

В.М. Нагорный, к.т.н., доцент, К.М. Ежков, Я.В. Пархоменко, студенты (Сумский государственный университет) г. Сумы, Украина

Методика оценки степени критичности технического состояния промышленного оборудования

Существующие методы оценки степени критичности технического состояния промышленного оборудования обеспечивают контроль только текущего значения диагностического признака без учета темпа (скорости) его изменения, что часто приводит к ошибкам. В статье изложена методика диагностирования, которая базируется на отслеживании характера изменения технического состояния машины во времени. Учет скорости изменения диагностического признака позволяет на более ранней стадии выявить наличие зарождающегося дефекта и своевременно остановить машину на упреждающий ремонт.

Ключевые слова: прогнозирование, вибрация, нормы вибрации.

Існуючі методи оцінки ступеня критичності технічного стану промислового обладнання забезпечують контроль тільки поточного значення діагностичної ознаки без урахування темпу (швидкості) її зміни, що часто призводить до помилок. У статті викладена методика діагностування, яка базується на відстеженні характеру зміни технічного стану машини в часі. Облік швидкості зміни діагностичної ознаки дозволяє на більшій ранній стадії виявити наявність дефекту, який зароджується, і своєчасно зупинити машину на попереджуючий ремонт.

Ключові слова: прогнозування, вібрація, норми вібрації.

Existing methods to predict the technical condition of rotary machines provide control only the current value of a diagnostic feature, without considering the tempo (speed) it changes as degradation of the technical state of the machine, which often leads to errors. In contrast, in this article the technique of diagnosis, which is based on the nature of the change tracking feature in time. Accounting rate of change of the diagnostic feature allows an earlier stage, as compared with current methods, the time to recognize the origin of the defect in a timely manner and to stop the car at a pre-emptive repair.

Keywords: forecasting, vibration, vibration severity standards.

В мире растет число техногенных катастроф, что связано, отчасти, с несовершенством методов оценки степени критичности текущего состояния промышленного оборудования и неэффективным прогнозом их остаточного ресурса. Существующие методики диагностирования предусматривают контроль только текущей величины диагностического признака, не учитывая темп (скорость) её изменения по мере деградации технического состояния машины, что нередко приводит к ошибкам.

В отличие от этого в данной статье рассматривается методика диагностирования, которая основывается на анализе не только текущей величины признака, но и отслеживается характер изменения признака во времени. Учёт скорости изменения величины диагностического признака, позволяет на более ранней стадии, по сравнению с действующими методиками, распознать момент зарождения дефекта и своевременно остановить машину на упреждающий ремонт. Данная особенность определяет преимущества рассматриваемой в данной статье методики оценки степени критичности технического состояния промышленного оборудования.

Постановка проблемы

Машина представляет собой комплекс взаимосвязанных элементов, взаимодействующих не только между собой, но и с окружающей их средой. Отказ од-

ного из элементов влечет за собой нарушение работоспособности всей машины. Наличие сложных функциональных и кинематических связей между элементами машины обуславливают большое количество структурных и регулировочных параметров, которые закладываются еще на этапе проектирования, и усложняются при изготовлении, сборке и в процессе эксплуатации. Все указанное существенно затрудняет разработку и формализацию процедуры диагностики.

Относительное перемещение большого числа взаимодействующих элементов порождает в машине динамические процессы, возбуждающие упругие колебания как машины в целом, так и отдельных ее узлов и деталей. Поэтому среди многочисленных методов технической диагностики особое место принадлежит методам виброакустической диагностики, ориентированным на использование диагностической информации о колебательных процессах, сопровождающих работу машины. При возбуждении колебаний одновременно всеми кинематическими парами машины образуется единое волновое поле, и задача диагностики заключается в разделении суммарного процесса на составляющие таким образом, чтобы можно было оценить вклад в техническое состояние каждой кинематической пары (узла машины). Для установления соответствий законов развития неисправностей и их проявлений в вибрациях машины с целью их успешной диагности-

ки, необходимо понимание физической сущности связи между рабочими процессами, протекающими в машине, и деградацией ее технического состояния. При этом предусматривается решение двуединой задачи: постановки диагноза текущего состояния машины и прогноз момента наступления критического состояния машины, требующего остановки её на ремонт.

Над решением первой части задачи работали и продолжают успешно работать множество специалистов-диагностов [1-5]. Однако вторая часть задачи не менее, а, может быть, для ответственных машин, более важная, не нашла до сих пор своего эффективного решения. Прогнозирование остаточного ресурса с учетом скорости развития дефектов позволяет в реальном масштабе времени принимать управляющие решения, предупреждающие аварии и техногенные катастрофы и оптимизировать алгоритм ремонта промышленного оборудования.

При прогнозировании ресурса машин чаще всего применяют экстраполяционные методы, заключающиеся в определении параметров аппроксимирующей функции по результатам обработки временного ряда, составленного из уровней вибрации машины, накопленных в результате периодических измерений её колебаний. Далее, график аппроксимирующей функции продлевают до пересечения его с предельно допустимым по нормам виброактивности эффективным уровнем виброскорости V_e (табл. 1) [6]. Абсцисса точки пересечения представляет собой прогнозируемый ресурс машины.

Недостаток данного метода прогнозирования связан с природой норм виброактивности, представляющих собой среднестатистические данные о вибрациях машин. Поэтому нормируемые уровни вибрации только с определенной долей вероятности относятся к образцу машины, состояние которого рассматривается в данный момент. Подобное отличие фактического ресурса от расчетного сводит на нет саму идею прогноза ресурса машин. В этой связи необходимо искать новые методы прогнозирования, лишённые данного недостатка. Подобным методом может быть метод прогнозирования, использующий в качестве аппроксимационной

функции не формальные математические функции, а аналитические зависимости, отражающие механику разрушения машин.

Разработка прогностической модели

Машины, как правило, работают в условиях знакопеременного силового воздействия и поэтому их ресурс определяется усталостью металла. Усталость зависит от уровня нагрузки и длительности ее действия. Графически зависимость допустимого уровня напряжения от числа циклов изображается в виде кривой усталости (рис. 1), которая описывается следующим уравнением [1]:

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_{-1}} = \left(\frac{N_0}{N_i} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (1)$$

где σ_{-1}, σ_i – соответственно, предел выносливости (усталости) конструкционного материала при симметричном цикле нагружения и текущая величина напряжения; N_0, N_i – соответственно, базовое (предельное) число циклов, которое может выдержать материал при напряжении, равном пределу выносливости, и число циклов, которое может выдержать материал при напряжении σ_i ; m – показатель степени, равный тангенсу угла наклона кривой α (рис. 1).

На наклонном участке кривой при изменении напряжения от σ_1 до σ_i уравнение (1) представится следующим образом:

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_1} = \left(\frac{N_1}{N_i} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (2)$$

Остаточный ресурс можно выразить через полный ресурс N_{pec} , которым обладает конструкция, и текущую наработку n_i .

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_1} = \left(\frac{N_{pec} - n_i}{N_{pec} - n_1} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (3)$$

График функции (3), приведенный на рис. 2, показывает, что он является зеркальным отражением графика равенства (2), приведенного на (рис. 1). Из графика функции следует, что по мере увеличения числа

Таблица 1. Нормы вибрации ISO/2372 (VDI/2056)

Уровень вибрации V_e , мм/с	Границы диапазонов для машин, относящихся к классу:				
	I	II	III	IV	V/ VI
0,28	A				
0,45	B	A			
0,71		B	A		
1,12	C		B	A	
1,8		C		B	A
2,8			C	B	B
4,5				C	C
7,1					C
11,2	D				
18		D			
28			D		
45				D	D

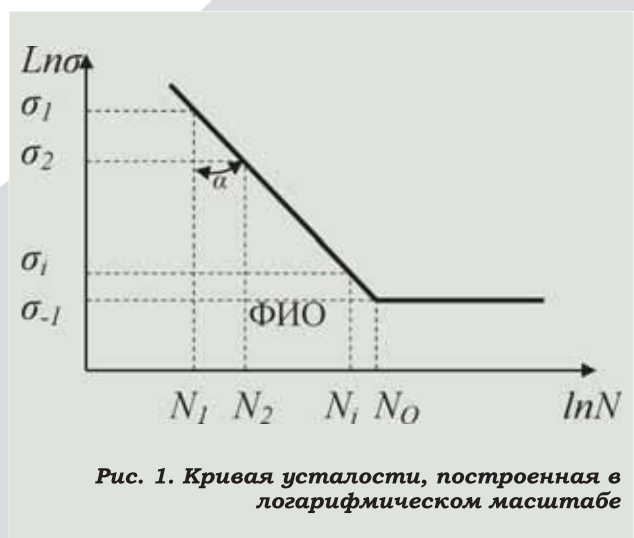


Рис. 1. Кривая усталости, построенная в логарифмическом масштабе

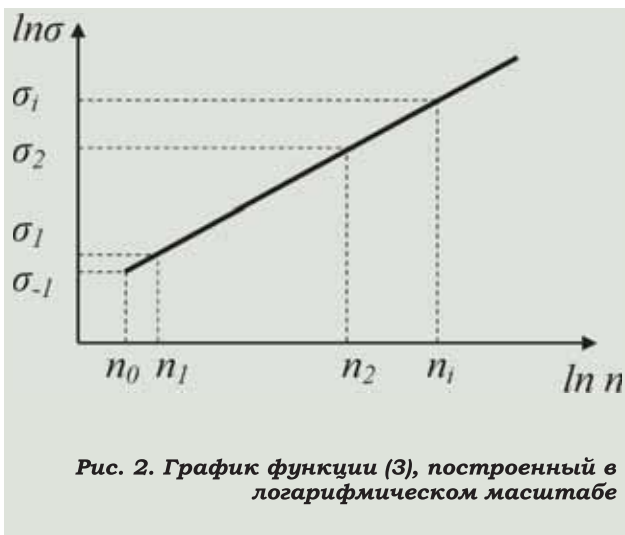


Рис. 2. График функции (3), построенный в логарифмическом масштабе

отработанных циклов n величина напряжения σ возрастает.

Для практического использования формулы (3) необходимо перейти от напряжений к амплитуде колебаний A и от циклов ко времени работы машины t . Полагаем, что между амплитудой колебаний A и напряжениями в общем случае существует некая нелинейная зависимость, описываемая следующим степенным выражением:

$$A = \gamma \cdot \sigma^\beta. \quad (4)$$

Действие нагрузки, характеризуется определенной частотой повторения $f_{\text{НАГР}}$ и коэффициентом загрузки оборудования $K_{\text{ЗАГР}}$. Введя коэффициент пересчета α , перейдем от количества циклов к астрономическому времени действия нагрузок (часы, сутки и годы), которое легко регистрируется:

$$t_i = \frac{n_i}{\alpha \cdot f_{\text{НАГР}} \cdot \kappa_{\text{ЗАГ}}}. \quad (5)$$

где α – коэффициент пересчета, равный (3600x24) при пересчете на календарные сутки и (3600x24x365) при пересчете на календарные годы.

Искомый остаточный ресурс $T_{\text{ост}}$ выражается через полный ресурс $T_{\text{рес}}$ и текущую наработку t_i :

$$T_{\text{ост}} = T_{\text{рес}} - t_i, \quad (6)$$

где $T_{\text{ост}}$ – полный календарный ресурс.

Полный календарный ресурс $T_{\text{ост}}$ можно выразить через полный ресурс в циклах $N_{\text{рес}}$:

$$T_{\text{рес}} = \frac{N_{\text{рес}}}{\alpha \cdot f_{\text{НАГР}} \cdot \kappa_{\text{ЗАГ}}}. \quad (7)$$

Подставив формулы (4-7) в (3), получим выражение, связывающее амплитуду колебаний A с наработкой машины t_i и ее ресурсом $T_{\text{ост}}$:

$$A(t) = A_1 \left(\frac{T_{\text{рес}} - t_i}{T_{\text{рес}} - t_1} \right)^\lambda, \quad (8)$$

где $\lambda = \frac{\beta}{m}$.

Искомый ресурс t_i и показатель степени λ являются параметрами, которые определяются при компьютерной обработке (аппроксимации) данных регулярного контроля уровня вибрации машины. В процессе этой обработки определяется минимум функционала:

$$U = \sum_{i=1}^k \left[\frac{A_i}{A_1} - \left(\frac{T_{\text{рес}} - t_i}{T_{\text{рес}} - t_1} \right)^\lambda \right]^2, \quad (9)$$

где k – количество данных, подвергающихся аппроксимации ($k > 2$).

При прогнозировании следует применять интервальную оценку ресурса. Минимизация функционала (9) позволяет получить верхнюю границу этого интервала. В качестве нижней границы используется наиболее вероятное значение ресурса, рассчитываемое по следующей формуле:

$$T_{\text{НГР}} = Q \cdot t_{\text{мек}} + T_{\text{рес}} \cdot P, \quad (10)$$

где $t_{\text{мек}}$ – наработка машины на момент текущего диагностирования; $P = e^{-\frac{t}{T_{\text{рес}}}}$ – надёжность машины; $Q = 1 - P$ – вероятность отказа машины на момент текущего диагностирования.

Зависимость (8) представляет собой аппроксимационную модель, полученную в результате преобразования выражения (1), описывающего усталостную кривую, это даёт основания утверждать, что она получена, исходя из физических соображений в отличие от общепризнанного подхода, когда для аппроксимации экспериментальных данных используются графики аналитических зависимостей, выбранных, исходя из формальных математических рассуждений. Она получена на основе кривой усталости и, таким образом, отражает механику разрушения, что существенно повышает достоверность выполняемого с ее помощью прогноза ресурса машины.

Оценка технического состояния машины

Ресурс машины является ключевым параметром, который используется при оценке степени критичности технического состояния. Однако для повышения достоверности оценки технического состояния машины необходимо увеличивать число параметров, описывающих диагностический признак.

Из теории информации [7] известно, что погрешность оценки состояния системы σ обратно пропорциональна корню квадратному из числа параметров n , используемых для её описания.

$$\sigma \approx \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (11)$$

Как правило, диагностический признак описывается одним параметром – своей величиной (значением). Однако ограничиваться знанием только величины диагностического признака нельзя, так как это не даёт информации о динамике (темпе) изменения признака по мере деградации состояния машины. Поэтому предлагается диагностический признак описывать комплексом, содержащим два параметра: собственно величину признака A и скорость его изменения V по мере деградации технического состояния машины.

Увеличение числа параметров, описывающих диагностический признак, до двух приводит к уменьшению погрешности оценки состояния машины на 30 %. При этом для удобства применения этого комплекса величина признака и скорость его изменения приведены к безразмерному виду и изменяются от нуля до единицы. В этих же пределах изменяется и сам комплекс, в который эти параметры входят в виде слагаемых с весовыми коэффициентами.

$$F = \alpha \bar{A} + \beta \bar{V}, \quad (12)$$

где $\bar{A} = \frac{Ve - Ve_0}{[Ve]_{CR} - Ve_0}$ – степень изменения уровня вибрации; Ve – текущий эффективный уровень виброскорости, мм/с; Ve_0 – эффективный уровень виброскорости, зафиксированный при исходном (первоначальном) диагностировании, мм/с; $[Ve]_{CR}$ – предельно допустимый по нормам [6] эффективный уровень виброскорости, мм/с; $\bar{V} = \frac{T_{PPR} - t_0}{T_{PR} - t_0}$ – безразмерная скорость изменения величины диагностического признака; T_{PPR} – наработка машины до очередного планово-предупредительного ремонта (ППР); T_{PR} – прогнозируемая наработка машины до ремонта из-за предельной степени развития того или иного дефекта; t_0 – наработка

Для оценки степени критичности состояния машины в целом используется максимальное из всех рассчитанных для контролируемых дефектов машины значение комплекса F_{MAX} (рис. 3). Используемая при этом словесная характеристика состояния машины в целом приведена в табл. 3.

В качестве примера использования предлагаемой методики оценки состояния промышленного оборудования проанализируем состояние гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС накануне его катастрофического разрушения. На рис. 4 точками нанесены уровни вибрации агрегата и даты их измерения, а в табл. 4 приведены протоколы диагностирования.

Из протоколов следует, что уже в Протоколе от 23.6.09 ,т.е. практически за два месяца до катастрофы, произошедшей 17.8.09, отмечается, что степень развития дисбаланса ротора агрегата «выше средней» и прогнозируемая наработка до ремонта уже тогда составляла 2-3 недели. Последующие протоколы свидетельствуют о необходимости срочной остановки агрегата, а прогноз ресурса уже был отрицательной величиной, что свидетельствовало о том, что момент остановки на ремонт был пропущен.

Выводы

Существующие методики диагностирования предусматривают контроль только текущей величины диа-

Таблица 2. Нормированные степени развития дефекта и эталонные значения комплекса F

Дефекта нет	Степень развития дефекта:			
	ниже средней	средняя	выше средней	недопустимая
$0 < F \leq 0,25$	$0,25 < F \leq 0,41$	$0,41 < F \leq 0,63$	$0,63 < F < 1,0$	$F \geq 1,0$

Таблица 3. Нормированные состояния машины в целом и эталонные значения комплекса F_{MAX}

Отличное	Состояние машины:			
	хорошее	удовлетворительное	требуется улучшение	требуется ремонт
$0 < F_{MAX} \leq 0,25$	$0,25 < F_{MAX} \leq 0,41$	$0,41 < F_{MAX} \leq 0,63$	$0,63 < F_{MAX} < 1,0$	$F_{MAX} \geq 1,0$

машины на момент исходного (первоначального) диагностирования; α и β – весовые коэффициенты.

Процедура распознавания степени развития дефекта сводится к сравнению фактического значения комплекса F с его граничными (эталонными) значениями (рис. 3). Эталонные значения комплекса приведены в табл. 2, там же указана их словесная характеристика. Эталонные значения представляют собой безразмерный геометрический ряд со знаменателем $q = \sqrt[3]{10}$. Подобный, но только размерный геометрический ряд предпочтительных чисел R5 [8] используется в Нормах виброактивности [6].

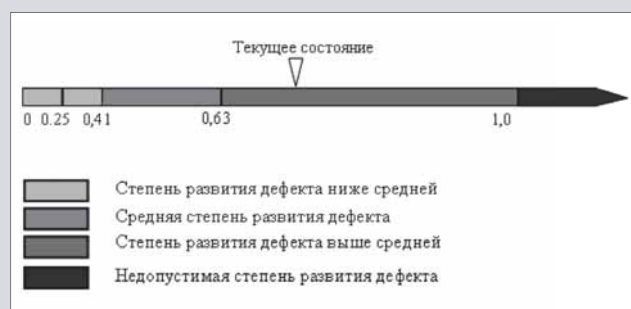


Рис. 3. Распознавание текущего состояния с помощью комплекса F



Рис. 4. Результаты контроля вибраций гидроагрегата и аппроксимация их графиком функции, отображающей механику разрушения металла

бе времени принимать управляющие решения, предупреждающие аварии и техногенные катастрофы и оптимизировать алгоритм ремонта промышленного оборудования.

Список литературы:

1. Levitin G. Redundancy optimization for series-parallel multistate systems/ G.Levitin, A. Lisnianski, H. BenHaim // IEEE Transactions on Reliability, 1998. – № 2 (47). – pp. 165-172.
2. Li C.J. Gear fatigue crack prognosis using embedded model, gear dynamic model and fracture mechanics/ C.J. Li, H.Lee // Mechanical Systems and Signal Processing, 2005.– №19. – pp. 836-846.
3. Liao H.T. Maintenance of continuously monitored degrading systems / H.T. Liao, E.A. Elsayed, L.Y. Chan // European Journal of Operational Research, 2006.– №175(2). – pp. 821-835.
4. Lin D. Using principal components in a proportional hazards model with applications in condition-based maintenance / D.Lin, D.Banjevic, A.K. Jardine // Journal

Таблица 4. Протоколы диагностирования

Дата диагностики	Вид дефекта и степень его развития	Остаточный ресурс Т, день	Диагноз машины
21.4.09	Дисбаланс ротора: степень развития дефекта: - выше среднего	-	Машине требуется осмотр. Причина: - дисбаланс ротора
23.6.09	Дисбаланс ротора: степень развития дефекта: - выше среднего	12...19	Машине требуется осмотр. Причина: - дисбаланс ротора
7.7.09	Дисбаланс ротора: степень развития дефекта: - выше среднего	8...17	Машине требуется осмотр. Причина: - дисбаланс ротора
24.7.09	Дисбаланс ротора: степень развития дефекта: - выше среднего	-25 ...-22	Машине требуется ремонт. Причина: - дисбаланс ротора
11.8.09	Дисбаланс ротора: степень развития дефекта: - недопустимая	-31...-27	Машине требуется ремонт. Причина: - дисбаланс ротора
17.8.09	Дисбаланс ротора: степень развития дефекта: - недопустимая	-54...-50	Машине требуется ремонт. Причина: - дисбаланс ротора

гностического признака, не учитывая темп (скорость) её изменения по мере деградации технического состояния машины, что нередко приводит к ошибкам. Для исключения подобных ошибок необходимо, во-первых, увеличивать число параметров контролируемых диагностических признаков и, во-вторых, отслеживать характер изменения признака во времени. Этим требованиям отвечает предложенная в статье методика оценки технического состояния промышленного оборудования посредством безразмерного комплекса. Данный комплекс является функцией двух безразмерных аргументов, входящих в него виде слагаемых с весовыми коэффициентами. Первое слагаемое учитывает степень изменения величины диагностического признака, а второе – скорость его изменения.

Оценка состояния оборудования с учетом скорости развития дефектов позволяет в реальном масшта-

of the Operational Research Society, 2006.–№ 57.– pp. 910-919.

5. Banjevic D. A control-limit policy and software for condition-based maintenance optimization / D. Banjevic, A.K. Jardine, V. Makis // INFOR, 2001.– № 39.– pp. 32-50.

6. ISO 2372 Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/c – Basis for specifying evaluation standards, 1974. – 30 p.

7. Shannon Claude E., Weaver Warren The Mathematical Theory of Communication / Claude E. Shannon, Warren Weaver// Univ of Illinois Press, 1963. – 245 p.

8. Якушев А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н. М. Федотов. – М.: Машиностроение, 1986.– 540 с.