

Методология диагностирования дефектов промышленного оборудования по спектрам собственных частот

С.Ю. Трутаев

АО «ИркутскНИИХиммаш», ул. Академика Курчатова 3, Иркутск, Россия

stas@himmash.irk.ru

Статья поступила 8.09.2017, принята 3.10.2017

На основе проведенного анализа отмечена актуальность применения экспрессных методов технического диагностирования в целях повышения качества оценки технического состояния промышленного оборудования предприятий нефтепереработки, химии и нефтехимии, нефте- и газодобычи. Определена возможность использования спектров собственных частот колебаний для нужд технической диагностики объектов машиностроения. Предложен «сигнальный» критерий оценки технического состояния оборудования, основанный на соотношении собственных частот колебаний, соответствующих балочным и оболочечным формам колебаний. Разработана расчетно-экспериментальная методология экспресс-диагностики макродефектов промышленного оборудования на основе мониторинга отклонений от «эталонного» спектра собственных частот колебаний объекта в процессе эксплуатации. Для этих целей предложено использовать метод конечных элементов в сочетании с методами оптимального проектирования конструкций. При этом экспериментальное определение спектров собственных частот предложено выполнять на основе шагового метода с интеллектуальным сужением спектрального разрешения. Верификацию и корректировку модели объекта на предмет соответствия «эталонному» спектру собственных частот предложено выполнять на основе минимизации целевой функции, представляющей собой сумму квадратов невязок между «эталонным» и текущим векторами собственных частот. Аналогичным образом предложено выполнять идентификацию местоположения и размеров дефектов. При этом минимизацию целевой функции предложено выполнять с использованием модифицированного комплексного метода Бокса. Проведены апробация и верификация методологии на ряде тестовых задач, а также на различных образцах промышленного оборудования в стендовых условиях и на действующих технологических установках АО «Ангарская нефтехимическая компания» и «Ангарский завод полимеров».

Ключевые слова: метод конечных элементов; спектр собственных частот; методы оптимального проектирования; минимизация; целевая функция; метод Бокса; мониторинг; граничные условия; макродефект.

Methodology for diagnosing defects in industrial equipment with the help of natural frequencies spectra

S.Yu. Trutaev

JSC «IrkutskNIHimmash»; 3, Akademik Kurchatov St., Irkutsk, Russia

stas@himmash.irk.ru

Received 8.09.2017, accepted 3.10.2017

On the basis of a conducted analysis it is noted that it is relevant to apply rapid methods of technical diagnosis in order to improve the quality of technical state evaluation for industrial equipment of refinery, chemical, petrochemical, oil and gas extraction plants. The possibility of using the spectra of natural frequencies of oscillations for the needs of technical diagnostics of engineering objects is determined. A "signal" criterion for assessing technical state of equipment is proposed. It is based on the correlation of its own vibration frequencies corresponding to beam- and shell-type vibrations. A calculating and experimental methodology for rapid diagnosis of industrial equipment macrodefects has been developed. It is based on the monitoring of deviations from the "reference" spectrum of natural vibration frequencies during the operation. For these purposes, it is suggested to use the finite element method in combination with the methods of optimal design of the constructions. However, the experimental defining of natural frequencies spectrum is proposed to be performed on the basis of step-by-step procedure with intellectual accumulation of spectral resolution. It is suggested to perform verification and adjustment of the facility model to conform the "reference" spectrum of its own frequencies on the basis of minimizing the target function, that is the sum of squares of discrepancy between the "reference" and current vectors of natural frequencies. It is proposed to identify the location and size of the defect similarly. However, it is suggested to minimize the target function with modified complex Box method. The methodology has been tested and verified on a number of test tasks, as well as on various industrial equipment during the bench testing and on the operating process units of JSC "Angarsk Petrochemical Company" and JSC "Angarsk Polymer Plant".

Keywords: finite element method; spectrum of natural frequencies; optimal design methods; minimization; target function; Box method; monitoring; boundary conditions; macrodefect.

Введение

Применяемые сегодня при техническом диагностировании традиционные методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, магнитный, вихретоковый и

др.) (НК) в общем позволяют решить задачу оценки технического состояния оборудования, однако в силу выборочности (дискретности) такого контроля конечный результат напрямую зависит от квалификации экс-

перта, определяющего места расположения точек для контроля и осуществляющего выбор методов НК. При этом в ряде случаев даже полное соблюдение рекомендаций нормативных документов, например требований [1], не гарантирует достоверность оценок технического состояния объекта, базирующихся на результатах такой дефектоскопии. Например, на рис. 1 показан фрагмент трубопровода DN 200, результаты выборочной толщинометрии которого не позволили выявить локальные дефекты типа «потери сечения», достигающие глубины более 50 % толщины стенки трубопровода. С учетом изложенного для повышения качества оценки технического состояния оборудования целесообразным является применение различных техник экспрессного контроля дефектов, позволяющих быстро выполнить контроль исследуемого объекта на предмет идентификации «проблемных» зон, чтобы в дальнейшем соответствующим образом скорректировать программу обследования традиционными методами НК.

О существующих методах экспрессного контроля дефектов объектов машиностроения. Среди известных техник экспрессного контроля, широко применяемых сегодня на промышленных предприятиях РФ, можно отметить такие, как метод магнитной памяти металла (МПМ) [2], методы акустической эмиссии (АЭ) [3] и акустической импульсной рефлектометрии (АИР) [4].



Рис. 1. Не обнаруженные традиционными методами НК дефекты типа «потери сечения» на трубопроводе DN 200

Методы диагностирования дефектов, использующие в своей основе собственные характеристики исследуемого объекта, также имеют достаточно широкое распространение в технике [5, 6]. В настоящее время такие методы успешно применяются, например, для контроля колесных пар на железнодорожном транспорте [7], оценки состояния лопаток турбин и компрессоров [8], диагностики конструкций зданий [9] и т. д. Так, в 2014 г. в РФ был введен в действие стандарт [10], регламентирующий контроль за состоянием конструкций зданий и сооружений в процессе эксплуатации, в том числе за счет периодического мониторинга периодов и декрементов затухания основного тона собственных колебаний. В случае изменения собственных характеристик исследуемого объекта более чем на 10 % по сравнению с результатами предшествующего обследования техническое состояние такого объекта ставит-

ся под сомнение, а сам объект подвергается внеплановому обследованию.

Возможности использования собственных частот колебаний для диагностирования дефектов промышленного оборудования рассмотрены во многих публикациях отечественных и зарубежных авторов. В большинстве своем работы в данной области направлены на исследование влияния различных факторов на собственные частоты при рассмотрении модельных задач. Так, в работе [11] рассмотрена задача аналитического определения граничных условий трубопровода с жидкостью по заданным частотам колебаний. В работе [12] исследовано влияние на собственные частоты отложений на стенках трубопроводов. Результаты аналитического и экспериментального исследования влияния наличия трещин на спектр собственных частот колебаний трубопроводов, заполненных жидкостью, продемонстрированы в работе [13]. Все отмеченные работы объединяет то, что исследователями в качестве базиса для идентификации «дефектов» исходной системы (наличия повреждений и отложений, изменения граничных условий) используются только балочные формы колебаний трубопроводов.

Методология диагностирования макродефектов промышленного оборудования при мониторинге его технического состояния. Многолетний опыт АО «ИркутскНИИхиммаш» по обеспечению промышленной безопасности технологического оборудования предприятий нефтепереработки, химии и нефтехимии, нефте- и газодобычи показывает, что для диагностических целей актуально использование наряду с балочными формами также и оболочечных форм колебаний. При этом расчетным и экспериментальным путем установлено [14], что чувствительность оболочечных форм колебаний сосудов, аппаратов, трубопроводов к появлению макродефектов значительно выше чувствительности балочных форм колебаний. В то же время для других типов «дефектов» исходной системы, например, для снижения податливости опорных конструкций, наблюдается обратная картина — чувствительность балочных форм колебаний значительно превосходит чувствительность оболочечных форм колебаний.

С учетом установленных закономерностей целесообразной представляется возможность использования данной информации в качестве грубого диагностического признака, или «сигнального» критерия наличия дефектов в оборудовании при мониторинге его технического состояния. При этом такой «сигнальный» критерий можно представить, например, в виде:

$$\psi = \left| \frac{f_6}{f_0} \right|, \quad (1)$$

где $\overline{f_6}$ — отношение частоты колебаний объекта, соответствующей балочной форме для текущего состояния, по отношению к аналогичной (эталонной) частоте колебаний для бездефектного состояния; $\overline{f_0}$ — отношение частоты колебаний объекта, соответствующей оболочечной форме для текущего состояния, по отношению к аналогичной (эталонной) частоте колебаний для бездефектного состояния.

С учетом изложенного предложена новая методология экспрессной диагностики макродефектов оборудования, основанная на использовании современных численных методов и методов оптимального проектирования конструкций. Методология может применяться в рамках технологии расчетно-экспериментальной оцен-

ки технического состояния оборудования опасных производственных объектов, регламентированной в [15], а также при осуществлении мониторинга состояния оборудования согласно [16]. Практическая реализация методологии формализована в виде алгоритма, показанного на рис. 2.

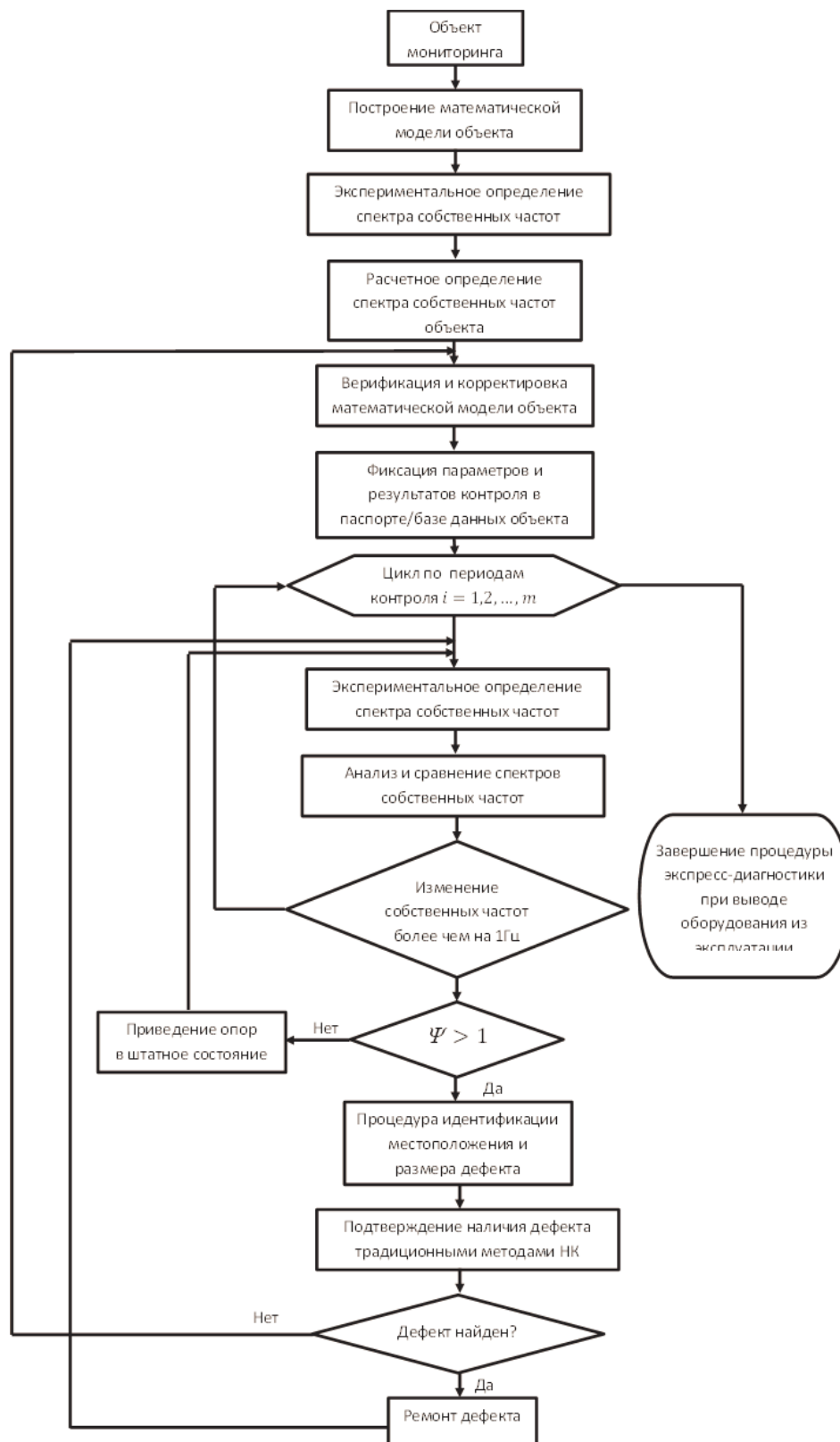


Рис. 2. Алгоритм экспресс-диагностики макродефектов в промышленном оборудовании

В качестве основы для применения методологии используется математическая модель исследуемого объекта, которая строится исходя из представления объекта в виде линейной упругой механической системы с конечным числом степеней свободы с применением метода конечных элементов (МКЭ) [17]. Для этого могут быть использованы различные современные программные пакеты, например ПО «COMPASS» [18].

В общем случае использование МКЭ в отношении моделирования статики и динамики технических объектов предполагает следующие базовые шаги [17]:

- объект с требуемой степенью детализации разделяется на конечное число подобластей определенных размеров (конечных элементов), сопрягаемых в узловых точках;

- неизвестная непрерывная функция (например, функция перемещений узловых точек деформируемого тела), аппроксимируется полиномиальными функциями (функциями формы), значения которых внутри элемента и на его границах определяются через значения функций в узлах;

- подстановка полученных аппроксимаций для каждой подобласти в разрешающие уравнения позволяет получить общую систему уравнений с неизвестными параметрами, решение которой обеспечивает приближенное решение рассматриваемой задачи.

Выбор типа и формы конечных элементов, используемых для моделирования исследуемого объекта, определяется характером решаемой задачи, при этом от правильности такого выбора напрямую зависит точность получаемого приближенного решения.

Верификация полученной математической и соответствующей ей конечно-элементной модели оцениваются на основе сравнения расчетного спектра собственных частот колебаний модели с экспериментально полученным спектром.

Расчетное определение спектра собственных частот колебаний объекта выполняется численно на основе построенной математической модели посредством решения обобщенной задачи на собственные значения вида [19]:

$$[K][\Phi] = [M][\Phi][\lambda], \quad (2)$$

где $[K]$ — матрица жесткости системы; $[M]$ — матрица масс системы; $[\Phi]$ — матрица $[M]$ ортогональных и нормированных собственных векторов; $[\lambda]$ — диагональная матрица собственных значений, равных квадратам соответствующих собственных частот недемпфированных колебаний.

В случае необходимости учета влияния на собственные характеристики объекта статических нагрузок (например, внутреннего давления) обобщенная задача на собственные значения (2) представляется в виде [20]:

$$[\bar{K}][\Phi] = [M][\Phi][\lambda], \quad (3)$$

где $[\bar{K}]$ — матрица жесткости, учитывающая предварительное напряжение от статических нагрузок, вычисляемая как:

$$[\bar{K}] = [K] + [K_\sigma], \quad (4)$$

где $[K]$ — матрица жесткости; $[K_\sigma]$ — матрица геометрической жесткости, определяемая тензором предварительных напряжений, обусловленных действием на оборудование статических нагрузок.

Для экспериментального определения спектра собственных частот в общем случае могут использоваться методы, изложенные в [21]. Однако при необходимости учета высших форм колебаний объекта целесообразным является использование уточненных методов, например, основанных на вычислении передаточной функции конструкции при различных типах динамического возбуждения [22].

Простейшим и наиболее легко реализуемым вариантом отмеченной методологии является метод импульсного (ударного) возбуждения [23]. Схема проведения испытаний в соответствии с данным методом предполагает нанесение одного или нескольких ударов по исследуемому объекту с использованием специального молотка с вмонтированным в него датчиком силы. При этом на самом объекте в одной или нескольких точках размещаются датчики (например, ускорений), фиксирующие отклик конструкции в момент удара, когда выполняется синхронное измерение входного сигнала $u(t)$ (временная реализация, регистрируемая с датчика силы) и выходного сигнала $v(t)$ (временная реализация, регистрируемая с датчика/датчиков ускорений).

Передаточная функция объекта при этом определяется как [23]:

$$H(f) = \frac{G_{uv}(f)}{G_u(f)}, \quad (5)$$

где $G_{uv}(f) = U^*(f)V(f)$ — взаимный спектр между $u(t)$ и $v(t)$; $G_u(f) = U^*(f)U(f)$ — спектр мощности входного сигнала $u(t)$; $U^*(f)$ — комплексно сопряженный спектр $U(f)$.

Очевидным недостатком метода импульсного возбуждения является то, что спектр мощности входного сигнала $u(t)$ зависит от множества неконтролируемых оператором факторов, таких как сила удара, длительность ударного импульса и т. д., что в итоге приводит к вариативности проводимых измерений. Так, чем продолжительнее ударный импульс, тем меньший частотный диапазон объекта удастся охватить при проведении процедуры. Помимо этого на результат измерений оказывает влияние материал, из которого исполнен ударник тестового молотка. Ударник, выполненный из твердых материалов, позволяет возбуждать более высокие частоты колебаний объекта, в то же время ударник, выполненный из мягких материалов, обеспечивает возбуждение только низких частот. Помимо этого, имеется еще целый ряд факторов, влияющих на результаты измерений (частотное разрешение, типы весовых окон и т. п.) [22], которые, наряду с уже перечисленными факторами, делают метод импульсного возбуждения непригодным для целей периодического мониторинга.

С учетом этого более привлекательными методами экспериментального определения собственных частот являются методы, требующие использования возбуждения колебаний объекта на различных частотах с ис-

пользованием специальных вибраторов. К таким методам относятся, в частности, метод плавающего синуса (*swept sine testing*) [24], а также шаговый метод (*stepped sine excitation*) [25].

Для решения рассматриваемых задач наиболее подходящим является шаговый метод возбуждения конструкции на фиксированных частотах. Он обладает наиболее высоким отношением «сигнал – шум», а также отношением «ПИК – СКЗ» в силу того, что вся энергия возбуждения «закачивается» в конструкцию на фиксированных частотах [25]. При этом методе легко реализуется контроль за частотой и амплитудой возбуждения. Указанная методология успешно применяется в различных отраслях промышленности РФ, в том числе в космической отрасли [26], материаловедении [6] и т. д.

Ключевым недостатком указанной методологии является длительность тестирования, определяемая, с одной стороны, требуемым спектральным разрешением, а также временем задержки, необходимым для по-

лучения установившихся колебаний объекта на заданной частоте. Так, например, при спектральном разрешении 0,01 Гц и времени задержки 500 мс процедура получения спектра отклика конструкции в диапазоне от 5 до 2 000 Гц занимает порядка 27 ч.

Для компенсации указанного недостатка предложен аппаратно-программный комплекс, реализующий процедуру идентификации собственных частот объекта шаговым методом под управлением специального интеллектуального алгоритма. Алгоритм обеспечивает сокращение времени построения спектра отклика конструкции за счет адресного увеличения спектрального разрешения и времени задержки только в окрестности резонансных частот, определяемых за счет предварительного применения техники импульсного возбуждения ударным импульсом [23]. Пример экспериментально определенного спектра собственных частот объекта с использованием указанной методологии показан на рис. 3.

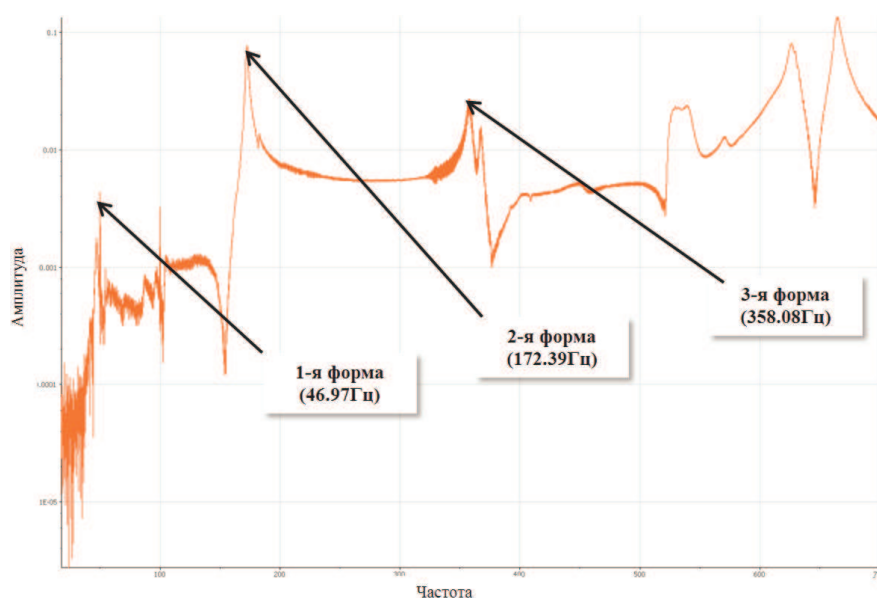


Рис. 3. Экспериментально определенный спектр собственных частот

Корректировку математической модели с учетом экспериментально определенных частот колебаний, требующую обеспечения соответствия не только первой балочной частоте объекта, а целой группе частот спектра, в том числе частотам оболочечного характера, выполнять в ручном режиме довольно затруднительно. С учетом этого требуется использование специальных численных процедур, обеспечивающих решение данной задачи в автоматическом режиме.

В общем случае такая задача может быть сформулирована по аналогии с формулировкой задач оптимального проектирования конструкций (ОПК). Применительно к МКЭ она может быть сформулирована следующим образом:

найти вектор переменных проектирования:

$$\{x(x_1, \dots, x_i)\}, i = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

доставляющий минимальное значение целевой функции:

$$F(x) \rightarrow \min \quad (7)$$

при явных ограничениях на вектор переменных проектирования:

$$l_i \leq x_i \leq u_i, \text{ при } i = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$$

В выражениях (6) – (8) приняты следующие обозначения: m — число переменных проектирования; l_i, u_i — ограничения на диапазон изменения i -й переменной проектирования снизу и сверху соответственно.

В качестве целевой функции в задаче автоматической коррекции математической модели по спектру собственных частот колебаний удобно использовать сумму квадратов невязок между заданным вектором собственных частот $\{f^*\}$ и вектором собственных частот $f_j^*(x)$, соответствующим вектору $\{X(x_1, \dots, x_i)\}_j$ на j -м шаге оптимизации:

$$F(x) = \{ \{f^*\} - \{f_j^*(x)\} \}^T \{ \{f^*\} - \{f_j^*(x)\} \}. \quad (9)$$

В качестве переменных проектирования x_1, \dots, x_i в рассматриваемой задаче в общем случае могут выступать массоинерционные и жесткостные характеристики объекта, граничные условия и т. д. Однако для большинства практических задач массоинерционные и жесткостные характеристики исследуемого оборудования (трубопровод, сосуд, аппарат и т. п.) являются известными величинами и уточнения не требуют. Напротив, условия закрепления оборудования, а именно фактическая податливость опорных конструкций, усилия затяжки крепежа и т. д., как правило, неизвестны. В этой связи задача автоматической коррекции математической модели по группе собственных частот может быть сформулирована как задача коррекции граничных условий модели.

Полученный экспериментальным путем спектр собственных частот, а также параметры контроля, при которых он был получен (точки размещения датчиков на оборудовании, тип измерительной аппаратуры, чувствительности датчиков, параметры сбора и обработки данных и т. п.), заносятся в паспорт оборудования, а также в соответствующую базу данных ERP системы или диагностической службы предприятия. Указанные данные служат базисом для дальнейшего мониторинга технического состояния оборудования по критерию изменения спектров собственных частот в процессе эксплуатации.

В каждом последующем контрольном периоде $i = 1, 2, \dots, m$ (например, во время каждого остановочного ремонта) процедура экспериментального определения спектра собственных частот объекта повторяется при соблюдении параметров контроля и обработки данных, которые отмечены в паспорте оборудования (базе данных).

При значительном (более 1 Гц) изменении частот колебаний объекта по сравнению с эталонным спектром частот вычисляется «сигнальный» критерий (1), по которому судят о причинах выявленных отклонений.

При $\psi > 1$ делается предположение о наличии в диагностируемом оборудовании макродефекта типа «потеря сечения», в противном случае ($\psi \leq 1$) — об ослаблении опорных конструкций.

Для подтверждения наличия дефекта в идентифицированной зоне оборудования в ней проводится дополнительный контроль с использованием традиционных методов НК, после чего дефектный участок подвергается ремонту либо, в случае постановки ложного диагноза, осуществляются повторная верификация и корректировка исходной математической модели.

Процедура идентификации макродефектов. Задача идентификации расположения и размеров дефектов в диагностируемом оборудовании с использованием информации о спектре собственных частот колебаний объекта может быть сформулирована по аналогии с задачей автоматической корректировки граничных условий математической модели, рассмотренной выше. Отличие будет заключаться в структуре вектора переменных проектирования, в котором вместо граничных условий будут рассматриваться параметры предполагаемого макродефекта. В качестве таковых в общем

случае могут выступать такие параметры, как координаты местоположения дефекта, его размеры (глубина, площадь) и др.

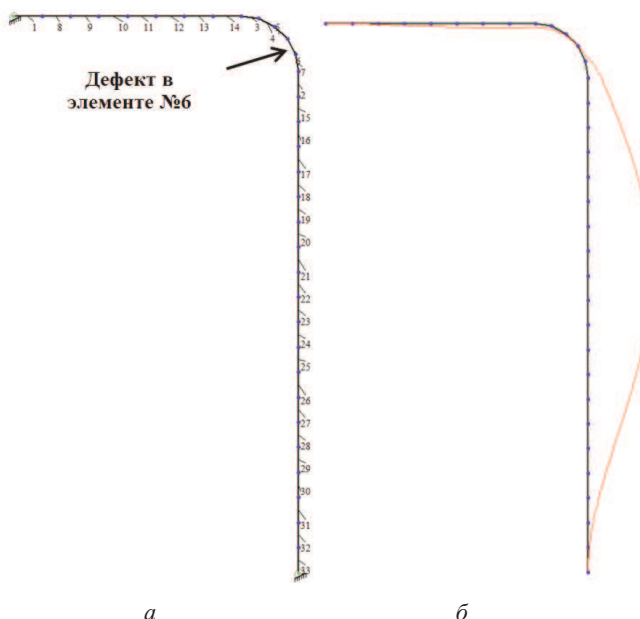


Рис. 4. Расчетная модель и форма колебаний модельного трубопровода: *a* — конечно-элементная модель трубопровода; *б* — 1-я форма колебаний

Рассмотрим процедуру идентификации местоположения и размеров заданного макродефекта на примере модельного трубопровода DN 108 при толщине стенки 0,004 м. Расчетная модель трубопровода (рис. 4) выполнялась с использованием прямолинейных стержневых конечных элементов ПО «COMPASS» [18], в том числе в зонегиба. Всего в тесте было использовано 33 стержневых конечных элемента. Граничные условия накладывались на крайние узлы модели и соответствовали жесткой заделке концов трубопровода.

Модельный дефект типа «потеря сечения» был принят в конечном элементе № 6, при этом для него было задано утончение стенки трубопровода на 50 %.

При решении задачи идентификации макродефекта в теле модельного трубопровода в качестве переменных проектирования были приняты:

- 1) номер стержневого конечного элемента;
- 2) толщина стенки трубопровода в зоне дефекта.

Решение задачи выполнялось в автоматическом режиме с использованием модифицированного метода Бокса. Для наглядной иллюстрации процесса поиска дефекта в трубопроводе наряду с использованием модифицированного метода Бокса [27] был применен также метод прямого сканирования по сетке [28], позволивший получить значения целевой функции (9) во всем диапазоне изменения переменных проектирования. Результаты работы алгоритма идентификации продемонстрированы на рис. 5.

Как видно на рис. 5, процедура поиска с использованием модифицированного метода Бокса сошлась за 29 итераций. При этом найденный оптимум соответствовал расположению модельного дефекта в конечном элементе № 6 модели при толщине трубопровода в указанной зоне $0,00199998 \approx 0,002$ м (50 % от толщины).

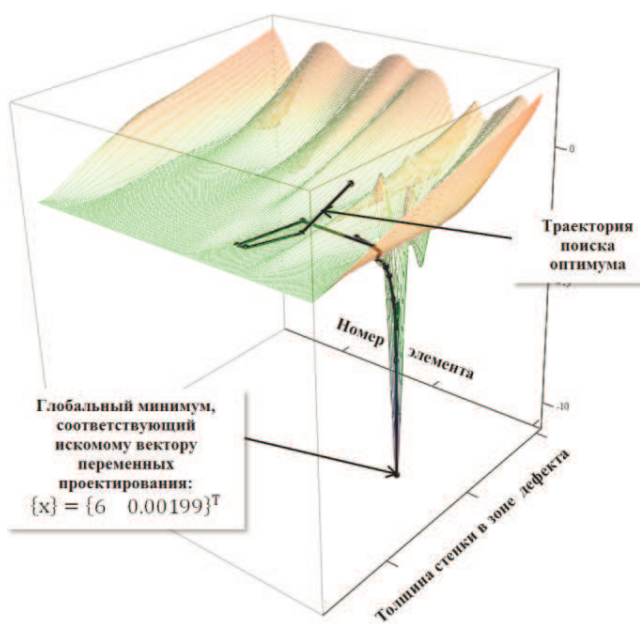


Рис. 5. Результат работы алгоритма идентификации местоположения и размера дефекта

Выводы

В целях повышения качества оценки технического состояния промышленного оборудования предприятий нефтепереработки, химии и нефтехимии, нефте- и газодобычи предложен расчетно-экспериментальный метод экспресс-диагностики макродефектов оборудования на основе мониторинга отклонений от «эталонного» спектра собственных частот колебаний объекта в процессе эксплуатации, включающий процедуры:

- автоматической коррекции граничных условий математической модели для обеспечения соответствия «эталонному» спектру собственных частот;
- идентификации местоположения и размеров макродефектов.

Проведены апробация и верификация методологии на ряде тестовых задач, а также на различных образцах промышленного оборудования в стендовых условиях и действующих технологических установках АО «Ангарская нефтехимическая компания» и «Ангарский завод полимеров».

Литература

1. СТО - СА - 03 - 004 - 2009. Трубчатые печи, резервуары, сосуды и аппараты нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. Требования к техническому надзору, ревизии и отбраковке, утв. ОАО "ВНИКТИнефтехимоборудование" протоколом № 5 от 16 дек. 2008 г. Волгоград, 2010. 75 с.
2. ГОСТ Р ИСО 24497 - 3 - 2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Ч. 3. Контроль сварных соединений, утв. приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 10 нояб. 2009 г. № 499 ст. 2010. М., 2011.
3. ПБ 03 - 593 - 03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов, утв. постановлением Госгортехнадзора России от 9 июня 2003 г. № 77. М., 2003.
4. Быков С.П., Иншаков Д.В., Кузнецов К.А. Применение акустической импульсной рефлектометрии в неразрушающем

контроле труб теплообменников // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. № 10. С. 41-43.

5. Коновалов А.М., Кутушев В.И., Яковлев А.Ю. Два перспективных направления для дефектоскопии трещин с использованием собственных колебаний объекта контроля // Контроль. Диагностика. 2017. № 8. С. 52-58.

6. Москобенко И.Б., Коварская Е.З. Использование частот собственных колебаний при неразрушающем контроле физико-механических свойств материалов и изделий // В мире неразрушающего контроля. 2012. № 4 (58). С.13-16.

7. Когушев В.И. Методика обнаружения значительных дефектов железнодорожных колес по результатам измерения частот их собственных колебаний // В мире неразрушающего контроля. 2010. № 2 (48). С.72-74.

8. Равин А.А., Проскуряков К.Б. Анализ вибрационных характеристик рабочих лопаток осевых компрессоров // Судостроение. 2012. № 2. С. 54-56.

9. Савин С.Н., Ситников И.В., Данилов И.Л. Современные методы технической диагностики и мониторинга как средство безопасной эксплуатации строительных конструкций // В мире неразрушающего контроля. 2008. № 4 (42). С. 14-18.

10. ГОСТ 31937 - 2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния, утв. и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 27 дек. 2012 г. № 1984. ст. 1999. М., 2013.

11. Ахтямов А.М., Сафина Г.Ф. Определение виброзащитного закрепления трубопровода // Прикладная механика и техническая физика. 2008. Т. 49, № 1. С.139-147.

12. Хахимов А.Г. Диагностика трубопровода с отложениями на стенках и с жидкостью под давлением по собственным частотам изгибных колебаний/А. Г. Хахимов [Электронный ресурс] // Нефтегазовое дело. 2015. Т. 49, № 4. С. 151-171. URL: <http://ogbus.ru>. (дата обращения: 20.08.2017).

13. Murigendrappa S.M., Maiti S.K., Srinangarajan H.R. Frequency - based experimental and theoretical identification of multiple cracks in straight pipes filled with fluid // NDT & E International. 2004. № 37. P. 431-438.

14. Трутаев С.Ю. Разработка методологии экспресс-диагностики дефектов промышленного оборудования по спектру собственных частот колебаний: отчет о НИР. Иркутск: АО "ИркутскНИИхиммаш", 2017. 62 с.

15. СТО - 00220227 - 044 - 2016. Оборудование опасных производственных объектов. Расчетно-экспериментальные методы исследования, утв. и введен в действие 01.09.2016. Иркутск: ИркутскНИИхиммаш, 2016. 52 с.

16. Трутаев С.Ю., Кузнецов К.А. Способ мониторинга напряженно - деформированного состояния объектов повышенной опасности: пат. 2 626 391 Рос. Федерация. № 2016135360/28(055362); заявл. 30.08.2016, Бюл. № 21. 7 с.

17. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542 с.

18. Безделев В.В., Буклемишев А.В. Программная система COMPASS. Руководство пользователя. Иркутск: Иркут. гос. техн. ун - т, 2000. 120 с.

19. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1982. 448 с.

20. Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. New York: John Wiley and Sons, 1989. 630 p.

21. ГОСТ 30630.1.1 - 99. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Определение динамических характеристик конструкции, утв. и введен в действие постановлением Гос. комитета Рос. Федерации по стандартизации и метрологии от 23 авг. 2001 г. № 349. ст. 1999. М., 2002.

22. Ramsey K.A. Effective Measurements for Structural Dynamics Testing // Sound and Vibration. 1975. P. 24-35.

23. Halvorsen W.G., Brown D.L. Impulse Technique for Structural Frequency Response Testing // Sound and Vibration. 1977. P. 8-21.

24. Chan I.H. Swept Sine Chirps for Measuring Impulse Response // SRS. 2010. P.1-6.

25. Ewins D. J. Modal testing: theory, practice and applications. 2nd edition. 2000. 400 p.

26. Межин В.С., Обухов В.В. Сравнительный анализ методов экспериментального подтверждения конечно - элементных динамических моделей конструкции космических аппаратов // Космическая техника и технологии. 2016. № 4 (15). С. 14-23.

27. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.

28. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.

References

1. STO - SA - 03 - 004 - 2009. Tube furnaces, tanks, vessels and apparatuses of refineries and petrochemical plants. Requirements for technical supervision, inspection and rejection, utv. ОАО "VNIKTIneftekhimoborudovanie" protokolom № 5 ot 16 dek. 2008 g. Volgograd, 2010. 75 p.

2. GOST R ISO 24497 - 3 - 2009. Non-destructive examination. Metal magnetic memory method. Part 3. Examination of the weld joints, utv. prikazom Feder. agentstva po tekhn. regulirovaniyu i metrologii ot 10 noyab. 2009 g. № 499 st. 2010. M., 2011.

3. PB 03 - 593 - 03. Rules of organization and performance of acoustic and emission examination of vessels, apparatuses, boilers and process pipelines, utv. postanovleniem Gosgortekhnadzora Rossii ot 9 iyunya 2003 g. № 77. M., 2003.

4. Bykov S.P., Inshakov D.V., Kuznetsov K.A. The application of acoustic pulse reflectometry during the non-destructive examination of heat exchanger tubes // Chemical and Petroleum Engineering. 2014. № 10. P. 41-43.

5. Kononov A.M., Kugushev V.I., Yakovlev A.Yu. Two promising areas for crack detection with the help of using natural vibration of an examined facility // Kontrol'. Diagnostika ("Testing. Diagnostics"). 2017. № 8. P. 52-58.

6. Moskovenko I.B., Kovarsaya E.Z. The use of natural vibration frequencies during the non-destructive examination of physical and mechanical properties of materials and products // NDT World. 2012. № 4 (58). P. 13-16.

7. Kogushev V.I. The methodology of detection of significant defects of the railway wheels based on the results of measuring the natural vibration frequencies // NDT World. 2010. № 2 (48). P. 72-74.

8. Ravin A.A., Proskuryakov K.B. Analysis of vibrational characteristics of axial compressors rotor blades // Sudostroenie. 2012. № 2. P. 54-56.

9. Savin S.N., Sitnikov I.V., Danilov I.L. Modern techniques of technical diagnosis and monitoring as a tool of safe operation of building constructions // NDT World. 2008. № 4 (42). P. 14-18.

10. GOST 31937 - 2011. Buildings and structures. The rules for inspection and monitoring of technical state, utv. i vveden v deistvie prikazom Feder. agentstva po tekhn. regulirovaniyu i metrologii ot 27 dek. 2012 g. № 1984. st. 1999. M., 2013.

11. Akhtyamov A.M., Safina G.F. Selecting of vibration isolating securing of pipeline // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2008. T. 49, № 1. P. 139-147.

12. Khakimov A.G. Diagnostics of pipeline with sediments on walls containing pressurized fluid with the help of natural bending vibrations frequencies /A. G. Khakimov [Elektronnyi resurs] // Oil and Gas Business. 2015. T. 49, № 4. P. 151-171. URL: [http://ogbus.ru.\(data obrashcheniya: 20.08.2017\)](http://ogbus.ru.(data obrashcheniya: 20.08.2017)).

13. Murigendrappa S.M., Maiti S.K., Srirangarajan H.R. Frequency - based experimental and theoretical identification of multiple cracks in straight pipes filled with fluid // NDT & E International. 2004. № 37. P. 431-438.

14. Trutaev S.Yu. Development of a methodology for rapid diagnosis of industrial equipment defects based on the spectrum of natural vibration frequencies: otchet o NIR. Irkutsk: AO "IrkutskNIikhimmash", 2017. 62 p.

15. STO - 00220227 - 044 - 2016. Equipment of hazardous production facilities. Calculating and experimental methods of investigation, utv. i vveden v deistvie 01.09.2016. Irkutsk: IrkutskNIikhimmash, 2016. 52 p.

16. Trutaev S.Yu., Kuznetsov K.A. The method of stress-strain state monitoring of high-risk facilities: pat. 2 626 391 Ros. Federatsiya. № 2016135360/28(055362); zayavl. 30.08.2016, Byul. № 21. 7 p.

17. Zenkevich O. The finite-elements method in technics. M.: Mir, 1975. 542 p.

18. Bezdelev V.V., Buklemishev A.V. COMPASS software system. User Guide. Irkutsk: Irkut. gos. tekhn. un - t, 2000. 120 p.

19. Bate K., Vil'son E. Numerical methods of analysis and finite-elements method. M.: Stroiizdat, 1982. 448 p.

20. Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. New York: John Wiley and Sons, 1989. 630 p.

21. GOST 30630.1.1 - 99. Methods of testing the resistance to mechanical external influence of machines, devices and other techware. Defining the dynamic characteristics of constructions, utv. i vveden v deistvie postanovleniem Gos. komiteta Ros. Federatsii po standartizatsii i metrologii ot 23 avg. 2001 g. № 349. st. 1999. M., 2002.

22. Ramsey K.A. Effective Measurements for Structural Dynamics Testing // Sound and Vibration. 1975. P. 24-35.

23. Halvorsen W.G., Brown D.L. Impulse Technique for Structural Frequency Response Testing // Sound and Vibration. 1977. P. 8-21.

24. Chan I.H. Swept Sine Chirps for Measuring Impulse Response // SRS. 2010. P. 1-6.

25. Ewins D. J. Modal testing: theory, practice and applications. 2nd edition. 2000. 400 p.

26. Mezhin V.S., Obukhov V.V. Comparative analysis of the methods of experimental confirmation of finite-elements dynamic models of spacecraft design // Space Engineering and Technologies. 2016. № 4 (15). P. 14-23.

27. Банди Б. Оптимизация методов. The introduction. M.: Радио и связь, 1988. 128 p.

28. Gill F., Myurrei U., Rait M. Practical optimization. M.: Mir, 1985. 509 p.