

УДК 519.65+534.1+004.3+004.42+004.9

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕТИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ И АВТОМАТИКИ ЗАЩИТЫ

П. Ю. БРАНЦЕВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Беларусь

UDC 519.65+534.1+004.3+004.42+004.9

DECISION NETWORK FOR SYSTEMS VIBRATION DIAGNOSIS AND PROTECTION AUTOMATION

P. J. BRANCEVICH

Аннотация. По мере получения и накопления больших объемов данных все более актуальной становится потребность в автоматизации их обработки и принятия решений для самых разнообразных задач. В промышленности и энергетике одной из них является техническая диагностика. В настоящее время в промышленной эксплуатации на предприятиях энергетики находятся десятки измерительно-вычислительных компьютерных комплексов серии «Лукомль-2001» непрерывного вибрационного контроля и мониторинга сложных агрегатов роторного типа, которые формируют временные тренды для 14 вибрационных параметров с временным шагом 1...8 с по каждой точке контроля на эксплуатируемом объекте. Предлагается функционал типового модуля принятия решений, входными данными которого являются параметры и характеристики вибраций наблюдаемого объекта. Типовые модули конфигурируются в сеть принятия решения в соответствии с постановкой решаемой задачи вибродиагностики или автоматизации защиты.

Ключевые слова: параметр, характеристика, решение, вибрация, сигнал, сеть.

Abstract. As large amounts of data are received and accumulated, the need to automate their processing and decision-making for a wide variety of tasks becomes more and more urgent. In industry and energy, one of them is technical diagnostics. Currently, dozens of measuring and computing computer systems of the «Lukoml-2001» series for continuous vibration control and monitoring of complex rotary-type units are in commercial operation at energy enterprises, which form time trends for 14 vibration parameters with a time step of 1...8 s for each point control at the operating facility. The functionality of a typical decision-making module is proposed, the input data of which are the parameters and characteristics of the vibrations of the observed object. Standard modules are configured into a decision making network in accordance with the statement of the problem being solved of vibration diagnostics or automatic protection.

Keywords: parameter, characteristic, solution, vibration, signal, network.

Введение. В производственных процессах значительную часть от эксплуатационных затрат составляют расходы, направляемые на обеспечение работоспособности основного оборудования. Считается, что наиболее изнашиваемым является оборудование с вращательным движением (турбины, генераторы, двигатели, редукторы, насосы, компрессоры, вентиляторы). Снизить затраты на его эксплуатацию можно путем внедрения современных систем технического обслуживания, которые базируются на использовании технологий мониторинга, оценки состояния, диагностики, прогнозирования

развития дефектов, которые с точки зрения их организации и функционирования являются интеллектуальными системами [1].

Состояние производственного оборудования может характеризоваться многими параметрами основных и вторичных процессов, развивающихся при его работе. Для контроля целесообразно выбирать те, которые достаточно хорошо отражают функциональное состояние объектов и не требуют слишком больших затрат на их измерение. В этом плане, для механизмов с вращательным движением, такими являются параметры вибрации [1, 2]. На основе анализа вибрационного состояния группы однотипных механизмов при их функционировании на различных режимах, в различном техническом состоянии и на протяжении длительного времени могут быть обоснованы и сформулированы диагностические признаки для локализации мест и причин повышения вибрации. Это создает условия для построения автоматизированных интеллектуальных систем оценки технического состояния и диагностики, значительно облегчающих работу инженерно-технического персонала [3].

Медицинская диагностика, как набор правил, методов и решений, которые позволяют прийти к заключению о наличии или вероятности наличия у человека того или иного заболевания, имеет много общего с технической диагностикой [4]. Открытие новых и совершенствование уже существующих методов оценки состояния человека является важным направлением медицинских исследований. В связи с этим формализация систем принятия решений, на основе получаемых данных, является весьма актуальной, причем все более доступной для создания, по крайней мере для многих частных случаев, за счет растущей вычислительной и информационной мощности применяемых технических средств.

Модель базового элемента системы принятия решений (БЭ СПР). Состояние наблюдаемого технического или природного объекта описывается параметрами и характеристиками.

Параметр – свойство (показатель) объекта или системы, которое можно измерить. Результатом измерения параметра системы является число или величина, а саму систему можно рассматривать как множество параметров, которое требуется измерить для моделирования или оценки ее поведения. Иногда параметрами называют также величины, очень медленно изменяющиеся по сравнению с другими величинами (переменными). Примерами параметров вибрации являются среднее квадратическое значение (СКЗ) виброускорения (виброскорости), размах колебаний, амплитуда колебаний на определенной частоте, вычисляемые в процессе обработки вибрационного сигнала, формируемого первичными преобразователями (датчиками), преобразующими механические колебания в электрический сигнал, установленными на подшипниковой опоре или корпусе механизма.

Характеристика – это совокупность отличительных свойств кого-либо или чего-либо. Характеристика в технике есть графическое или табличное выраже-

ние зависимости одного параметра от другого, а также функция, выражающая или описывающая эту зависимость. Например, характеристикой объекта является амплитудный спектр вибрационного сигнала, возбуждаемого на корпусе подшипниковой опоры, или отрезок временной реализации вибрационного сигнала.

Чтобы выполнять оценку состояния наблюдаемого объекта, требуется некая система принятия решений или поддержки принятия решений. Предлагается следующая модель базового решающего элемента системы принятия решений по оценке состояния наблюдаемого объекта или выработке рекомендаций по воздействию на данный объект.

Входными данными базового элемента являются:

x_i – значение параметра i , $i = 1 \dots N$;

$\omega_j(y_{j,1}, \dots, y_{j,k})$ – характеристика j при дискретных значениях аргумента y_j , $j = 1 \dots M$;

$\omega_j(y_j(t))$ – характеристика j при непрерывном значении аргумента y_j , $j = 1 \dots M$.

По отношению к входным исходным параметрам и характеристикам применяются функции первичной обработки: $f_l(x_i)$, где $l = 1 \dots B$; $\phi_m(\omega_j)$, где $m = 1 \dots C$.

Причем разные функции f_l могут применяться по отношению к одному и тому же параметру x_i , а различные функции ϕ_m – к одному и тому же значению характеристики ω_j . Могут быть и комплексные многопараметрические-многохарактеристические функции: $\Psi_n(x_i, \dots, x_j, \dots, x_k, \omega_l, \dots, \omega_m, \dots, \omega_p)$, где $n = 1 \dots D$; $i, j, k \in 1 \dots N$; $l, m, p \in 1 \dots M$.

По отношению к набору функций: $f_l(x_i)$, $\phi_m(\omega_j)$, $\Psi_n(x_i, \dots, x_j, \dots, x_k, \omega_l, \dots, \omega_m, \dots, \omega_p)$ применяются обобщающие функции:

$$y_k = \Psi_k \left[\begin{array}{l} f_l(x_i), l = 1 \dots B; \phi_m(\omega_j), m = 1 \dots C; \\ \Psi_n(x_i, \dots, x_j, \dots, x_k, \omega_l, \dots, \omega_m, \dots, \omega_p), n = 1 \dots D; \end{array} \right]; k = 1 \dots L.$$

И уже по отношению к y_k применяются разнообразные решающие функции: $S_\eta(y_k)$, $\eta = 1 \dots P$.

Результат функции $S_\eta(y_k)$ определяет одно из возможных состояний анализируемого объекта, тип самого объекта, принимаемое решение. На рис. 1 данная модель представлена в графическом виде.

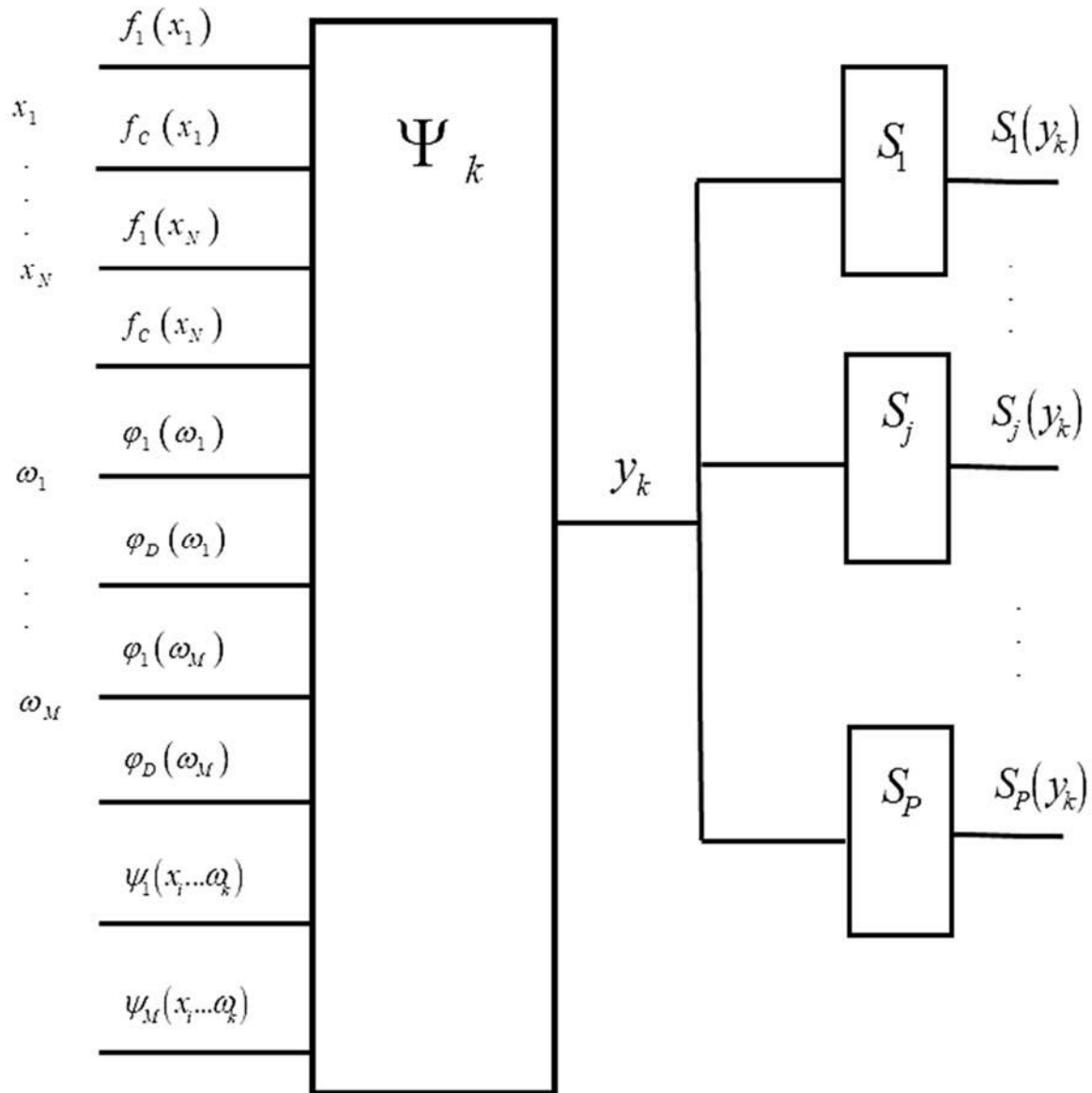


Рис. 1. Модель базового элемента принятия решений по оценке состояния наблюдаемого объекта

В простейшем случае параметры предлагаемой модели принятия решений будут иметь следующий вид:

$$f_l(x_i) = a_l x_i; \quad \varphi_m(\omega_j) = b_m \omega_j,$$

где $l = 1 \dots B$; $m = 1 \dots C$; a_l, b_m – действительные числа;

$$\Psi_n(x_i, \dots, x_j, \dots, x_k, \omega_l, \dots, \omega_m, \dots, \omega_p) = c_n \left(\sum_{i=1}^N r_i x_i + \sum_{j=1}^N s_j \omega_j \right),$$

где $n = 1 \dots D$; $i, j, k \in 1 \dots N$; $l, m, p \in 1 \dots M$; r_i, s_j – действительные числа.

$$y_k = \sum_{l=1}^B u_{l,k} f_l(x_i) + \sum_{m=1}^C v_{m,k} \Phi_m(\omega_j) + \\ + \sum_{n=1}^D w_{n,k} \Psi_n(x_i, \dots, x_j, \dots, x_k, \omega_l, \dots, \omega_m, \dots, \omega_p),$$

где $k = 1 \dots L$; $u_{l,k}, v_{m,k}, w_{n,k}$ – действительные числа.

$$S_\eta(y_k) = \rho_\eta y_k,$$

где $\eta = 1 \dots P$; ρ_η – действительные числа.

Применение БЭ СПР в автоматике защитного отключения турбоагрегата по параметрам вибрации. Наиболее важной задачей современных систем вибрационного контроля и диагностики является предотвращение аварийного повреждения защищаемого объекта при внезапном возникновении неисправностей или механических повреждений в его узлах или при существенном отклонении каких-либо технологических параметров от номинальных. Однако факт возникновения ситуации, требующей остановки технического объекта, во многих случаях имеет неоднозначное «отображение» в параметры вибрации. Стандартизованные критерии защиты [5] отражают наиболее общие взаимосвязи, полученные на основе длительного опыта эксплуатации и исследования механизмов с вращательным движением, и далеко не всегда в полной мере могут удовлетворить эксплуатирующий и управляющий персонал.

Системы вибрационного контроля и защиты, построенные на базе компьютерной техники, позволяют реализовать разнообразные и сложные алгоритмы защиты, ориентированные на конкретные типы дефектов и аварийных ситуаций. Это, в свою очередь, позволяет избежать необоснованных («ложная тревога») срабатываний защитного отключения и не допустить «пропуска дефекта» [6, 7]. Реализован и прошел апробацию на ряде турбоагрегатов алгоритм защитного отключения по вибрации, в котором учитывается несколько факторов.

1. Фактор низкочастотной составляющей вибрации.

Под низкочастотной вибрацией (НЧВ) понимается среднее квадратическое значение виброскорости (СКЗ) в зоне частоты, равной половине оборотной. Сигнал защитного отключения вырабатывается в том случае, если для любой подшипниковой опоры турбоагрегата возникла следующая ситуация: СКЗ виброскорости НЧВ, измеренное для вертикального направления и для поперечно-горизонтального направления любой подшипниковой опоры, на протя-

жении 4...6 с превышает v , мм/с, и при этом хотя бы для одного из этих направлений оно на протяжении этого же времени превышает $3v$, мм/с. Уровень v определяется типом и рабочими частотами механизма.

2. Фактор оборотной составляющей вибрации.

Под оборотной составляющей вибрации понимается СКЗ виброскорости спектральной составляющей с частотой, равной частоте вращения вала (ротора) агрегата.

2.1. Величина СКЗ оборотной составляющей.

Для каждой подшипниковой опоры и каждого из направлений измерения вибрации устанавливается значение СКЗ виброскорости оборотной составляющей, соответствующее аварийному уровню, который выбирается с учетом конструктивных, функциональных и эксплуатационных особенностей контролируемого механизма. Сигнал защитного отключения вырабатывается в том случае, если в четырех или более точках контроля СКЗ виброскорости оборотной составляющей превысило заданный, для соответствующей точки, аварийный уровень.

2.2. Вектор приращения оборотной составляющей.

Для каждой подшипниковой опоры и каждого из направлений измерения вибрации устанавливается значение вектора приращения оборотной составляющей, соответствующее аварийному уровню. Сигнал защитного отключения вырабатывается в том случае, если в четырех или более точках измерений вектор приращения оборотной составляющей превысил заданный, для соответствующей точки измерений, аварийный уровень.

3. Фактор высокочастотной составляющей вибрации.

Под высокочастотной составляющей вибрации (ВЧВ) понимается СКЗ виброскорости в частотной полосе, нижняя граница которой равна двойной оборотной частоте, а верхняя – верхней границе частотного диапазона, в котором производится вибрационный контроль наблюдаемого механизма. Сигнал защитного отключения вырабатывается в том случае, если для любых двух направлений измерения вибрации для любой подшипниковой опоры высокочастотная вибрация превысила значение аварийного уровня, установленного для данного объекта, в течение 3...6 с.

Сигнал на защитное отключение контролируемого механизма вырабатывается в том случае, если он выработан по одному из указанных критериев или по нескольким критериям одновременно.

Для реализации данной системы принятия решения о защитном отключении в качестве входных данных применяется характеристика:

$TI_j(x_0, \dots, x_{N-1})$, $j = 1 \dots M$ – временная реализация вибрационного сигнала;

M – число точек контроля для наблюдаемого турбоагрегата. Для каждой подшипниковой опоры контроль вибрации осуществляется в трёх точ-

ках-направлениях: вертикальном, поперечно-горизонтальном, осевом;

τ – дискретное время, определяющее периодичность получения исходных вибрационных сигналов.

Функция $\varphi_{1,j,\Delta} [TI_j(x_0, \dots, x_{N-1}), \tau_\Delta]$, $j = 1 \dots M$; $\Delta = 1, 2, \dots$ предназначена для вычисления СКЗ оборотной составляющей вибрации $A_{CCV,j}$.

Функция $\varphi_{2,j,\Delta} [TI_j(x_0, \dots, x_{N-1}), \tau_\Delta]$, $j = 1 \dots M$; $\Delta = 1, 2, \dots$ предназначена для вычисления фазы оборотной составляющей вибрации $\Phi_{CCV,j}$.

Функция $\varphi_{3,j,\Delta} [TI_j(x_0, \dots, x_{N-1}), \tau_\Delta]$, $j = 1 \dots M$; $\Delta = 1, 2, \dots$ предназначена для вычисления СКЗ НЧВ.

Функция $\varphi_{4,j,\Delta} [TI_j(x_0, \dots, x_{N-1}), \tau_\Delta]$, $j = 1 \dots M$; $\Delta = 1, 2, \dots$ предназначена для вычисления СКЗ ВЧВ.

Функция $f_{1,j,\Delta} (A_{CCV,j}, \Phi_{CCV,j}, \tau_{\Delta-1}, \tau_\Delta)$, $j = 1 \dots M$; $\Delta = 1, 2, \dots$ предназначена для вычисления вектора приращения оборотной составляющей.

Обобщающие функции первого уровня имеют вид:

$$y_{1,\Delta} = \Psi_{1,1,\Delta} [\varphi_{3,j,\Delta} (); \tau_\Delta; j = 1 \dots M; \Delta = 1, 2, \dots];$$

$$y_{2,\Delta} = \Psi_{1,2,\Delta} [\varphi_{2,j,\Delta} (); \tau_\Delta; j = 1 \dots M; \Delta = 1, 2, \dots];$$

$$y_{3,\Delta} = \Psi_{1,3,\Delta} [f_{1,j,\Delta} (); \tau_\Delta; j = 1 \dots M; \Delta = 1, 2, \dots];$$

$$y_{4,\Delta} = \Psi_{1,4,\Delta} [\varphi_{4,j,\Delta} (); \tau_\Delta; j = 1 \dots M; \Delta = 1, 2, \dots].$$

Результатом каждой из обобщающих функций первого уровня $\Psi_{1,k,\Delta} ()$, $k = 1 \dots 4$ является $y_{k,\Delta}$, которое принимает два значения: ноль или единица. $y_{k,\Delta}$ являются входными параметрами $x_{k,\Delta}$ для обобщающей функции второго уровня:

$$z_\Delta = \Psi_{2,\Delta} (x_{1,\Delta} = y_{1,\Delta}, x_{2,\Delta} = y_{2,\Delta}, x_{3,\Delta} = y_{3,\Delta}, x_{4,\Delta} = y_{4,\Delta}).$$

Результат обобщающей функции второго уровня z_Δ . Значение $z_\Delta = 1$ соответствует решению о срабатывании защитного отключения. Значение $z_\Delta = 0$ соответствует нормальному режиму эксплуатации контролируемого объекта.

По сравнению с нейронной сетью преимущество данного подхода заключается в возможности наблюдения в течение некоторого времени, определяемого требованиями технологических процессов и потребителями, за изменением параметров исследуемого объекта и только после этого принимается соответствующее решение.

Заключение. Предложенная модель базового элемента системы принятия решений позволяет конфигурировать различные структуры, предназначенные для оценки состояния сложных технических и природных объектов. Представлен пример реализации системы принятия решений по оценке состояния многоопорного энергетического агрегата, как комбинации базовых решающих модулей, которая введена в промышленную эксплуатацию [8, 9]. Рассмотренный подход может быть использован при моделировании разнообразных систем, принимающих решения, в том числе и органических объектов, управляющим устройством которых является многоуровневая, многослойная, объемная нейронная сеть, типовой элемент которой имеет вид предложенного базового элемента принятия решений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справочник. Кн. 2: Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2005. – 485 с.
2. **Bently, D. E.** Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics / D. E. Bently, C. N. Hatch, V. Grissom. – Canada: Bently pressurized bearing co., 2002. – 726 p.
3. **Ширман, А. Р.** Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – Москва: Наука, 1996. – 276 с.
4. **Барков, А. В.** Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – Санкт-Петербург: СПбГМТУ, 2000. – 169 с.
5. **ГОСТ ИСО 10816-1-97.** Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 1: Общие требования.
6. **Brancevich, P.** Organization of the vibration-based monitoring and diagnostics system for complex mechanical system / P. Brancevich, X. Miao, Y. Li // 20-th International Congress on Sound and Vibration. Bangkok, 7–11 July 2013. – USA: Curran Associates, Inc., 2013. – P. 612–619.
7. **Бранцевич, П. Ю.** Организация и алгоритмы системы вибрационного контроля и оценки технического состояния турбоагрегатов по вибрационным параметрам / П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, Г. Г. Соболев // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций: сб. докл. – Москва: ВТИ, 2003. – С. 25–29.
8. **Бранцевич, П. Ю.** Большие данные в системах вибрационного контроля, мониторинга, диагностики / П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 3. – С. 28–41.
9. **Brancevich, P.** Detection of vibration disturbances during the analysis of long realisations of vibration signals / P. Brancevich, Y. Li // 25-th International Congress on Sound and Vibration. Hiroshima, 8–12 July 2018. – USA: Curran Associates, Inc., 2018. – P. 2736–2743.