

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Костюков В.Н. (Научно-производственный центр «Динамика»)

Мониторинг технического состояния агрегата – наблюдение за процессом изменения его работоспособности с целью предупреждения персонала о достижении предельного состояния – позволяет перевести большинство отказов из категории внезапных для персонала в категорию постепенных за счет раннего их обнаружения и своевременного предупреждения. Мониторинг в реальном времени (РВ-мониторинг) имеет ряд существенных отличий от «*on line/off line*» мониторинга, которые заключаются в строгом регламентировании интервала мониторинга на уровне 10-20% интервала самого быстрого развития неисправностей в оборудовании производственных комплексов (ПК), что возможно на базе автоматических системы диагностики и мониторинга (СДМ) с функционально неопределенной структурой, которая не зависит от конструкции оборудования для широкого класса агрегатов ПК и содержит многоуровневую экспертную систему.

Поскольку любые системы распознавания обладают ненулевой ошибкой η , то возникает задача оценки требуемой ошибки СДМ η для ПК, имеющего в сложившихся условиях эксплуатации вероятность внезапных отказов Q и наработку на отказ T_Q , при требуемых наработке не менее T_r и риске пропуска отказа не более r . Уравнение связи между T_Q , при существующей Q , требуемом r и числом отказов n имеет вид:

$$T_r = T_Q * [\ln(1 - Q)] / [\ln(1 - r)], n = T_r / T_Q .$$

$$\eta = T_Q / (T_r + T_Q), \eta = [\ln(1 - r)] / [\ln(1 - r) + \ln(1 - Q)], \text{ для } r \ll Q \ll 1, \eta = r / Q.$$

Согласно номограмме для определения допустимой ошибки СДМ (рис. 1а) для типичных значений за сутки $Q = 20 \%$; $r = 1 \%$, ошибка системы диагностики η не должна превышать 4 %. При этом по номограмме для определения коэффициента увеличения временного интервала $k_T = T_r / T_Q$ между внезапными необнаруженными отказами агрегатов при внедрении СДМ (рис. 1б) интервал между производственными неполадками и аварийными ситуациями возрастает в 24 раза, что объясняет существенный технико-экономический выигрыш от внедрения СДМ [1]. Для оценки экономической эффективности внедрения СДМ представляет практический интерес зависимость коэффициента увеличения времени между отказами k_T от ошибки η распознавания опасных состояний (рис. 1в).

$$T_r = T_Q [\ln(1 - Q)] / [\ln(1 - r)], n = T_r / T_Q, k_T = 1 / \eta - 1 .$$

Эмпирический риск r является также критерием эффективности управления ПК по минимуму вероятности пропуска отказа для сравнения различных систем и технологий управления с вектором параметров $\{Z\}$: $r = \text{Min } Q\{Z_i\}$.

Техническое состояние агрегата S_1 , зависящее от режима его работы S_0 и уровня накопленных погрешностей изготовления, ремонта и эксплуатации S , на основании работ Н.Г. Бруевича представляется в следующем виде:

$$S_1 = S_0 + S(t) = S(n_0, p_0) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial S}{\partial q_j} \Delta q_j(t) , \quad (1)$$

где $S_0 = S(n_0, p_0)$ – составляющая, которая характеризует механизм с минимальными, близкими к нулю, обобщенными технологическими и эксплуатационными погрешностями, работающего в диапазоне номинальных скоростных (n_0) и нагрузочных (p_0) режимов; $Dq_j = X_j$ - j -я погрешность механизма, заложенная при

изготовлении ($t = 0$), развивающаяся во времени и определяющая износ, или, в общем случае, степень деградации механизма и степень его старения; $\partial S/\partial q_j$ – чувствительность обобщенной погрешности S к j -й погрешности механизма по соответствующей обобщенной координате q_j .

Обобщенная математическая модель СДМ на основе уравнений переменных состояния определяется как:

$$\{\dot{S}(t)\} = [A]\{S(t)\} + [B]\{U\}, \quad \{Y(t)\} = [C]\{S(t)\} + [D]\{U\}, \quad (2)$$

где $\{S(t)\}$ – вектор функций старения агрегата размерности m , каждая составляющая которого характеризует его обобщенный (совокупный) структурный параметр, подлежащий оценке и характеризующий остаточный парциальный ресурс агрегата по этому обобщенному параметру, носит во времени многомодальный характер в силу суммирования частных погрешностей (1); $\{\dot{S}(t)\}$ – многомодальный вектор скорости старения (износа, остаточного ресурса и т.д.); $\{U\}$ – вектор переменных управления размерности $(p+k)$ включает в себя переменные задания режима работы агрегата $\{U_p(t)\}$ и факторы воздействия персонала на объект $\{U_k(t)\}$; $\{Y(t)\}$ – вектор диагностических сигналов размерности $n \approx m$, измеряемых СДМ.

Матрицы $[A]$, $[B]$, $[C]$, $[D]$ представляют собой соответственно:

- квадратную матрицу системы $[A] = [a_{ij}]$;
- прямоугольную матрицу управления $[B] = [b_{ij}]$, которая определяет влияние действий персонала на состояние агрегата;
- матрицу наблюдения (матрица выхода) $[C] = [c_{ij}]$, которая определяет наблюдаемость внутреннего состояния;
- переходную матрицу $[D] = [d_{ij}]$, которая определяет влияние на параметры вибрации агрегата действий персонала по управлению режимом работы и обслуживанию.

Система мониторинга (2) вполне управляема как производственный комплекс и наблюдаема при совпадении рангов матриц $[A]$ и $[C]$ и отсутствии в последней нулевых столбцов. Размерность вектора $\{S(t)\}$ (матрицы $[A]$), которая определяет степень реальной наблюдаемости состояния агрегата, рекомендуется выбирать исходя из причин и статистики отказов агрегатов каждого типа. Составляющие $\{S(t)\}$, как правило, недоступны для непосредственного наблюдения и оцениваются по косвенным измерениям. Вектор управления $\{U\}$ изменяется спорадически при пуске-останове агрегата и техобслуживании. Между этими моментами $\{U\} = \text{const}$. Полная косвенная наблюдаемость состояния агрегатов ПК при мониторинге достигается измерением диагностических сигналов и скоростей их изменения во времени в силу их независимости:

$$\{\Delta Y\} = [C]\{\Delta S\}, \quad \{\dot{Y}(t)\} = [C]\{\dot{S}(t)\}, \quad \{Y_{i \text{ ДП}}\} = [C]\{S_{i \text{ ДП}}\}, \quad \{\dot{Y}_{i \text{ ДП}}\} = [C]\{\dot{S}_{i \text{ ДП}}\}, \quad (3)$$

где предельное состояние агрегата $\{S_{\text{ДП}}\}$ и опасная скорость его деградации $\{\dot{S}_{\text{ДП}}\}$ с точностью до масштаба совпадают с критическими значениями диагностических признаков (ДП) и скоростей их изменения; приращение диагностических сигналов (вибропараметров) пропорционально приращению износа, утрате безопасности и уменьшению остаточного ресурса агрегата и ПК в целом

Каждая i -я обобщенная погрешность выражает парциальную функцию старения агрегата. Ее изменения во времени (тренд) представляют собой сумму трендов входящих структурных параметров $X_j(t)$ и, в общем, носят многомодальный характер. Приращение вектора вибропараметров $\{\Delta Y_n\}$ прямо пропорционально приращению вектора старения объекта (обобщенных погрешностей – структурных па-

раметров) $\{\Delta S_m\}$ и приращению исходных диагностируемых погрешностей механизмов агрегата $\{\Delta X_k\}$.

Основной задачей синтеза СДМ является синтез ортогональных ДП $\{Y_i\}$, отражающих соответствующим образом сформулированные ортогональные классы неисправностей $\{S_i\}$. Это соответствует приведению матрицы наблюдения $[C]$ к диагональной квадратной матрице, устанавливающей взаимнооднозначное (регрессионное) отношение между ДП и соответствующей обобщенной погрешностью, и проблема мониторинга состояния заключается в формировании правильной интерпретации этой обобщенной погрешности с учетом частоты появления классов неисправностей. Наличие интерпретации «причина-следствие» (погрешность-вибрация) эквивалентно приведению матрицы наблюдения к диагональной квадратной форме и соответствует мониторингу состояния. Отсутствие такой интерпретации соответствует мониторингу параметра (вибрации, температуры и т.д.). Часто неисправности агрегатов (разрушения поверхностей трения, ослабление крепления и т.д.) неизмеримы в сильных шкалах (отношения, интервалов). В этих случаях значения измеряемых ДП (вибропараметров) служат мерой таких неисправностей согласно (3).

Целесообразно определять: техническое состояние агрегата в соответствии с парциальной составляющей его вектора состояния $\{S(t)\}$, которая имеет максимальное значение $S_{max}(t)$ среди всех диагностируемых параметров данного агрегата; опасность технического состояния агрегата – в соответствии с парциальной составляющей $\dot{S}_{max}(t)$, которая является максимальной среди всех скоростей износа диагностируемого агрегата; техническое состояние комплекса агрегатов ПК – в соответствии с парциальной составляющей его вектора состояния, которая имеет максимальное значение $S_{max}(t)$ среди всех ДП всех агрегатов ПК; опасность состояния ПК – в соответствии с парциальной составляющей $\dot{S}_{max}(t)$, которая является максимальной среди всех скоростей износа всех агрегатов ПК.

Аналогичные формулировки справедливы и в пространстве ДП согласно обобщенной математической модели (2), (3). Техническое состояние агрегата и ПК в целом определяется максимальной парциальной составляющей вектора ДП $Y_{max}(t)$, наблюдаемой СДМ среди узлов агрегата и ПК в целом соответственно.

Опасность состояния агрегата и ПК в целом определяется максимальной парциальной составляющей скорости роста тренда вибропараметра $\dot{Y}_{max}(t)$, наблюдаемой СДМ среди всех скоростей по узлам агрегатов. Необходимое быстрое действие СДМ определяется максимальной скоростью утраты работоспособности и минимальным запасом предельного состояния диагностируемого агрегата:

$$F = \frac{1}{T} = \text{Max} \left(B \frac{\mathfrak{S}_I \ddot{A}_I}{S_I \ddot{A}_I} \right) = \text{Max} \left(B \frac{\mathfrak{Y}_I \ddot{A}_I}{Y_I \ddot{A}_I} \right). \quad (4)$$

Параметр B в (4) характеризует качество алгоритма оценки скорости роста измеряемых ДП. Предложенные модели и определения лежат в основе способов диагностики и СДМ с функционально неопределенной структурой, новизна которых подтверждена патентами на изобретения.

Разработана динамическая модель состояния и вибрации агрегата на интервале жизни с учетом человеческого фактора, которая устанавливает экспоненциальную форму связи между ДП, структурными параметрами и остаточным ресурсом:

$$\{\mathfrak{Y}\} = [a] e^{[a]T} \{Y_0\}; \{\mathfrak{S}\} = [C]^{-1} [a] e^{[a]T} \{Y_0\}. \quad (5)$$

Уравнения (5), полностью определяют динамику состояния агрегатов ПК через динамику ДП вибрации, температуры и др. и скоростей их изменения. Предложенные модели позволяют учесть различные факторы, влияющие на вибронегруженность агрегата, его работоспособность и остаточный ресурс. Человеческий фактор проявляется в нарушениях режима работы агрегата (гидроудар, кавитация и т.д.) и правил его эксплуатации (использование грязного масла, отсутствие охлаждающей жидкости и т.д.), что вызывает быстрые тренды и резкие скачки вибрации, температуры, тока и сопровождается быстрой утратой работоспособности агрегатом.

Таким образом, скорости изменений трендов вибропараметров дополняют пространство ортогональных ДП, что позволяет увеличить достоверность постановки диагноза и снизить ошибку диагностики q_0 :

$$q_0 = \prod_{i=1}^n q_i = q^n, \quad \text{при } q_1 = q_2 = \dots = q_n = q, \quad (6)$$

где q_i – ошибка диагностики по i -му ДП; n – число независимых ДП.

Практическая реализация изложенных теоретических подходов в системах комплексного мониторинга КОМПАКС® [1, 2], использующих различные методы диагностирования – виброакустические, акустико-эмиссионные, тепловые, электрические и др., обеспечило их широкую инсталляцию – более 400 за последние 15 лет часто почти под открытым небом, на предприятиях крупнейших компаний: ОАО «ГАЗПРОМ», ОАО «ЛУКОЙЛ», ОАО «РОСНЕФТЬ», ОАО «РЖД» и др., а также за рубежом, на отечественном и импортном оборудовании более 1000 типов, в различных географических и климатических зонах.

Выводы.

1. Предложено в качестве переменных состояния агрегата использовать парциальные функции старения и их скорости, определяемые обобщенными погрешностями, структурными параметрами и скоростями их роста.

2. Предложено оценивать *техническое состояние* ПК и *опасность* потери им работоспособности, соответственно, по минимальной остаточной работоспособности и максимальной скорости ее потери.

3. Предложено оценивать необходимое быстроедействие СДМ по критерию *наблюдаемости* максимальной скорости потери остаточной работоспособности производственным комплексом.

4. Получены аналитические оценки и построены номограммы для определения максимальной допускаемой ошибки диагностики технического состояния агрегатов ПК при существующем потоке отказов и требуемом риске пропуска отказа.

5. Сформулирован критерий эффективности управления состоянием агрегатов ПК по минимуму вероятности пропуска отказа, аварии или производственной неполадки.

6. Получены аналитические оценки увеличения ресурса безопасного пробега ПК в зависимости от уменьшения максимальной ошибки СДМ.

7. РВ-мониторинг позволяет перевести отказы оборудования и производственных комплексов из категории внезапных в категорию постепенных.

8. Необходимость снижения отказов в десятки раз и соответствующего увеличения межаварийных пробегов оборудования требует снижения ошибок мониторинга до единиц % и менее (*нуль-мониторинг*).

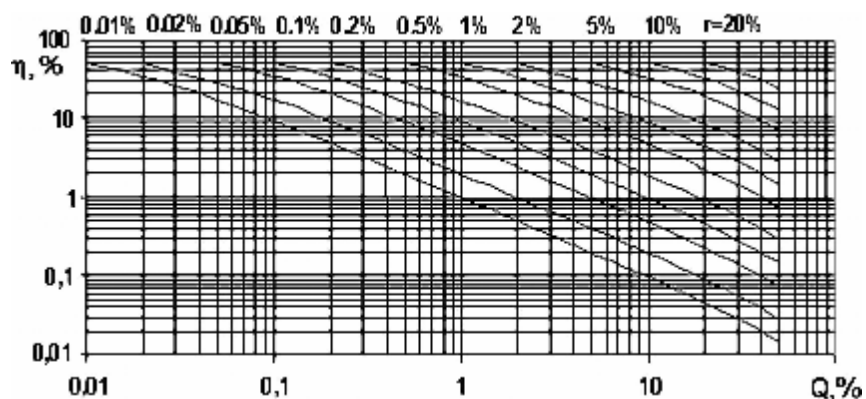
9. Снижение статической ошибки и сокращение сроков внедрения систем РВ-мониторинга до нескольких месяцев требует разработки безэталонных методов диагностики и стандартных процедур формирования ДП, инвариантных к типу оборудования.

10. Снижение динамической ошибки мониторинга требует существенного превышения темпов мониторинга (не только измерений, но и постановки диагноза и его исполнения) над темпами развития неисправностей в производственных комплексах.

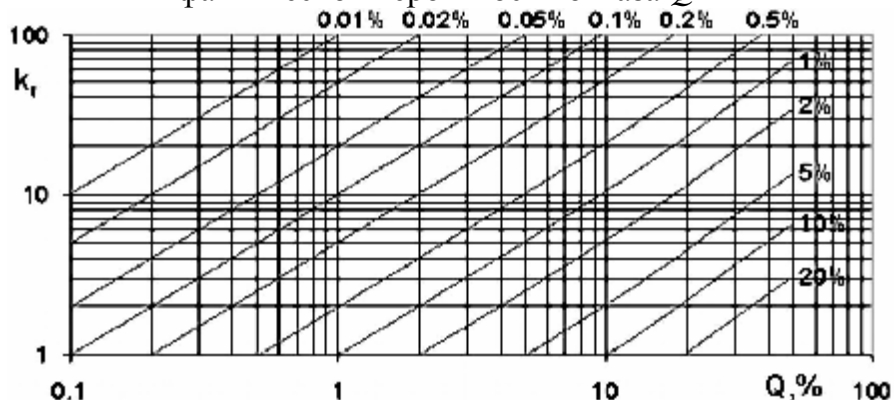
Литература:

1. Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. – М.: Машиностроение, 2002. 224 с.

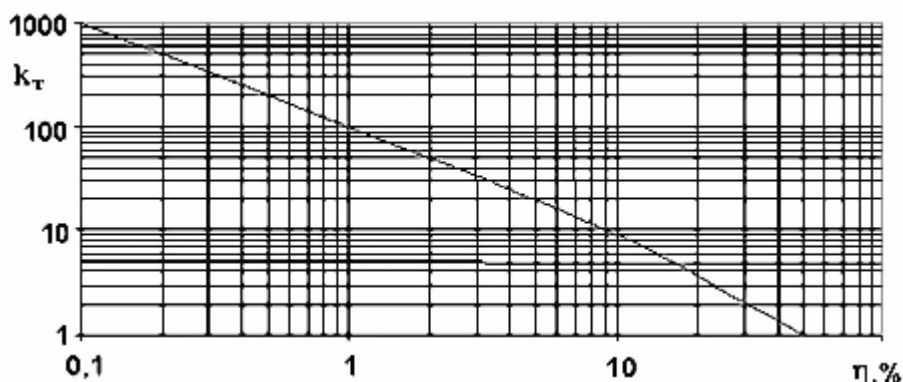
2. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР – КОМПАКС). М.: Машиностроение, 1999. 163 с.



а) допустимая ошибка η при требуемом риске r пропуска отказа и фактической вероятности отказа Q



б) коэффициент увеличения наработки между внезапными отказами k_T при внедрении мониторинга и обеспечении требуемого риска отказа r



в) коэффициент увеличения наработки между отказами k_T в зависимости от ошибки диагностирования η

Рис. 1. Параметры системы мониторинга