

В.П. Сиваков, В.И. Музыкантова, С.Н. Вихарев, С.А. Мишин

Уральский государственный лесотехнический университет

Сиваков Валерий Павлович родился в 1942 г., окончил в 1971 г. Уральский лесотехнический институт, доктор технических наук, декан лесомеханического факультета Уральского государственного лесотехнического университета. Имеет более 200 печатных работ в области технической диагностики и виброзащиты оборудования лесопромышленного комплекса.

E-mail: sivakov@usfeu.ru

Музыкантова Вера Ивановна родилась в 1951 г., окончила в 1974 г. Уральский государственный лесотехнический институт, ведущий инженер кафедры машин и оборудования ЦБП Уральского государственного лесотехнического университета. Имеет более 50 печатных работ в области технической диагностики и виброзащиты оборудования целлюлозно-бумажного производства.

Тел.: (343) 261-67-05



Вихарев Сергей Николаевич родился в 1958 г., окончил в 1980 г. Уральский государственный лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования ЦБП Уральского государственного лесотехнического университета. Имеет около 50 печатных работ в области технической диагностики и виброзащиты оборудования целлюлозно-бумажного производства.

E-mail: cvp200558@mail.ru

Мишин Сергей Анатольевич родился в 1946 г., окончил в 1969 г. Уральский лесотехнический институт, начальник учебно-методического управления Уральского государственного лесотехнического университета. Имеет более 60 печатных работ в области исследования вибрации оборудования целлюлозно-бумажного производства.

Тел.: (343) 374-64-17

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
ОБОРУДОВАНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА
ДИАГНОСТИРОВАНИЕМ***

Научно обоснован переход от технического диагноза узлов оборудования ЦБП к оценке технического состояния оборудования в целом. Предложен метод, обеспечивающий переход к техническому обслуживанию оборудования по состоянию.

Ключевые слова: техническая диагностика, модель диагностирования, кортеж, множество работоспособных состояний элемента, диагностический граф элемента.

Работоспособное техническое состояние (ТС) оборудования исследуется машиноведческими науками. Одной из задач исследований работоспособного состояния является обоснование ремонтов оборудования по состоянию. Решение этой задачи в теории надежности и технической диагностики имеет специфические особенности.

*Методика обоснования технического обслуживания оборудования диагностированием внедряется авторами на ОАО «Соликамскбумпром» при подконтрольной эксплуатации насосов и рафинеров.

Иерархическая структура оборудования

В теории надежности при исследовании видов ТС технологическое оборудование условно расчлняют на иерархии объектов, объекты, элементы (составные части объектов). Элемент классифицируется как простейшая машина, реже механизм, имеющий не менее двух состояний функционирования, например работоспособное и неработоспособное. Элементы на диагностируемые узлы не разделяют.

В технической диагностике при исследовании видов ТС производят расчленение элементов на диагностируемые узлы, т.е. на составные части нижнего уровня градации, принятой в теории надежности. Диагностируемый узел – часть элемента, которую не требуется детализировать при диагностировании ТС в режиме эксплуатации. По результатам диагноза узлов элемента оценивают ТС элемента в целом. Единый подход к градации технологического оборудования по структурным подуровням не выработан, что сдерживает формирование общей методики исследования ТС объектов.

Для обоснования технического обслуживания оборудования целлюлозно-бумажного производства по состоянию предлагается следующая иерархическая структура: узлы → элементы → объекты → иерархия объектов. Иерархическая структура расширяет градацию составных частей оборудования до диагностируемых узлов.

Модели исследования диагностических признаков

В теории надежности работоспособное состояние контролируют по модели отказов. Отказ как событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, занимает переходное положение между

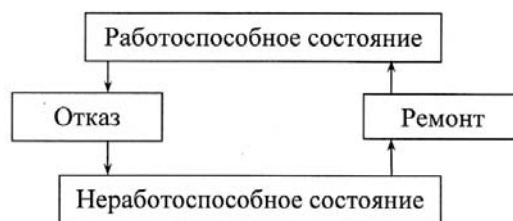


Рис. 1. Модель отказа и восстановления элемента

работоспособным и неработоспособным состояниями (рис. 1). Решение задач диагностирования по модели отказа связано с прогнозированием надежности на период до следующего осмотра. С помощью моделей отказов определяют временные эксплуатационные характеристики: наработка до отказа, остаточный ресурс и др. Результаты исследования отказов объекта используют в виде генеалогического древа по отношению к работоспособности объекта. По анализу отказа восстанавливают состояние, в котором объект находился в некоторый предшествующий момент.

Определение причин возникновения отказов важно для недопущения в будущем подобных отказов данного объекта и аналогичных объектов. Однако по модели отказов количественные характеристики работоспособного состояния узлов элемента непосредственно не измеряют. Результаты анализа отказов нельзя использовать для оперативного контроля работоспособного состояния.

Методами технической диагностики диагностические признаки узла эксплуатируемого элемента измеряют, как правило, для работоспособного состояния (рис. 2). При этом в модели диагностирования исключено событие «Отказ». По диагностическим признакам производят оценку уровня работоспособности узла элемента. В качестве допустимых уровней работоспособного состояния используют нормы, характерные для нового оборудования, заложенные в диагностической аппаратуре и разработанные при эксплуатации оборудования.

Диагностические признаки, не соответствующие допустимому уровню, показывают, что резерв времени работоспособного состояния узла элемента ограничен, однако достаточен для уточнения диагноза и принятия решения по выводу элемента на ремонт по состоянию.

При диагностировании в рабочем режиме объект не выводят из эксплуатации, при других видах диагностирования эксплуатационный режим временно прерывают. Техническое диагностирование, в частности вибрационное, имеет ряд нерешенных проблем.

Обычно диагнозу подвергают составные части машин: механизмы, детали (далее узлы). Диагностируемые узлы контролируют автономно. Влияние ТС одного узла на ТС других узлов машины, а также на ТС машины в целом исследовано мало. Опыт переноса практики диагностирования узлов для контроля ТС элементов машин, сложных объектов и иерархий сложных объектов малоэффективен.

При диагнозе элементов и сложных объектов информации о неисправностях отдельных узлов недостаточно для обоснования ремонтов по состоянию. Необходимо определить общее ТС элемента, объекта, проанализировать возможные переходы в другие состояния, определить объемы ремонтных работ и время их проведения.

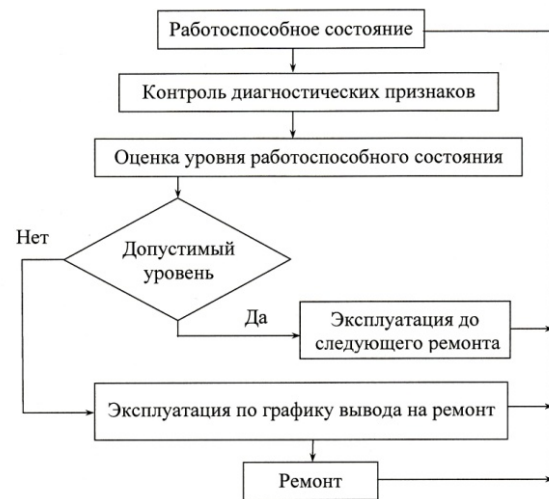


Рис. 2. Модель диагностирования ТС узла элемента

Сочетание методов технической диагностики раннего обнаружения неисправностей узлов, элементов методами надежности машин по обоснованию технического обслуживания элементов и объектов является актуальным при переходе к ремонтам по ТС.

*Связь параметрического диагноза ТС узлов
и непараметрического диагноза ТС элементов, объектов*

При диагностировании элементов сложных объектов для оценки ТС отдельных узлов элементов оборудования применяют различные виды диагностической аппаратуры. Например, при диагностировании оборудования в производстве целлюлозы и термомеханической массы используют виброизмерительные приборы для определения среднеквадратических значений параметров вибрации, анализаторы спектра измеряемых частот, ультразвуковые, температурные приборы и др.

Для формирования диагностической оценки элемента диапазоны параметрических оценочных критериев узлов данного элемента разделяют на подуровни: [Ф] – «допустимо», ФН – «неудовлетворительно», ФП – «предотказно». На рис. 3 показаны подуровни [Ф], ФН и ФП для диагноза виброскорости с учетом изменения за период наработки. Измеренные при диагностировании значения уровней диагностического параметра подвергались обработке методами математической статистики. Например, параметры вибрации исследовались как случайные переменные величины. Для выработки измеренных значений параметров вибрации был определен закон распределения, среднее выборочное значение, среднее квадратическое отклонение и произведено исключение грубых ошибок.

Определение допустимых вибрационных критериев основывается на проверке нулевой и альтернативной гипотез [2].

Критическая статистика для проверки гипотез принималась в зависимости от однородности значений Φ_i в выборке по t -распределению максимального отклонения, которое определяли по следующей формуле:

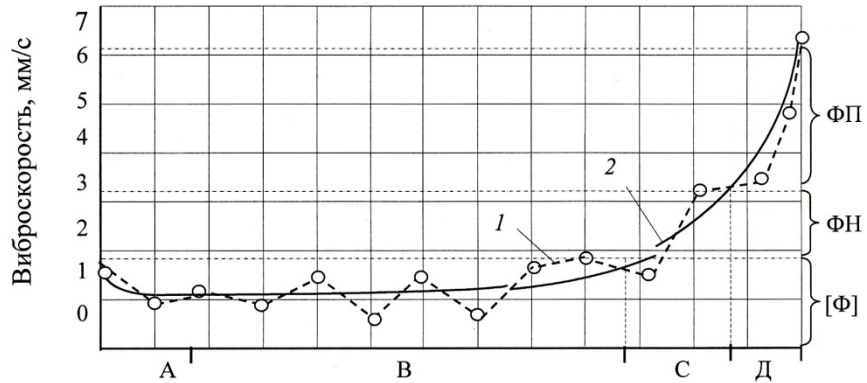


Рис. 3. Графики зависимости виброскорости подшипниковой опоры циркуляционного насоса от наработки: 1 – экспериментальный; 2 – идеализированный; А, В, С и Д – зоны соответственно приработки, установившегося режима, зарождающегося и ускоренного развития дефекта

$$\bar{\tau} = |\Phi^{\Pi} - \bar{\Phi}| / \sigma_{\Phi};$$

где

Φ^{Π} – значение параметра, исключаемое из выборки,

$\Phi^{\Pi} \in \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n\}$;

n – число значений Φ_i в выборке, $i = 1, \dots, n$;

$\bar{\Phi} \in (\bar{S}_e, \bar{V}_e, \bar{T})$ – среднее арифметическое значение выборки;

\bar{S}_e – виброперемещение;

\bar{V}_e – виброскорость;

\bar{T} – тренд вибрации;

σ_{Φ} – среднее квадратическое отклонение.

Граничные значения τ_{α} определяли по таблице квантилей τ -распределения при уровнях значимости 5...10 % (вероятность отвергнуть нулевую гипотезу составляла 5...10 %). Нулевую гипотезу принимали для однородных выборок при $\bar{\tau} \leq \tau_{\alpha}$.

Допустимые пределы вибрации определяли по формуле

$$|\Phi| = \bar{\Phi} \pm \tau_{\alpha} \sigma_{\Phi}.$$

Знак «+» относился к возрастанию вибрационной функции за период наработки контролируемого узла, «-» – к снижению.

Параметры ФН (вибрация неудовлетворительная) и ФП (вибрация предотказного состояния) определяли, используя следующие зависимости:

$$\Phi_{\text{Н}} = \bar{\Phi} \pm k_{\text{н}} \tau_{\alpha} \sigma_{\Phi}; \quad \Phi_{\text{П}} = \bar{\Phi} \pm k_{\text{п}} k_{\text{н}} \tau_{\alpha} \sigma_{\Phi},$$

где $k_{\text{н}}$ и $k_{\text{п}}$ – коэффициенты предупредительных границ, $k_{\text{н}} \approx 1,3 \dots 1,4$;

$k_{\text{п}} \approx 1,1 \dots 1,2$ (получены из опыта диагностирования).

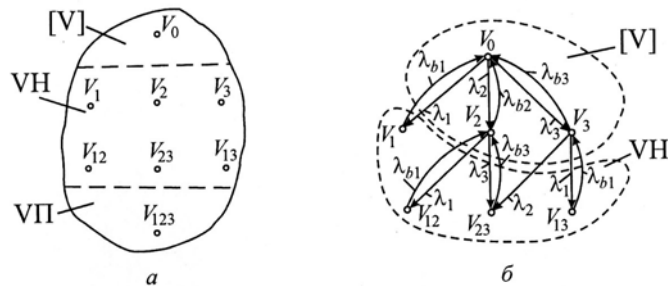


Рис. 4. Схема формирования диагностического графа $G(V, \Lambda)$ изменения ТС элемента (насос системы циркуляции): a – множество V^m элемента; b – диагностический граф $G(V, \Lambda)$ элемента двухуровневой иерархии ([V], VП и VH – кортежи соответственно допустимых, неудовлетворительных и предотказных ТС

Сокращенные периоды времени Δt_{bj} и Δt_{cj} между измерениями возрастающей и снижающейся вибрации диагностируемых узлов в состоянии, близком к предотказному, определяли по формулам

$$\Delta t_{bj} = \frac{|\Phi| \Delta t}{m \Phi_j} ; \quad \Delta t_{cj} = \frac{\Phi_j \Delta t}{m |\Phi|} ,$$

где m – коэффициент, учитывающий безопасность эксплуатации узла с экстремальными уровнями вибрационной функции;

Φ_j – экстремальный уровень вибрационной функции узла при j -м измерении.

Аналогичные подуровни диапазонов оценочных критериев нарабатываются при подконтрольной эксплуатации для всех диагностируемых узлов независимо от вида приборов и измеряемого параметра.

Зависимость работоспособного ТС элемента машины от сочетания уровней ТС диагностируемых узлов элемента представляли в виде потока событий, определяемого вероятностными закономерностями. События N_i отказов каждого из узлов элемента рассматривали как несовместные [1]. Вероятность отказа элемента для несовместных событий отказов его узлов находили по формуле

$$Q\left(\sum_{i=1}^n N_i\right) = Q(N_1) + \dots + Q(N_n),$$

где $Q(N_i)$ – вероятность отказа i -го узла элемента;

n – число узлов элемента.

Установлено, что при низкой вероятности узлов $P(N_i)$ вероятность отказа элемента в целом может оказаться значительной. Для определения влияния ТС узлов на общее ТС элемента применяли диагностические графы.

Множество V^m сочетаний кортежей ТС элемента «и» (рис. 4, a) определяли как декартово произведение множеств R_j , $j = \overline{1, k}$:

$$V^m = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_k,$$

где k – мощность множества ТС элемента;

R_j – кортеж диагноза элемента, упорядоченное множество оценок диагноза узлов элемента, $R_j = \langle \Phi_{m1} \times \Phi_{m2} \times \dots \times \Phi_{mi} \times \dots \times \Phi_{mn} \rangle$;

Φ_{mi} – оценка диагноза i -го узла элемента, $\Phi_{mi} \in (\Phi_i, \Phi_{H_i}, \Phi_{П_i})$.

Диагностический граф элемента (рис. 4, б) состоит из подмножеств «допустимо» $|V|$ и «неудовлетворительно» VH множества V^n [3]. При распределении вершин V_j^n по подмножествам $|V|$ и VH , наряду с учетом числа неудовлетворительных оценок узлов, производили учет иерархии узлов и коэффициента обслуживания. Вершины предотказного состояния $VП$ не включали в диагностический граф, так как эксплуатация элемента при $V_j^n \in VП$ недопустима, и применяли в качестве оценочного критерия. Дуги λ_{bi} характеризуют интенсивности переходов при восстановлении ТС, λ_i – при ухудшении работоспособного ТС.

Для оценки работоспособного ТС элемента или объекта производили идентификацию определенного при измерении вибрации кортежа диагноза элемента с подмножествами вершин диагностического графа.

Алгоритм диагностирования ТС элементов имеет два уровня контроля. На первом уровне кортеж диагноза элемента проверяли на принадлежность к подмножеству предотказного ТС диагностического графа $VП$ (см. рис. 4, а). Если кортеж диагноза графа соответствовал предотказному состоянию, то элемент выводили на неплановый ремонт.

Второму уровню контроля подвергали только кортежи диагноза V_j^n , не идентифицированные с вершинами подмножеств $VП$ диагностического графа. Кортежи диагноза проверяли на принадлежность к подмножествам вершин $|V|$ (рис. 4, б). Если $V_j^n \in |V|$, то элемент находится в работоспособном состоянии. При $V_{j,i,k}^n \notin |V|$ для элемента предусматривается техническое обслуживание при плановом останове.

Предложенную методику рекомендуется использовать для оценки и прогнозирования ТС оборудования целлюлозно-бумажных производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 1972. – 368 с.
2. Муромцев, Ю.Л. Безаварийность и диагностика нарушений в химических производствах [Текст] / Ю.Л. Муромцев. – М.: Химия, 1990. – 143 с.
3. Сиваков, В.П. Оценка состояния исправности оборудования целлюлозно-го производства на основе диагностических графов [Текст] / В.П. Сиваков // Лесн. журн. – 2000. – № 5, 6. – С. 58–61. – (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 21.04.09

V.P. Sivakov, V.I. Muzykantova, S.N. Vikharev, S.A. Mishin
Ural State Forest Engineering University

Substantiation of Pulp-and-paper Production Maintenance Service by Diagnostics

Transfer from technical diagnosis of PPP equipment pieces to technical state assessment of equipment in whole is substantiated. The method ensuring the transfer to maintenance service according to the state is provided.

Keywords: technical diagnostics, diagnostic model, tuple, range of element efficient states, element diagnostic graph.
