

УДК 669.02/09

Белодеденко Сергей Валентинович⁽¹⁾, профессор, доктор технических наук
Гануш Василий Иванович⁽¹⁾, старший преподаватель
Гречаный Алексей Николаевич^(1,2), аспирант
Ибрагимов Мехмат Саядуллаевич⁽¹⁾, аспирант

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ВИДЕ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

⁽¹⁾ Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр

⁽²⁾ Запорожская государственная инженерная академия

Смещение акцента с ремонтных воздействий на диагностирование технического состояния позволяет решить вопрос по установке даты и объемов восстановительных операций. В связи с этим возрастает актуальность планирования контроля состояния технических систем. Рассмотрены области применения моделей диагностических параметров в виде случайного процесса и приведены алгоритмы диагностирования на основе указанных моделей. При помощи теории выбросов получено новое решение задачи определения безопасного срока работы, который равен периоду контроля.

Ключевые слова: модель выбросов, пик-фактор, техническое состояние, межконтрольный интервал, техническая система.

Введение. Проактивные стратегии технического обслуживания и ремонта (ТОиР) отмечают перераспределением затрат в этой области. При этом доля затрат на ремонты снижается, а доля затрат на инспектирование (диагностирование) увеличивается, а общие удельные затраты на ТОиР уменьшаются. Для проактивных стратегий разработаны экономико-статистические модели оптимизации режимов ТОиР [1].

Для ответственных элементов технических систем рассмотренные стоимостные критерии могут отходить на второй план при назначении режимов ТОиР. Акцент в этом случае делается на критерии надежности и безопасности, которые успешно реализуются в нормативных эксплуатационных стратегиях, но не всегда актуальны в условиях реального производства

Анализ проблемы. Категорический подход акцентирования на критерии надежности и безопасности не отвечает тенденциям применения эффективных стратегий ТОиР, в которых, с одной стороны, соблюдается принцип «прогнозирование и предупреждение» взамен принципа «выявление – устранение». С другой стороны, они обеспечивают довольно полную выработку технического ресурса к моменту замены (восстановления) технической системы.

Один из путей достижения компромисса между такими противоречивыми требованиями к стратегии ТОиР связан с контролем деградационных процессов. Их моделирование, собственно, и представляет вероятностно-физический подход в теории технического обслуживания.

Вполне очевидно, что вопросы периодичности и частоты контроля для подобной технологии обслуживания оборудования имеют большое значение. Кроме того, подобный подход позволяет учитывать старение механических систем. Это происходит путем контроля физико-технических параметров, определяющих эксплуатационную готовность системы [2].

Постановка задачи. Один из путей снижения затрат на ТОиР связан с увеличением межремонтного периода (эксплуатационного цикла) за счет использования резерва в виде периода развития неисправности или дефекта до критического значения. Собственно, тенденция введения нескольких фаз технического состояния в эксплуатационные модели направлена на сокращение ремонтных издержек и повышение готовности оборудования. Целью предоставленной статьи является анализ и разработка алгоритма планирования операций инспектирования при обслуживании технических систем по их фактическому состоянию.

Реализация задачи. По обыкновению, в качестве диагностических параметров избирают характеристики, которые являются чувствительными к изменению технического состояния. За это явление ответственны деградационные процессы, протекающие в материалах, из которых изготовлена техническая система. Уже после этого ухудшаются рабочие показатели самой технической системы. Если диагностический признак тесно связан с деградационным процессом в материале конструкции, то он считается прямым признаком. Однако, большинство диагностических параметров, которые используются на практике, не являются прямыми. Поэтому для

него сложно установить предельный уровень $[Y]$. Для информативного диагностического параметра со временем наработки должен наблюдаться тренд его срединного значения. В таком случае нужно использовать модель со случайными величинами параметров эксплуатационного процесса, при помощи короткой удобно прогнозировать поведение технической системы. Если тренд не наблюдается, то остается воспользоваться моделью диагностических параметров в виде случайного процесса $y(t)$.

Как правило, в таком виде моделируются косвенные диагностические признаки, не связанные напрямую с деградационным процессом, но влияние которых содействует повреждению элементов. Чаще всего модель случайного процесса используют для формализации колебаний рабочих параметров машин (скорости, давления, температуры, мощности), нагрузок и параметров вибрации механических систем. Подобная модель актуальна на начальных этапах освоения диагностической системы, когда еще не выяснено, какой из параметров может стать диагностическим. Например, для диагностирования подшипника виброактивным способом можно применять, по крайней мере, девять параметров и по истечении определенного промежутка времени будет построена диагностическая модель. Но на этом отрезке времени следует планировать инспектирование обозначенной модели. Также модель случайного процесса наблюдается на катастрофическом участке кинетики диагностического параметра, который наступает после постоянного участка. Поскольку величина $[Y]$ значительно больше, чем текущие значения y , то время эксплуатации может быть довольно большим, а систему следует контролировать переносными средствами диагностирования.

Имея параметры процесса, которые образуют нестационарный пуассоновский поток, можно воспользоваться теорией выбросов. Тогда параметр этого потока $\lambda(t)$ является обратной величиной межконтрольного интервала: $\delta_j = 1/\lambda(t_j)$. Идея метода основана на оценке вероятности того, что на отрезке времени эксплуатации $\delta_j = t_j - t_{j-1}$ значение параметра y не превысит допустимого значения [4].

Одну из характеристик, которая определяет период выбросов, можно записать как

$$\gamma = \frac{[Y] - y_m}{S_y}, \quad (1)$$

где y_m , S_y – соответственно среднее значение и среднеквадратичное отклонение амплитуды ко-

лебаний диагностического параметра, представленные стационарным случайным процессом.

Данную характеристику иногда называют статистическим запасом, а по своей структуре она отвечает пик-фактору, который определяет величину (в этом случае – амплитуду) выброса. Среднее количество выбросов в единицу времени за уровень $[Y]$ в одну сторону будет равно [4]:

$$\lambda = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{S_{y_t}^2}{S_y^2} \right)^{0,5} \cdot \exp(-0,5\gamma^2), \quad (2)$$

где $S_{y_t}^2$ – дисперсия интенсивности процесса dy/dt .

Для гармонического случайного процесса $y(t) = y_m \cdot \cos(\omega \cdot t)$ с циклической частотой ω его дисперсия определяется дисперсией амплитуды:

$$S_{y_t}^2 = S_y^2 \cdot [\cos(\omega \cdot t)^2]. \quad (3)$$

Тогда

$$S_{y_t}^2 = S_y^2 \cdot [-\omega \cdot \sin(\omega \cdot t)^2]. \quad (4)$$

Предполагается, что можно принять $(S_{y_t}^2 / S_y^2)^{0,5} = S_{y_t} / S_y = \omega$ [5].

В этом случае

$$\lambda = \delta^{-1} = f \cdot \exp(-0,5\gamma^2), \quad (5)$$

где $f = 0,5 \omega \cdot \pi$ – частота процесса, которая выполняет роль масштаба.

Вероятность безотказной работы в момент инспекции t_j представляет систему уравнений:

$$P_j = 1 - \exp(-\lambda \cdot t_j); \quad (6)$$

$$P_j = 1 - \exp(-2\lambda \cdot t_j). \quad (7)$$

Формула (6) отвечает одностороннему выбросу, формула (7) – двустороннему выбросу за границы допуска $[Y]$. Из этого вытекает, что для поддержания безотказности на допустимом уровне в процессе эксплуатации период контроля должен уменьшаться. То же самое можно сказать, если наблюдается возрастающий тренд параметра y_m : обусловленное этим снижение величины γ сопровождается ростом величины λ , что подтверждает концепцию неперiodических инспекций.

Модель выбросов относительно назначения межконтрольных периодов имеет смысл в случае, когда инспекция может оказывать существенное влияние на ход процесса $y(t)$. Это возможно для технических систем, где преобладают отказы со сравнительно невысокими потерями (низкий риск). В других случаях задача превращается в определение межремонтных периодов или сроков службы. Модель потока выбросов (5) хорошо работает для медленно протекающих

процессов, а также в сравнительно узком диапазоне пик-фактора $3,0 > \gamma > 5,25$. Поэтому с учетом этого следует устанавливать величину $[Y]$. Если значение пик-фактора будет больше, то модель (5) (на основе распределения Райса) описывается другим законом распределения [7,8].

Неудобство метода выбросов связано со сложностью объективного установления начала действия процесса $y(t)$ на возобновляемую обслуживаемую техническую систему. При замене части элементов механической системы могут изменяться параметры процесса, влияющего на другие ее элементы, что влияет на назначение упреждающих допусков. Один из путей преодоления подобных противоречий для «шок-

процессов», что обычно полагают причиной внезапных отказов системы, связан с применением накопительной модели поврежденной $D(t) = \sum_1^{N_e} \exp(-\lambda \cdot t)$ для эксплуатационных циклов N_e [6]. Тогда появляется возможность для прогнозирования внезапных отказов, переводя их в разряд постепенных.

Есть несколько вариантов дальнейшего использования модели выбросов [3]. Так, метод на основе общей корреляционной теории предполагает предыдущее получение необходимого количества реализаций n_y всего процесса $y(t)$ (рис. 1а).

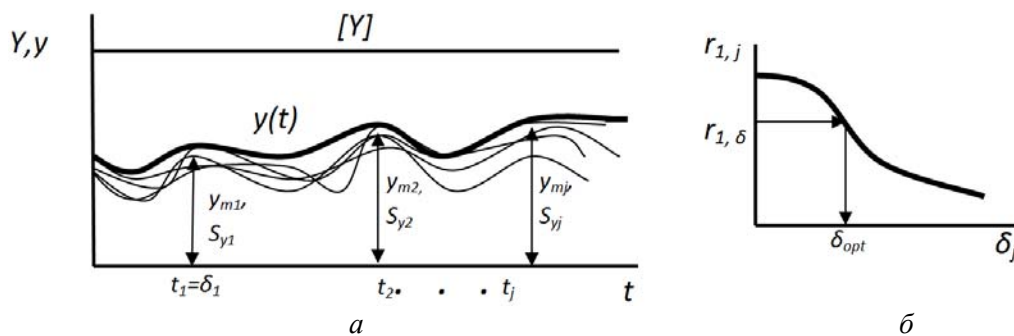


Рисунок 1 – К определению корреляционных коэффициентов по реализациям процесса $y(t)$ (а), а также схема определения интервала контроля на основе общей корреляционной теории (б)

Эта процедура не является безпроблемной (необходимо наличие алгоритма построения процесса, например, статистическим моделированием), но получив по максимумам огибающую процесса, уже по ней можно определять межконтрольные интервалы δ_j . Далее необходимо найти значение парных коэффициентов корреляции для первого и последующих интервалов δ_j :

$$r_{1,j} = \frac{1}{n_y \cdot S_{y1} \cdot S_{yj}} \cdot \sum_{i=1}^{n_y} (y_{i1} - y_{m1})(y_{ij} - y_{mj}), \quad (7)$$

где $i = 1 \dots n_y$ – номер реализации процесса; y_{ij} – текущее значение диагностического параметра в момент контроля j ; S_{yj} , y_{mj} – среднеквадратичное отклонение и среднее значение в момент контроля j .

С одной стороны, данная операция обосновывает вероятность выхода максимума y_j за границы допуска, а, с другой, построив график корреляционной функции $r_{1,j}(\delta_j)$ (рис. 1б), получают характеристику возможности индивидуального прогнозирования. Оно возможно, если $r_{1,j} \Rightarrow 1$ и невозможно при $r_{1,j} \Rightarrow 0$ (сильное перемешивание реализаций процесса). Далее следует определить необходимое (нормированное) значение парного коэффициента корреляции, что обеспе-

чивает невыход y_j выше значения $[Y]$ (односторонний выброс):

$$r_{1,\delta} = \sin[0,5\pi \cdot (1 - k_R)] . \quad (8)$$

Он учитывается при помощи коэффициента запаса $kt = 3 \dots 10$ [3]. При этом величина $r_{1,\delta} > 0,9$ стремится к единице. Сравнивая действующее $r_{1,j}$ и необходимое $r_{1,\delta}$ значение парных коэффициентов корреляции, получают достаточное значение интервала, который по аналогии обозначен как δ_{opt} (рис. 1б). На этом отрезке эксплуатации гарантируется ситуация, когда $y(t) < [Y]$.

Выводы. Для эффективного диагностирования следует стараться переходить от моделей диагностических параметров типа «чисто случайный процесс» к кинетическим моделям со случайными значениями параметров, что отвечает принципу пошаговой идентификации диагностических моделей. С практической точки зрения наиболее приемлемым служит алгоритм на основании модели (5). При этом целесообразно решать обратную задачу: сначала назначить восприимчивый период контроля, а затем по формуле (1) определить предельное значение косвенного диагностического параметра $[Y]$.

Библиографический список

1. **Белодеденко, С. В.** Модели «отложенного ремонта» для обслуживания механических систем [Текст] / С. В. Белодеденко, А. Н. Гречаний, М. С. Ибрагимов // Вісник сертифікації залізничного транспорту. – 2017. – № 3(43). – С. 6-13.
2. **Байхельт, Ф.** Надежность и техническое обслуживание [Текст] / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М. : Радио и связь, 1988. – 392 с.
3. **Надежность и эффективность в технике** [Текст]: Справочник. В 10 т. – М. : Машиностроение, 1989. – Т. 7. Качество и надежность в производстве / Под ред. И. В. Аполлонова. – 280 с.
4. **Вентцель, Е. С.** Прикладные задачи теории вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Радио и связь, 1983. – 416 с.
5. **Болотин, В. В.** Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст] / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.
6. **Li, W.** A Condition – based inspection – Maintenance Model based on geometric Sequences for Systems With a degradation process and Random Shocks [Text] / W. Li, H. Pham // Life Cycle Reliability and Safety Engineering. – 2012. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 26-34.
7. **Belodedenko, S.** Risk indicators and diagnostic models for sudden failures [Текст] / S. Belodedenko, A. Grechany, M. Ibragimov // Scientific journal of the Ternopil national technical university. – 2017. – No. 4 (88). – P. 111-118.
8. **Белодеденко, С. В.** Оценка безопасной долговечности элементов конструкций при проектировании и эксплуатации технологического оборудования [Текст] / С. В. Белодеденко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – № 6. – С. 40-46.

Білодіденко Сергій Валентинович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машин та агрегатів металургійного виробництва, Національна металургійна академія України (м. Дніпро, Україна). E-mail: sergeibelo@gmail.com

Гануш Василь Іванович, старший викладач кафедри машин та агрегатів металургійного виробництва, Національна металургійна академія України (м. Дніпро, Україна). E-mail: ganush@rambler.ru

Гречаний Олексій Миколайович, аспірант кафедри машин та агрегатів металургійного виробництва, Національна металургійна академія України (м. Дніпро, Україна). E-mail: tartalet@ukr.net

Ібрагімов Мехман Саядуллаєвич, аспірант кафедри машин та агрегатів металургійного виробництва, Національна металургійна академія України (м. Дніпро, Україна)

ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ У ВИГЛЯДІ ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ СТАНУ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Зсування акценту з ремонтних дій на діагностування технічного стану дозволяє розв'язати питання з установкою дати та обсягів відновлювальних операцій. У зв'язку з цим зростає актуальність планування контролю стану технічних систем. Розглянуто області застосування моделей діагностичних параметрів у вигляді випадкового процесу та наведено алгоритми діагностування на підставі таких моделей. За допомогою теорії викидів отримано нове розв'язання задачі визначення безпечного терміну роботи, який дорівнює періоду контролю.

Ключові слова: модель викидів, пік-фактор, технічний стан, міжконтрольний інтервал, технічна система

Belodedenko Sergey, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department Machines and Aggregates of Metallurgical Production, National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnipro, Ukraine). E-mail: sergeibelo@gmail.com

Ganush Vasily, Senior Teacher of Department Machines and Aggregates of Metallurgical Production, National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnipro, Ukraine). E-mail: ganush@rambler.ru

Grechany Alexey, Graduate Student of Department Machines and Aggregates of Metallurgical Production, National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnipro, Ukraine). E-mail: tartalet@ukr.net

Ibragimov Mehman, Graduate Student of Department Machines and Aggregates of Metallurgical Production, National Metallurgical Academy of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

APPLICATION OF MODELS OF DIAGNOSTIC PARAMETERS IN THE FORM OF A RANDOM PROCESS TO CONTROL THE CONDITION OF TECHNICAL SYSTEMS

Shifting the focus from repair effects to diagnosing a technical condition allows solving the issue of setting dates and volumes of recovery operations. In this connection, the relevance of planning the monitoring of the state of technical systems is increased. The areas of application of models of diagnostic parameters in the

form of a random process are considered. The diagnostic algorithms based on such models are given. Using the theory of emissions, a new solution was obtained to determine the safe duration of work, which is equal to the monitoring period.

Keywords. Emission model, peak factor, technical condition, intercontrol interval, technical system

Стаття надійшла до редакції 31.10.2018 р.
Рецензент, проф. Й.К. Огинський

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>