 4,5 раза.

По мере увеличения экономической оценки стоимости пропуска дефекта до соотношения $C_{12} / C_{21} = 100$ вероятность ложной тревоги по годам эксплуатации уменьшается менее интенсивно (в 1,4 раза).

Математически влияние стоимости пропуска дефекта (C_{12}) сказывается через отношение правдоподобия при вычислении граничного значения количества примесей железа в жидкой изоляции трансформатора (k_0). С психологической точки зрения эта тенденция также подтверждается.

При повышенной стоимости диагностируемого оборудования (и последствий его спонтанного отказа) специалисты-диагносты при постановке диагноза с большей вероятностью го-



Рис. 5. Изменение вероятности ложной тревоги по годам эксплуатации в зависимости от стоимости пропуска дефекта C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

Fig. 5. Change in the probability of a false alarm over the years of operation, depending on the cost of skipping the defect C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

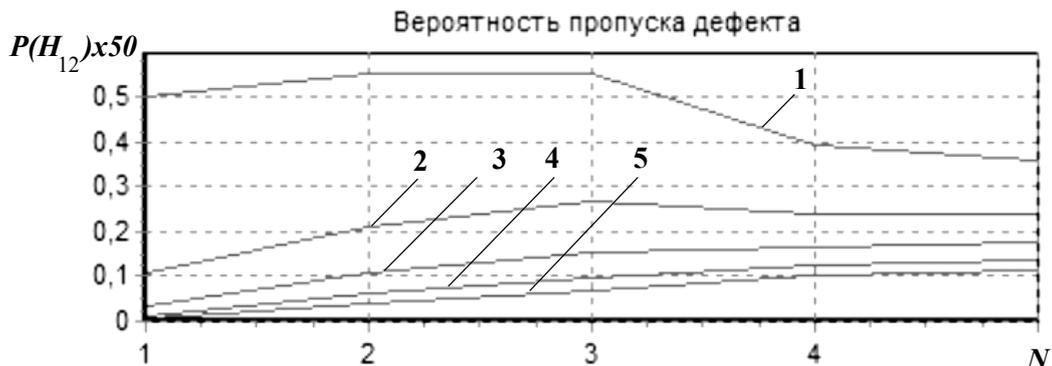


Рис. 6. Изменение вероятности пропуска дефекта по годам эксплуатации в зависимости от стоимости пропуска дефекта C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

Fig. 6. Change in the probability of missing a defect over the years of operation, depending on the cost of missing a defect C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

товы ошибаться в сторону «ложной тревоги», нежели в сторону «пропуска дефекта».

На рис. 6 показано изменение вероятности пропуска дефекта по годам эксплуатации в зависимости от стоимости пропуска дефекта C_{12} .

При низкой стоимости оборудования и экономических последствий его отказа вероятность ошибки диагноза «пропуск дефекта» в целом высока и находится в диапазоне 0,35–0,5.

По мере увеличения экономической оценки стоимости пропуска дефекта до соотношения $C_{12} / C_{21} = 100$ вероятность пропуска дефекта в целом уменьшается и находится в диапазоне значений 0,01–0,25. Математически влияние стоимости пропуска дефекта (C_{12}) сказывается через отношение правдоподобия при вычислении граничного значения количества примесей железа в жидкой изоляции трансформатора (k_0). С психологической точки зрения эта тенденция также подтверждается. При повышенной стоимости диагностируемого оборудования (и последствий его спонтанного отказа) специалисты-диагносты при постановке диагноза с небольшой вероятностью готовы ошибаться в сторону «пропуска дефекта». На рис. 7 показано изменение среднего риска по годам эксплуатации в зависимости от стоимости пропуска дефекта C_{12} . Анализ графиков показывает, что при повышении стоимости оборудования и увеличении стоимости пропуска дефекта величина среднего риска по годам эксплуатации ОД изменяется.

Если при минимальном соотношении стоимостей C_{12} / C_{21} ($C_{12} / C_{21} = 20$) средний риск за пять лет эксплуатации уменьшается в 2,5 раза, то при максимальном соотношении C_{12} / C_{21}

($C_{12} / C_{21} = 100$) средний риск за пять лет эксплуатации увеличивается в 1,2 раза. Следовательно, если при минимальном соотношении стоимостей количество измеряемых диагностических признаков для оценки реального технического состояния оборудования можно сократить до минимума, то при соотношении $C_{12} / C_{21} = 100$ количество измеряемых диагностических признаков для оценки реального технического состояния оборудования нельзя сокращать в течение всего периода эксплуатации, а даже наоборот, после третьего года эксплуатации трансформатора необходимо уделять повышенное внимание текущему состоянию оборудования. Возможно, это потребует увеличения количества измеряемых диагностических признаков для оценки реального технического состояния ОД. Это необходимо учитывать при планировании затрат на эксплуатацию рассматриваемого ОД.

Заключение

В результате выполненных исследований выявлено: для того чтобы реализовать стратегию технического обслуживания и профилактического ремонта оборудования «по техническому состоянию», необходимо учитывать стоимость оборудования и стоимость ошибочных решений при диагностике ОД. Типовыми ошибками диагноза ОД являются ложная тревога (оценивается стоимостью последствий C_{21}) и пропуск дефекта (оценивается стоимостью последствий C_{12}).

В работе в качестве объекта диагноза выбран силовой трансформатор с жидким диэлектриком. На этом ОД апробирована методика



Рис. 7. Изменение вероятности среднего риска по годам эксплуатации с учетом стоимости пропуска дефекта C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

Fig. 7. Change in the probability of the average risk over the years of operation, taking into account the cost of missing the defect C_{12} :

1 – $C_{12} / C_{21} = 20$; 2 – $C_{12} / C_{21} = 40$; 3 – $C_{12} / C_{21} = 60$; 4 – $C_{12} / C_{21} = 80$; 5 – $C_{12} / C_{21} = 100$

отбора необходимого и достаточного количества диагностических признаков на основе метода Неймана – Пирсона с учетом стоимости пропуска дефекта.

Представленная работа позволит преодолеть сложности при внедрении стратегии ТОиР «по техническому состоянию», заключающиеся в необходимости наличия достаточного количества информативных диагностических признаков для оценки реального технического состояния ОД. Проведенные исследования позволяют

научно обосновать отбор количества параметров, исследуемых для оценки текущего технического состояния ОД. Доказано, что количество таких параметров может изменяться в зависимости периода эксплуатации ОД.

Результаты работы могут быть использованы при разработке методики отбора диагностических признаков для постановки верного диагноза о текущем техническом состоянии оборудования с учетом стоимости пропуска дефекта.

Список литературы

1. Правила организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей СО 34.04.181-2003. М., 2004. 447 с.
2. Стенин В.А., Беркович Я.Д. К вопросу увеличения межремонтного периода энергооборудования // Электрические станции. 1988. № 7. С. 58–60.
3. Пути совершенствования системы ремонта энергетических установок / А.В. Андрушин, В.А. Стенин, Н.И. Тимошенко и др. // Вестник МЭИ. 1997. №3. С. 27–31.
4. Назарычев А.Н. Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния. Иваново : ИГЭУ, 2002. 168 с.
5. Фудзияма К., Сайто К. Метод прогнозирования оптимальных интервалов ремонта и объемов ремонта корпусов паровых турбин на основе статистического анализа данных о длине трещины // Журнал Общества материаловедения. 2014. № 63 (8). С. 608–613.
6. Малкин В.С. Техническая диагностика. М. : Лань, 2013. 272 с.
7. Сафарбаков А.М., Лукьянов А.В., Пахомов С.В. Основы технической диагностики деталей и оборудования. Ч. 1. Иркутск : ИрГУПС, 2007. 128 с.
8. Любимов И.В., Мешков С.А. Статистические методы контроля качества и надежности технических систем. СПб. : Балт. гос. техн. ун-т., 2010. 93 с.
9. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Диагностика и техническое обслуживание электроустановок потребителей. М. : НЦ ЭНАС, 2016. 392 с.
10. Барсуков С.В., Пахомов С.В., Логинова Н.С. Модель технического обслуживания объекта системы железнодорожного транспорта «по техническому состоянию» на основании диагностирования методом минимального риска // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : тр. науч.-практ. конф. Иркутск, 2017. Т. 2. С. 609–612.
11. Barsukov S., Pakhomov S. Forecast model for estimating the service life of a diagnosed object based on the Neyman-Pearson method // 10th International Scientific and Technical Conference «Polytransport Systems». Tomsk, 2018 Vol. 216. P. 03011.
12. Клячкин В.Н. Статистические методы в управлении качеством. М. : Финансы и статистика ; ИНФРА-М, 2009. 302 с.
13. О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации : постановление Правительства РФ № 806 от 17.08.2016 (ред. от 21.03.2019). Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локальной сети.
14. Об утверждении методических указаний по расчету вероятности отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования и оценки последствий такого отказа : приказ Министерства энергетики Российской Федерации № 123 от 19.02.2019 г. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локальной сети.
15. Лубков Н.В. К вопросу оценки ресурса технических систем // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 : сб. тр. конф. М., 2014. С. 7627–7633.
16. ГОСТ Р ИСО 17359-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство. Введ. 2015–10–20. М. : Стандартиформ, 2019. 28 с.
17. Фандеев В.П., Тутушкин В.И. Методический подход к выбору диагностических параметров для прогнозирования технического состояния электронных приборов и аппаратуры // Известия вузов Поволжского региона: Технические науки. 2011. № 3. С. 124–131.
18. Планирование технического перевооружения и реконструкции оборудования. Расчет варианта технического воздействия : стандарт ОАО «ГидроОГК. М. : ОАО «ГидроОГК». 68 с.
19. ГОСТ Р 55234.3-2013. Практические аспекты менеджмента риска. Процедуры проверки и технического обслуживания оборудования на основе риска. Введ. 2014–12–01. М. : Стандартиформ, 2014. 56 с.

References

1. Pravila organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya, zdanii i sooruzhenii elektrostantsii i setei: SO 34.04.181-2003 [Rules for the organization of maintenance and repair of equipment, buildings and structures of power plants and networks SO 34.04.181-2003]. Moscow, 2004. 454 p.
2. Stenin V.A., Berkovich Ya.D. K voprosu uvelicheniya mezhremontnogo perioda energooborudovaniya [On the issue of increasing the inter-repair period of power equipment]. *Elektricheskie stantsii* [Electric power stations], 1988, no. 7, pp. 58–60.

3. Andryushin A.V., Stenin V.A., Timoshenko N.I., Tereshchenko O.G. Puti sovershenstvovaniya sistemy remonta energeticheskikh ustanovok [Ways to improve the repair system of power plants]. *Vestnik MEI* [Bulletin of the Moscow Energetic Institute], 1997, no. 3, pp. 27–31.
4. Nazarychev A.N. Metody i modeli optimizatsii remonta elektrooborudovaniya ob'ektov energetiki s uchetoм tekhnicheskogo sostoyaniya [Methods and models for optimizing the repair of electrical equipment of energy facilities taking into account the technical condition]. Ivanovo: IGEU Publ., 2002. 168 p.
5. Fujiyama K., Saito K. Metod prognozirovaniya optimal'nykh intervalov remonta i ob'emov remonta korpusov parovykh turbin na osnove statisticheskogo analiza dannykh o dline treshchiny [A method for predicting optimal repair intervals and repair volumes of steam turbine housings based on statistical analysis of crack length data]. *Zhurnal Obshchestva materialovedeniya* [Journal of the Society of Materials Science], 2014, vol. 63 (8), pp. 608–613.
6. Malkin V.S. Tekhnicheskaya diagnostika [Technical diagnostics]. Moscow: Lan' Publ., 2013.
7. Safarbakov A.M., Luk'yanov A.V., Pakhomov S.V. Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki detalei i oborudovaniya. Chast' 1 [The basics of technical diagnostics of parts and equipment. Part 1]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2007. 128 p.
8. Lyubimov I.V., Meshkov S.A. Statisticheskie metody kontrolya kachestva i nadezhnosti tekhnicheskikh sistem [Statistical methods for quality control and reliability of technical systems]. Saint Petersburg: BGTU Publ., 2010. 93 p.
9. Sibikin Yu.D., Sibikin M.Yu. Diagnostika i tekhnicheskoe obsluzhivanie elektroustanovok potrebitel' [Diagnostics and maintenance of electrical consumers]. Moscow: NTs ENAS Publ., 2016. 392 p.
10. Barsukov S.V., Pakhomov S.V., Loginova N.S. Model' tekhnicheskogo obsluzhivaniya ob'ekta sistemy zheleznodorozhnogo transporta «po tekhnicheskomu sostoyaniyu» na osnovanii diagnostirovaniya metodom minimal'nogo riska [The model of maintenance of the object of the railway transport system «according to the technical condition» based on the diagnosis by the method of minimal risk]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region], 2017, vol. 2, pp. 609–612.
11. Barsukov S., Pakhomov S. Forecast model for estimating the service life of a diagnosed object based on the Neyman-Pearson method. 10th International Scientific and Technical Conference «Polytransport Systems». Tomsk, 2018, vol. 216, P. 03011.
12. Klyachkin V.N. Statisticheskie metody v upravlenii kachestvom [Statistical methods in quality management]. Moscow: Finansy i statistika; INFRA-M Publ., 2009. 302 p.
13. Postanovlenie Pravitel'stva RF N 806 ot 17.08.2016 (red. ot 21.03.2019) «O primenении risk-orientirovannogo podkhoda pri organizatsii otdel'nykh vidov gosudarstvennogo kontrolya (nadzora) i vnesenii izmenenii v nekotorye akty Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii» [Decree of the Government of the Russian Federation No 806 dated August 17, 2016 (ed. dated March 21, 2019) «On the application of a risk-based approach in the organization of Certain Types of state control (supervision) and Amendments to Certain Acts of the Government of the Russian Federation»].
14. Prikaz Ministerstva energetiki Rossiiskoi Federatsii № 123 ot 19.02.2019 g «Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazanii po raschetu veroyatnosti otkaza funktsional'nogo uzla i edinitsy osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya i otsenki posledstviy takogo otkaza» [The order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No 123 dated February 19, 2019 «On approval of methodological guidelines for calculating the probability of failure of a functional unit and a unit of basic technological equipment and assessing the consequences of such a failure»].
15. Lubkov N.V. K voprosu otsenki resursa tekhnicheskikh sistem [On assessment of the resource of technical systems]. *Sbornik trudov konferentsii «XII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014»* [Proceedings «XII All-Russia meeting on control problems»]. Moscow, 2014, pp. 7627–7633.
16. GOST R ISO 17359-2015 Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Obshchee rukovodstvo [State Standard R ISO 17359-2015 Condition monitoring and diagnostics of machines. General guidance]. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 28 p.
17. Fandeev V.P., Tutushkin V.I. Metodicheskii podkhod k vyboru diagnosticheskikh parametrov dlya prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya elektronnykh priborov i apparatury [Methodical approach to the choice of diagnostic parameters for predicting the technical condition of electronic devices and equipment]. *Izvestiya vuzov Povolzhskogo regiona: Tekhnicheskie nauki* [Bulletins of high educational organizations of the Volga region: Technical sciences], 2011, no. 3, pp. 124–131.
18. Standart OAO «GidroOGK» «Planirovaniye tekhnicheskogo perevoorzheniya i rekonstruksii oborudovaniya. Raschet varianta tekhnicheskogo vozdeistviya» [Standard of JSC «Gidrogk» «Planning of technical re-equipment and reconstruction of equipment. Calculation of the technical impact option»]. Moscow: JSC «Gidrogk» Publ., 68 p.
19. GOST R 55234.3-2013 Prakticheskie aspekty menedzhmenta riska. Protседury proverki i tekhnicheskogo obsluzhivaniya oborudovaniya na osnove riska [State Standard R 55234.3-2013 Practical aspects of risk management. Risk-based equipment inspection and maintenance procedures]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 56 p.

Информация об авторах

Барсуков Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: bars_irkutsk@mail.ru.
Пахомов Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: psv1960@mail.ru.

Information about the authors

Sergei V. Barsukov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: bars_irkutsk@mail.ru.
Sergei V. Pakhomov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: psv1960@mail.ru.