

## АГРЕГИРОВАННЫЙ ПОДХОД К АНАЛИТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Разработана методология аналитической идентификации технического состояния (ТС) промышленных объектов, предполагающая решение задач по построения оптимальных по критерию минимума среднего риска моделей четырех уровней: агрегированные, аппроксимирующие корреляционные функции зависимости, математические модели для ТС и интенсивности его изменения, а также прогнозные модели. Материал изложен на основе разработанных моделей ТС трубопроводов и теплоэнергетического оборудования.

Трубопроводы (ТП) и теплоэнергетическое оборудование (ТЭО) относятся к категории промышленных объектов (ПО), отказы в которых сопряжены со значительным материальным и экологическим ущербом. Увеличивающаяся продолжительность эксплуатации ПО, износ оборудования выдвигают вопросы идентификации технического состояния (ТС) в ранг наиболее важных научных проблем. В известных работах в области анализа и прогнозирования ТС ПО выделены типичные механизмы отказов, составлены физико-механические и математические модели процессов на основе локальных параметров [1, 2]. В то же время методы локального диагностирования не отражают реальной интенсивности изменения ТС контролируемой системы в целом. Современные методы разрушающего и неразрушающего контроля, в том числе внутритрубные дефектоскопы-снаряды, позволяют получать обширную диагностическую информацию о дефектности ПО. Однако, объективный анализ результатов дефектоскопии затруднен из-за большой размерности задачи и невозможности использования существующих методов обработки с необходимостью ранжирования данных и потери связи при этом с диагностируемым объектом. Накопленный объем информации, на наш взгляд, достиг насыщения и определил круг задач, неразрешимых традиционными способами. Принципиальный выход из создавшегося положения заключается в разработке новых методов аналитической идентификации ТС ПО на основе агрегированного подхода [3, 4].

Ввиду сложности и масштабности проблемы рационально декомпозировать ее на задачи 4-х уровней, предполагающие нахождение: 1) агрегированных моделей ТС по результатам диагностирования ПО; 2) аппроксимирующих корреляционных зависимостей для непараметрического решения интегрального уравнения; 3) математических моделей ТС и интенсивности его изменения в символьном и численном видах; 4) моделей прогнозирования ТС.

Получение агрегированных моделей **нижнего** иерархического уровня предполагает в общем случае формирование двух баз данных, одна из которых БД( $t_1$ ) создается по результатам предыдущего диагностирования, а вторая БД( $t_2$ ) – текущего диагностирования, выполненного через значительный интервал времени. Снижение размерности задачи и учет особенностей проблемы идентификации ТС ПО достигается агрегированием диагностической информации: 1) создаются агрегаты, как совокупности определенного количества однородных элементов в каждом статистическом массиве; 2) вычисляются в каждом агрегате предложенные параметры агрегирования: степени равномерности, рассеивания и экстремальности (таблица 1) характеризующие распределение данных внутри агрегатов; 3) находятся методом экспертных оценок коэффициенты весомости для каждого параметра агрегирования с соблюдением условия нормирования; 4) вычисляются для каждого агрегата агрегированные модели ТС: аддитивная, мультипликативная и комбинированная и их средние значения для всей совокупности агрегатов; 5) находится генеральное среднее средних значений агрегированных моделей; 6) вычисляются значения критериев минимума среднего риска, как модулей разности между генеральным средним и средними значениями агрегированных моделей и 7) по критерию минимума среднего риска выбирается оптимальная агрегированная модель. Модель, найденная по результатам предыдущего диагностирования, прикладывается к входу, а текущего диагностирования – к выходу общей модели ТС ПО.

На основе исследований коррозионной поверхности трубопроводов [3, 4] нами предложено к рассмотрению новое свойство – рельефность, обладающее большей системностью и информативностью. Под рельефностью поверхности понимаем совокупность поверхностных аномалий с относительно малыми шагами, создающими неравномерность и рассматриваемы-

ми в пределах базовой длины, выбирающейся в зависимости от характера поверхности. Ее можно характеризовать той же системой параметров, что и известный в машиностроении показатель шероховатость, но с увеличением диапазона изменения в  $10^2$  раз. Таким образом, если в пространстве распределить параметры по определенной шкале измерений, то параметры рельефности непосредственно следуют за параметрами шероховатости. Впоследствии это свойство обобщено до рельефности технического состояния, при которой учитываются не только поверхностные, но и внутренние дефекты.

Процесс нахождения агрегированных моделей ТС ПО рассмотрим на примере энергетического котла как наиболее ответственного теплоэнергетического оборудования. Он предполагает 5-ти операционное агрегирование: покомпонентное, поэлементное, поагрегатное, погрупповое и общее (рисунок 1).

Покомпонентное агрегирование предусматривает нахождение степени повреждения металла по трем компонентам: надежностной  $S_{нкi}$  в соответствии с эффективной наработкой, температурной  $S_{ткi}$  в зависимости от напряжения и температуры и механической компоненты  $S_{мкi}$  также в зависимости от эффективной температуры для каждого элемента с учетом 11-ти выбранных существенных физико-механических свойств, а также марки стали, давления и других факторов, выбранных из базы данных. Методом экспертных оценок с учетом мнений специалистов энергетической отрасли и условия нормирования выбраны весовые коэффициенты: в надежностной компоненте для вероятности отказов (1)  $\alpha_{Q(t)}$ , номинального допус-

каемого напряжения (2)  $\alpha_{ндн}$  и относительно количества пусков (3)  $\alpha_{п}$ ; в температурной компоненте: для допускаемого напряжения (4)  $\alpha_{дн}$ , предела ползучести (5)  $\alpha_{пп}$  и предела длительной прочности (6)  $\alpha_{пдп}$ ; в механической компоненте: для предела прочности (7)  $\alpha_{ппр}$ , предела текучести (8)  $\alpha_{птг}$ , относительного удлинения (9)  $\alpha_{оу}$ , относительного сужения (10)  $\alpha_{ос}$  и ударной вязкости (11)  $\alpha_{ув}$ .

Поэлементное агрегирование предусматривает нахождение агрегированной модели степени повреждения металла (СПМ) элементов по компонентным данным, полученным при выполнении 1-ой операции. Найдены весовые коэффициенты для надежностной, температурной и механической компонент, которые соответственно составили: 1/2, 1/3 и 1/6.

При поагрегатном агрегировании сначала выбирается удельное количество элементов в агрегате. Выбор оптимального количества осуществляется по критерию минимума среднего риска и оно находится в районе 100 элементов на агрегат. Таким образом, создан ряд агрегатов, для каждого из которых вычислены по предложенному алгоритму три параметра:  $N_{ai}$ ,  $N_{qi}$ ,  $N_{zi}$ , из которых создаются по три агрегированные модели: аддитивная, мультипликативная и комбинированная с учетом весовых коэффициентов, заданных по умолчанию. Имеется возможность переназначения коэффициентов весомости, но с обязательным выполнением условия нормировки.

Погрупповое агрегирование имеет конечной целью получение основных статистических характеристик: мат. ожидания  $M$ , дисперсии  $D$ , стандартного отклонения  $\sigma$  и границ интервалов для гибов, сварных соединений и труб с опорой на схемы графической части базы данных.

На уровне общего агрегирования в качестве исходной информации используются найденные значения ТС каждого агрегата, по которым вычисляются те же критерии:  $N_a$ ,  $N_q$ ,  $N_z$  и с теми же весовыми коэффициентами находятся агрегированные модели:  $S_{адд}$ ,  $S_{мпт}$ ,  $S_{кmb}$ , из которых по критериям минимального, среднего и максимального рисков находятся соответствующие ТС ТЭО:  $S_{опт.мин}$ ,  $S_{опт.ср}$ ,  $S_{опт.макс}$ .

Результаты агрегирования по каждому техническому диагностированию ТЭО свидетельствуют о существенной неравномерности ТС по агрегатам, его возрастанию по мере увеличения наработки и возможности выделения потенциально опасных агрегатов.

		$S_{опт.мин}$ , $S_{опт.ср}$ , $S_{опт.макс}$										
1	$S_{адд}$			$S_{мпт}$					$S_{кmb}$			
	$N_a$			$N_q$					$N_z$			
	$S_{агр1}$			.....					$S_{агр33}$			
2	Гибы	$M_{гибов}$	$D_{гибов}$					$\sigma_{гибов}$			Интервальные значения	
	Св. швы	$M_{св.швов}$	$D_{св.швов}$					$\sigma_{св.швов}$				
	Трубы	$M_{труб}$	$D_{труб}$					$\sigma_{труб}$				
	$S_{адд1}$	$S_{мпт1}$	$S_{кmb1}$	...	$S_{адд25}$	$S_{мпт25}$	$S_{кmb25}$					
	$N_{a1}$	$N_{q1}$	$N_{z1}$	...	$N_{a25}$	$N_{q25}$	$N_{z25}$					
Схема 1			...	Схема 25								
3	$S_{опт.агр1}$			.....					$S_{опт.агр33}$			
	$S_{адд1}$	$S_{мпт1}$	$S_{кmb1}$	...	$S_{адд33}$	$S_{мпт33}$	$S_{кmb33}$					
	$N_{a1}$	$N_{q1}$	$N_{z1}$	...	$\alpha_{Na}$ , $\alpha_{Nq}$ , $\alpha_{Nz}$ ...	$N_{a33}$	$N_{q33}$	$N_{z33}$				
	Агрегат 1			...	Агрегат 33							
4	$S_{адд1}$			...	$S_{адд3317}$							
	$S_{мк1}$	$S_{тк1}$	$S_{мк1}$	...	$S_{мк3317}$	$S_{тк3317}$	$S_{мк3317}$					
	$S_{нк1}$	$S_{тк1}$	$S_{мк1}$	...	$S_{нк3317}$	$S_{тк3317}$	$S_{мк3317}$					
5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

Рисунок 1. Схема операций по нахождению агрегированных моделей ТС ТЭО: 1 – общая; 2 – погрупповая; 3 – поагрегатная (основная); 4 – поэлементная и 5 – покомпонентная

На втором иерархическом уровне выясняется степень нелинейности связи входных и выходных агрегированных моделей ТС ПО, их стационарность и стационарная связанность, а также находятся аппроксимирующие зависимости выделенных корреляционных функций, необходимые для непараметрического решения интегрального уравнения типа Винера-Хопфа. Отсутствие априорной информации о структуре и параметрах ММ изменения ТС ПО требует количественной оценки степени нелинейности, по величине которой принимается решение о возможности использования линейной модели и соответствующего математического аппарата. Необходимая информация создается на основе построения двумерных интервальных рядов, по которым вычисляются основные статистики, регрессии и дисперсионные отношения. Так, например, для оптимальных агрегированных моделей ТС энергетического котла построена 6-ти интервальная по входу и выходу корреляционная таблица, по которой с учетом известных соотношений [1] определены: математические ожидания  $\bar{U}_x = 0,50489$ ,  $\bar{U}_y = 0,76933$ ; дисперсии  $D_{U_x} = 0,000457$ ;  $D_{U_y} = 0,000222$ ; коэффициент корреляции  $r_{U_y U_x} = 0,71725$ ; прямые и обратные регрессии (рисунок 2а и б); дисперсионные отношения:  $\eta_{U_y U_x} = 0,88707$  и  $\eta_{U_x U_y} = 0,88139$ ; стандартные от-

клонения коэффициента корреляции и дисперсионных отношений:  $\sigma_r = 0,01413$ ,  $\sigma_{\eta_{U_y U_x}} = 0,03767$ ,  $\sigma_{\eta_{U_x U_y}} = 0,03945$  и соответствующие критерии:  $\Theta_r = 50,74869$ ;  $\Theta_{\eta_{U_x U_y}} = 23,54753$ ;  $\Theta_{\eta_{U_x U_y}} = 22,34417$ .

Значения коэффициента корреляции и дисперсионных отношений свидетельствует о наличии существенной статистической связи между оптимальными агрегированными моделями  $U_y$  и  $U_x$ . Это подтверждается критериями, значения которых на много превосходят критическое значение, равное для вероятности 0,95 и числа степеней свободы  $k_1 = n - k$ ;  $k_2 = k - 2$ ,  $F_T = 5,7664$ . Следовательно, гипотеза о линейной зависимости между оптимальными агрегированными моделями на выходе и входе не противоречит опытным данным.

Из множества, построенных на основе оптимальных агрегированных моделей ТС ПО, выделены четыре вида авто- и взаимно-корреляционных функций (КФ):  $R_{U_x}(\tau)$ ,  $R_{U_y}(\tau)$ ,  $R_{U_x U_y}(\tau)$ ,  $R_{U_y U_x}(\tau)$ , отражающих четыре основные причины повреждения металла. Характерными особенностями КФ является: зависимость только от разности сечений  $\tau$  случайных процессов и соблюдение условия эргодичности  $\lim_{\tau \rightarrow \infty} R(\tau) = 0$  при  $\tau \rightarrow \infty$ , что свидетельствует в пользу стационарности и стационарной связанности случайных процессов на входе и выходе общей модели.

Для нормированных авто- и взаимно-КФ предложено по семейству из 4-х аппроксимирующих зависимостей каждая с увеличивающимися по сложности описания моделями: экспоненциальные, экспоненциально косинусные, экспоненциально полиномиальные и экспоненциально косинусинусные (рисунок 3а и б) [4]. Разработаны методики определения координат авто- и взаимокорреляционных функций в начальных точках, охватывающих интервал корреляции, в которых проявляется наиболее сильная статистическая взаимосвязь и называемых далее опорными и построения по ним предложенных аппроксимирующих корреляционных зависимостей с выбором по минимаксному критерию оптимальных. Во всех случаях коэффициенты аппроксимации, характеризующие свойства КФ, а, следовательно, и случайных процессов изменения ТС – положительные вещественные числа. Причем, А и В характеризуют начальные условия;  $\alpha, \beta_1, \beta_2$  – интенсивность затухания КФ, а  $\omega$  – среднюю частоту периодических составляющих случайного процесса.

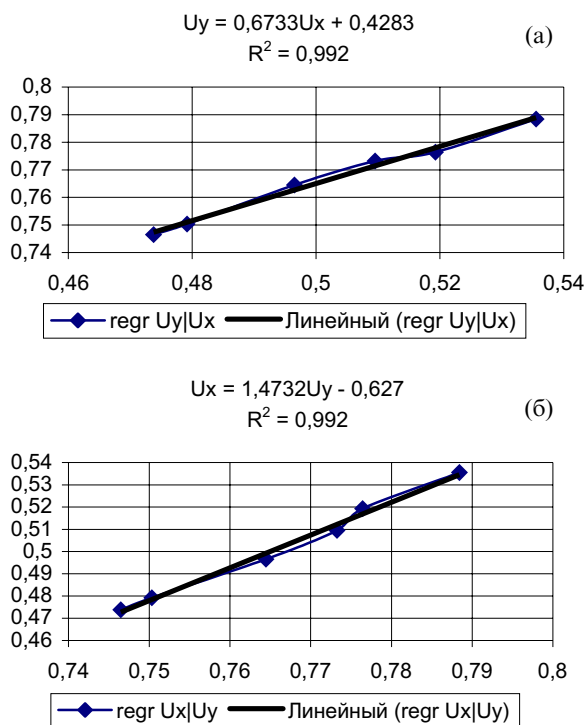


Рисунок 2. Графики прямой (а) и обратной (б) регрессий

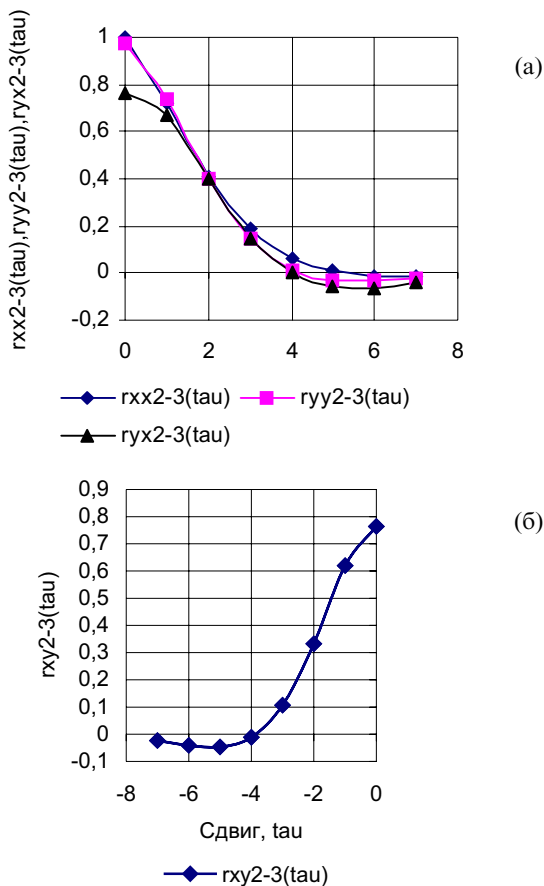


Рисунок 3. Графики авто-  $r_{xx2-3}(t)$ ,  $r_{yy2-3}(t)$  и взаимно-  $r_{yx2-3}(t)$  при  $t \geq 0$  (а) и  $r_{xy2-3}(t)$  при  $t < 0$  (б) корреляционных зависимостей по агрегированным моделям 2 и 3-го диагностирования энергетического котла

Нахождение математических моделей (ММ) ТС ПО и интенсивности его изменения, предусмотренное задачей **3-го уровня**, предполагает ее статистическую постановку с входной  $U_x(t)$  и выходной  $U_y(t)$  агрегированными моделями как случайными функциями времени. Решение сводится к определению оценки оператора  $A_t^*$ , характеризующему интенсивность изменения ТС  $v(t)$ . При этом должно выполняться требование близости случайных функций  $U_y^*(t)$  выхода ММ  $u_y^*(t) = A_t \cdot u_x(t')$  к случайной функции  $U_y(t)$ , являющейся выходной переменной объекта.

Учитывая стационарность и стационарную связанность случайных функций  $U_y(t)$  и  $U_x(t)$ , нормированность используемых корреляционных зависимостей, оптимальная оценка оператора по критерию минимума среднего риска, представленного в виде среднего квадрата ошибки, составит:

$$A_t^* \cdot r_{xx}(t - \tau) = r_{yx}(\tau) \quad (1)$$

С учетом (1) интенсивность изменения ТС ПО при бесконечном интервале наблюдения находится из следующего интегрального уравнения:

$$\int_0^\infty v(\tau) \cdot r_{xx}(t - \tau) \cdot d\tau = r_{yx}(t),$$

$$-\infty < t < \infty, v(\tau) = 0 \text{ при } \tau < 0. \quad (2)$$

Решение (2) связано с трудностями из-за того, что  $t$  изменяется во всем диапазоне, а пределы интеграла ограничены диапазоном положительных чисел. Из теории [1] известно, что интегральное уравнение Фредгольма 1 рода (2) при определенных ограничениях, не существенно сужающих область решения, сводится путем декомпозиции авто и взаимокорреляционных зависимостей на две составляющие при  $t \geq 0$  и  $t < 0$  к интегральному уравнению Вольтерра 1 рода, аналитически решаемое с помощью преобразования Лапласа.

$$\int_0^t v(\tau) \cdot [r_{xx}^+(t - \tau) - r_{xx}^-(t - \tau)] \cdot d\tau = r_{yx}^+(t) - r_{yx}^-(t). \quad (3)$$

Поскольку для всех рассматриваемых функций существует преобразование Лапласа, то решение (3) всегда существует и при том оно единственное. Применяв прямое преобразование Лапласа и учтя, что согласно теореме умножения свертка оригиналов имеет изображением произведение изображений, получим выражение для нахождения передаточной функции (ПФ)  $G(s)$ :

$$G(s) \cdot [r_{xx}^+(s) - r_{xx}^-(s)] = r_{yx}^+(s) - r_{yx}^-(s). \quad (4)$$

Зная ПФ, находим математические модели технического состояния ПО и интенсивности его изменения с помощью обратного преобразования Лапласа.

Точность полученных математических моделей (ММ) определяется систематическими ошибками и вероятностными характеристиками случайных ошибок выходной переменной. При этом, величина систематических ошибок определяется математическим ожиданием (МО), а вероятностные характеристики случайных ошибок оцениваются дисперсией выходной переменной. Общая задача исследования точности ММ сформулирована следующим образом: зная математическое ожидание (МО)  $m_{U_x}$  и стандартное отклонение  $\sigma_{U_x}$  оптимальной агрегированной модели на входе и ММ изменения ТС ПО определенного класса, типа и группы предложенной классификации, найти МО  $m_{U_y}(t)$  и дисперсию  $D_{U_y}$  выходной переменной и сопо-

ставить с МО  $m_y^*(t)$  и  $D_y^*(t)$ , найденными по оптимальной выходной агрегированной модели.

Оценки  $m_{U_y}^*(t)$  и  $D_{U_y}^*(t)$  соответствующего стационарного случайного процесса, обладающего свойством эргодичности, могут быть вычислены по одной реализации на достаточном по длительности интервале  $(0;T)$  как средние значения:

$$m_{U_y}^*(t) = \frac{1}{T} \int_0^T u_y(t) dt; D_{U_y}^*(t) = \frac{1}{T} \int_0^T [u_y^o(t)]^2 dt, (5)$$

где  $u_n(t)$  – реализация случайного процесса на выходе ММ;

$u_y^o(t) = u_y(t) - m_{U_y}^*$  – центрированная реализация выходного процесса.

Такая задача решается различными способами, но в данном случае целесообразен метод компьютерного моделирования в интегрированной среде визуального моделирования (VisSim), в которой одновременно организовываются блоки вычисления МО и дисперсии выходной переменной. Для этого физически реализуемая ПФ преобразуется в обыкновенное дифференциальное уравнение операторной формы, из которого выражается выходная переменная и находятся начальные условия для интегральных сумм, а правая часть переписывается в форме с операторами однократного

интегрирования и реализуется аналоговая модель. При подаче на ее вход случайной функции  $U_x(t)$ , имеющей нормальный закон распределения, а следовательно, известное МО и стандартное отклонение находятся значения  $m_{U_y}^*$  и  $D_{U_y}^*$  в конце интервала наблюдения  $T$ . Сопоставляя полученные значения с  $m_{U_2}$  и  $D_{U_2}$ , найденными непосредственно по оптимальной выходной агрегированной модели  $U_y(t)$ , производится статистическая оценка точности идентификации ТС ПО.

Для решения задачи **4 уровня** рационально сначала аппроксимировать полученные кривые  $m_{U_y}^*(t)$  и  $D_{U_y}^*(t)$  при подаче на вход ММ случайной функции  $U_x(t)$ , имеющей нормальный закон распределения. Затем по найденным коэффициентам аппроксимации построить графики и найти прогнозные значения ТС исследуемого ПО за установленное время прогнозирования.

Таким образом, разработана четырехуровневая методология аналитической идентификации ТС ПО. Она предполагает декомпозицию на задачи, решение которых позволяет получать оптимальные по критерию минимума среднего риска агрегированные, корреляционные, математические и прогнозные модели ТС и интенсивности его изменения.

#### Список использованной литературы:

1. Типовые линейные модели объектов управления / Анисимов С.А., Зайцева И.С. и др.; Под ред. Н.С. Райбмана, -М.: Энергоатомиздат, 1983. -264 с.
2. Первозванский А.А., Гайцгори В.Г. Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация. –М.: Наука, 1979. -340 с.
3. Владов Ю.Р. Идентификация систем. Допущено Министерством образования РФ в качестве учебного пособия для студентов вузов. –Оренбург: ОГУ, 2003. -202 с.
4. Владов Ю.Р., Кушнарченко В.М., Кандыба Н.Е., Степанов Е.П., Владова А.Ю. Идентификация технического состояния теплоэнергетического оборудования: Монография. –Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. –200 с.