

## Новая концепция вибродиагностики уникальных объектов

А.Б. ЛОГОВ, Р.Ю. ЗАМАРАЕВ, А.А. ЛОГОВ

*Институт угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия*

e-mail: a.logov@icc.kemsc.ru, r.zamaraev@icc.kemsc.ru, logoff@rambler.ru

Полная группа из 11 моделей стационарных вибраций с частотами  $\Omega$ ,  $m\Omega$  и  $n\Omega$  образует систему границ между диагнозами, которые могут заменить эмпирические эталоны при диагностике уникальных роторных механизмов. На основе метода анализа состояния объектов оценена схема деградации — развития опасных и критических процессов. Моделирование структурных изменений спектров дополняет известные представления по уровню вибраций.

*Ключевые слова:* диагностические правила, схема деградации, моделирование, анализ данных, структура спектра, перераспределение амплитуд.

### Введение

Методология и практические приемы вибродиагностики традиционно базируются на эмпирических правилах сравнения энергетических уровней механических колебаний в частотных полосах, специфичных для конкретного объекта диагностики, и только узкий перечень таких правил подкреплён фундаментальными решениями и математическими моделями динамических систем с дефектами [1].

Приемы вибродиагностики разрабатываются главным образом изготовителями аппаратных и программных средств (например, Schenck RoTec GmbH (<http://www.schenck-rotec.com/>); Predict/DLI (<http://www.poweronline.com/>)) с выраженной отраслевой и конструктивной привязкой, не исключающей, однако, при некоторой доработке использование большинства основных правил для изучения аналогичных объектов других отраслей и близких конструктивных схем.

Работоспособность приемов вибродиагностики, опирающихся на эмпирические правила, естественно определяется представительностью и однородностью статистической базы. Эти требования в полной мере удается выполнить только для простых и второстепенных технологических установок, изучение которых в тяжелых или критических состояниях не представляет особых технических трудностей. Сущность проблемы здесь составляют известные эффекты амплитудно-частотных перераспределений спектров вибрации, фиксируемые при последовательных наблюдениях. Эти явления на ранних стадиях деградации объекта дают наиболее полную информацию о ее техническом состоянии и зарождающихся дефектах. Однако корректно описать и классифицировать перестройку спектра при малых изменениях общего уровня вибрации или, наоборот, сохранение структуры спектра при значительном увеличении общего уровня вибрации статистическими или другими методами до сих пор не удавалось.

С учетом вышесказанного для мощных и значимых технологических установок актуальной была и остается диагностика с позиций уникальности объекта и использование инвариантных критериев видов состояния. В качестве одной из возможных реализаций такого подхода к диагностике в работе [2] был предложен фундаментальный принцип выбора моделей динамических систем роторных механизмов. Идея состоит в использовании всех вариантов структурных схем, имеющих действительные передаточные функции и состоящих из элементов вида  $W_k = (s \pm ik\Omega)^{-1}$ , которые содержат только сопряженные простые полюса  $ik\Omega$ , где  $k = 2, 3, \dots$  — порядок гармоники частоты возмущения  $\Omega$ .

Ограничивающим количество моделей условием является число гармонических компонент. Таким образом, можно сформировать полную группу устойчивых моделей полигармонических колебаний с заданным числом гармоник. Из полноты группы вытекают следующие упрощения задач вибродиагностики:

- текущее состояние объекта идентифицируется по наиболее близкой по спектру модели (группе моделей);
- при повторном наблюдении удается определить направление деградации объекта на множестве моделей.

В качестве первой реализации такого подхода к диагностике в данной работе ограничимся построением и анализом трехкомпонентных структур с частотами  $\Omega$ ,  $m\Omega$  и  $n\Omega$ , представленных 14 вариантами передаточных функций

$$X(s) = \left( \frac{1}{s + i\Omega} + \frac{1}{s - i\Omega} \right) \frac{+}{\times} \left( \frac{1}{s + im\Omega} + \frac{1}{s - im\Omega} \right) \frac{+}{\times} \frac{+}{\times} \left( \frac{1}{s + in\Omega} + \frac{1}{s - in\Omega} \right), \quad (1)$$

из которых получена полная группа 11 моделей диагностических сигналов вида

$$x(t) = A_1 \sin(\Omega t + \Phi_1) + A_m \sin(m\Omega t + \Phi_m) + A_n \sin(n\Omega t + \Phi_n), \quad m < n, \quad (2)$$

где  $A_1, A_m, A_n$  — амплитуды (табл. 1);  $\Phi_1, \Phi_m, \Phi_n$  — фазы гармонических компонент моделей.

Для практических способов вибродиагностики машин и механизмов, кроме правил выбора достоверной текущей модели, необходимы также правила сравнения как моделей между собой, так и выборочных вибрационных характеристик с моделями для оценки текущего состояния объекта. Поскольку полученные модели содержат принципиальные структурные различия, то для анализа такой системы и ранжирования ее элементов (моделей) используется энтропийный метод анализа состояния [3–5]. Данный метод изначально ориентирован на анализ систем с глубокими структурными неоднородностями и имеет ряд приемов для различения видов состояния элементов системы на основе фундаментальных критериев.

## 1. Постановка задачи

В сжатой форме проблему диагностики состояния уникальных объектов можно обозначить следующим образом: переход к иному виду состояния с некоторой вероятностью

может быть реализован как путем изменения модели, так и путем изменения ее параметров  $m$  и/или  $n$ . Постановка справедлива для  $A_1 \equiv 1$  при соответствующем выборе структурных схем. В этом случае предметом моделирования и анализа становятся чередующиеся в ходе эксплуатации объекта изменения частот  $m\Omega$  и  $n\Omega$  и перераспределения их амплитуд. В результате целью поиска является схема “деградации” объекта на выбранной совокупности моделей, составляющих для него полную группу возможных видов состояния в случае тригармонических вибраций.

Принципиальное отличие развиваемого подхода от существующих состоит в том, что в понятие “диагноз” входит не только идентифицированный вид состояния, но и заключение о смежных (альтернативных) вариантах. Представленные в данной работе модели следует рассматривать как границы между видами состояния (т.е. вероятность реализации самого граничного процесса стремится к нулю).

Зависимости амплитуд моделей от параметров  $m$  и  $n$  при  $m = 2, \dots, 5$ ,  $n = 3, \dots, 6$  представлены в табл. 1, а принцип формирования набора данных приведен в табл. 2. Таким образом, получаем общую таблицу исходных данных с пробелами размерностью  $66 \times 6$ , которую можно свести к столбцам значений амплитуд  $A_m$  и  $A_n$  в элементах, заданных номером модели и номером комбинации частот. Такой набор данных с полным правом можно назвать видом состояния объекта, проявляющимся в двух показателях, — амплитудах гармоник  $A_m$  и  $A_n$ .

Для моделирования схемы деградации примем следующие, удобные для энтропийного анализа допущения:

- амплитуды гармоник пропорциональны энергии колебаний с соответствующими частотами и, следовательно, являются аддитивными величинами;
- амплитуды гармоник всех моделей имеют единую размерность.

Т а б л и ц а 1. Параметры 11 моделей вибрации

Модель	Амплитуда	
	$A_m$	$A_n$
№ 1	$A_m(\text{№ } 1) = \frac{n^2 - 1}{m(n^2 - m^2)}$	$A_n(\text{№ } 1) = \frac{m^2 - 1}{n(n^2 - m^2)}$
№ 2	$A_m(\text{№ } 2) = mA_m(\text{№ } 1)$	$A_n(\text{№ } 2) = nA_n(\text{№ } 1)$
№ 3	$A_m(\text{№ } 3) = m^2A_m(\text{№ } 1)$	$A_n(\text{№ } 3) = n^2A_n(\text{№ } 1)$
№ 4	$A_m(\text{№ } 4) = \frac{n^2 - 1}{m(n^2 + m^2 - 2)}$	$A_n(\text{№ } 4) = \frac{m^2 - 1}{n(n^2 + m^2 - 2)}$
№ 5	$A_m(\text{№ } 5) = mA_m(\text{№ } 4)$	$A_n(\text{№ } 5) = nA_n(\text{№ } 4)$
№ 6, 7	$A_m(\text{№ } 6, 7) = \frac{n^2 - 1}{m} \sqrt{4(m^2 - 1)^2 + (n^2 - 1)^2}$	$A_n(\text{№ } 6, 7) = \frac{2m(m^2 - 1)}{n^2 - 1} A_m(\text{№ } 6, 7)$
№ 8, 9	$A_m(\text{№ } 8, 9) = \frac{2n(n^2 - 1)}{m^2 - 1} A_n(\text{№ } 8, 9)$	$A_n(\text{№ } 8, 9) = \frac{m^2 - 1}{n} \sqrt{(m^2 - 1)^2 + 4(n^2 - 1)^2}$
№ 10	$A_m(\text{№ } 10) = \frac{n^2 - 1}{(n - m)(mn + 1)}$	$A_n(\text{№ } 10) = \frac{m^2 - 1}{n^2 - 1} A_m(\text{№ } 10)$
№ 11	$A_m(\text{№ } 11) = \frac{n^2 - 1}{(n + m)(mn - 1)}$	$A_n(\text{№ } 11) = \frac{m^2 - 1}{n^2 - 1} A_m(\text{№ } 11)$

Т а б л и ц а 2. Представление полного набора данных  $R$ 

Номер элемента	Параметр		Частота					
	$m$		2	3	—	4	—	—
	$n$		—	—	3	—	4	5
	Модель	Номер комбинации частот	Амплитуда					
			$A_m$	$A_m$	$A_n$	$A_m$	$A_n$	$A_n$
1	№ 1	1	0.8		0.2			
2		2	0.625				0.0625	
3		3	0.5714					0.0284
4		4		0.7143			0.2857	
5		5		0.5				0.1
6		6				0.6667		0.3333
...								
61	№ 11	1	0.32		0.12			
62		2	0.3571				0.0714	
63		3	0.3809					0.0476
64		4		0.1948			0.1039	
65		5		0.2143				0.0714
66		6				0.14035		0.0877

Эти допущения, не снижая строгости и общности выводов при последующем анализе, позволяют из полного набора данных выделять произвольные подмножества для выявления связей и тенденций в подсистемах.

Алгоритмы построения энтропийных моделей остаются стандартными [3], поэтому для некоторого подмножества  $R_{...}$  мощностью  $g$  значений амплитуд гармонических компонент (см. табл. 2) отображение на фазовую плоскость производится по следующей схеме:

— построение модели долей

$$q(i) = \frac{R_{...}(i)}{\sum_i R_{...}(i)}, \quad i = 1, \dots, g, \quad (3)$$

— построение энтропийной модели

$$V_1(i) = -q(i) \ln q(i), \quad (4)$$

— построение логарифмической модели

$$V_2(i) = \ln R_{...}(i), \quad (5)$$

— стандартизация моделей

$${}^s\mathbf{V}_1(i) = \frac{V_1(i) - \hat{M}[V_1]}{\sigma[V_1]}, \quad {}^s\mathbf{V}_2(i) = \frac{V_2(i) - \hat{M}[V_2]}{\sigma[V_2]}. \quad (6)$$

Модели  ${}^s\mathbf{V}_1$  и  ${}^s\mathbf{V}_2$ , представляют собой векторы, которые образуют оси фазовой плоскости. Для различения их элементов по видам состояния вводятся две фундаментальные границы [4, 5]:

— по критерию консервативности в виде скелетной (средней по изображающим точкам) линии, проходящей через центр фазовой плоскости с наклоном

$$r = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g {}^s V_1(i) {}^s V_2(i), \quad (7)$$

— по критерию устойчивости в виде эквивалентного по инерции совокупности изображающих точек граничного эллипса с полуосями  $A$ ,  $B$  ( $A > B$ )

$$A = \sqrt{2 \left( \frac{m-1}{m} + \frac{2r^2}{1+r^2} \right)}, \quad B = \sqrt{2 \left( \frac{m-1}{m} - \frac{2r^2}{1+r^2} \right)}. \quad (8)$$

Эллиптическая граница здесь предполагается как беспрецедентная основа для разделения уникальной совокупности 11 моделей при различных комбинациях частот по типу “легкие”, “рабочие” и “тяжелые” режимы, что не удавалось получить другими методами анализа.

## 2. Анализ системы

Первоначальное изучение моделей удобно проводить на фазовых портретах подмножеств  $L(H)(R_{m=2, n=3})$  и  $L(H)(R_{m=3, n=4})$  (рис. 1). Выделение для анализа одинаковых частотных наборов позволяет увидеть порядок перехода от модели к модели, в результате чего была составлена схема “деградации” через возрастание амплитуд моделей: № 8, 9 → № 4 → № 11 → № 1 в зоне “легких” и № 10 → № 2 → № 3 в зоне “тяжелых” режимов. Следует отметить, что “легкие” и “тяжелые” режимы (модели) определяют схему деградации от модели к модели с фиксированным частотным составом, в то время как

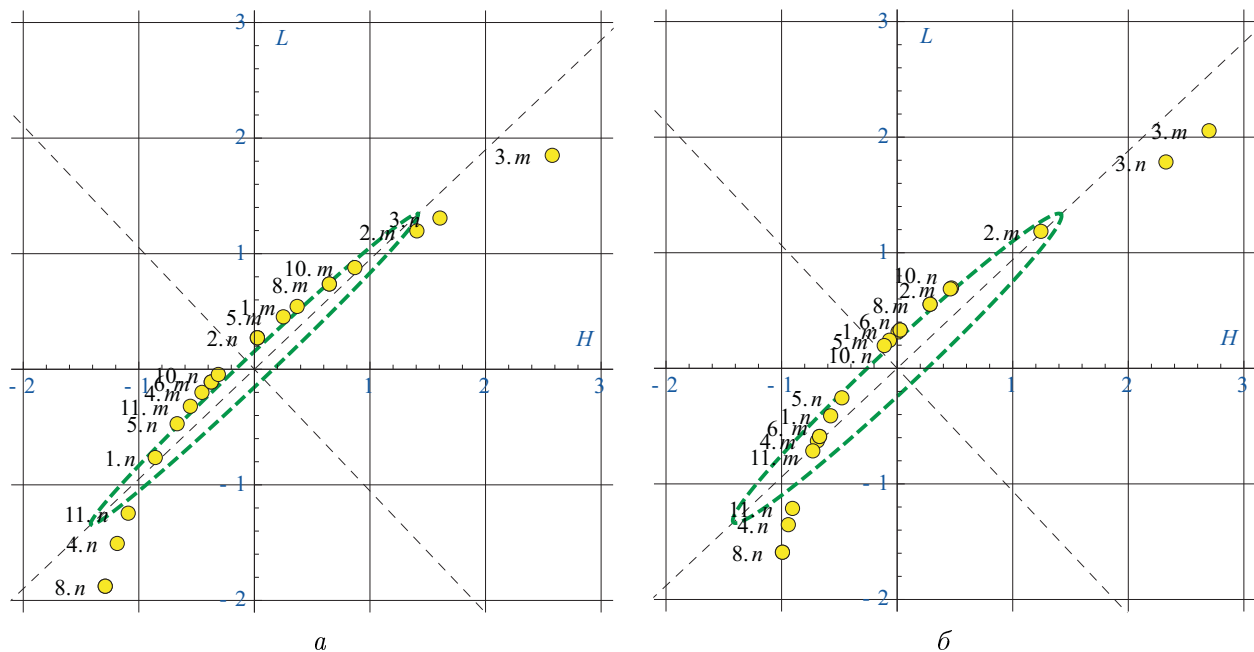


Рис. 1. Фазовые портреты подмножеств амплитуд моделей при частотном составе  $m = 2$ ,  $n = 3$  (а);  $m = 3$ ,  $n = 4$  (б)

“рабочие” режимы (модели) при смене частотного состава претерпевают перемешивание.

Выделение подмножеств  $R_m$  и  $R_n$  амплитуд  $A_m$  и  $A_n$  приводит соответственно к фазовым портретам, представленным на рис. 2. В эти подмножества одни и те же модели входят с различными частотными составами, и представляют интерес последовательности изменения именно частот.

Для подмножества  $R_m$  можно составить следующую схему изменения спектров в зонах “легких” и “тяжелых” режимов:

$$\begin{array}{cccccccccccc} m=4 & m=3 & m=3 & & m=2 & m=4 & m=2 & m=3 & m=3 & m=4 \\ n=5 & \rightarrow & n=4 & \rightarrow & n=5 & \rightarrow \circ & \leftarrow & n=4 & \leftarrow & n=5 & \leftarrow & n=3 & \leftarrow & n=5 & \leftarrow & n=4 & \leftarrow & n=5, \end{array}$$

для подмножества  $R_n$  —

$$\begin{array}{cccccccccccc} m=2 & m=2 & m=3 & & m=3 & m=4 & m=2 & m=3 & m=3 & m=4 \\ n=5 & \rightarrow & n=4 & \rightarrow & n=5 & \rightarrow \circ & \leftarrow & n=4 & \leftarrow & n=5 & \leftarrow & n=3 & \leftarrow & n=5 & \leftarrow & n=4 & \leftarrow & n=5, \end{array}$$

причем некоторые частотные составы представлены двумя и более моделями. Иными словами, существуют группы моделей, определяющие близкие по проявлениям и, очевидно, трудноразличимые по спектрам в выборочном случае виды состояния.

Другой важный аспект касается последовательности смены частотного состава: в подмножестве  $R_m$  приближение к “рабочим” режимам из зон “легких” и “тяжелых” режимов происходит симметрично, а в подмножестве  $R_n$  — несимметрично; в то же время последовательности смены частотного состава в зоне “тяжелых” режимов в обоих подмножествах отличаются только самым близким к границе элементом.

Детальный фазовый портрет полного набора спектральных показателей представлен на рис. 3. Поскольку полное множество  $R$  амплитуд можно представить как объединение подмножеств  $R_m$  и  $R_n$ , то на детальном фазовом портрете область “тяжелых” режимов аналогична соответствующей области на рис. 2, а, а область “легких” режимов

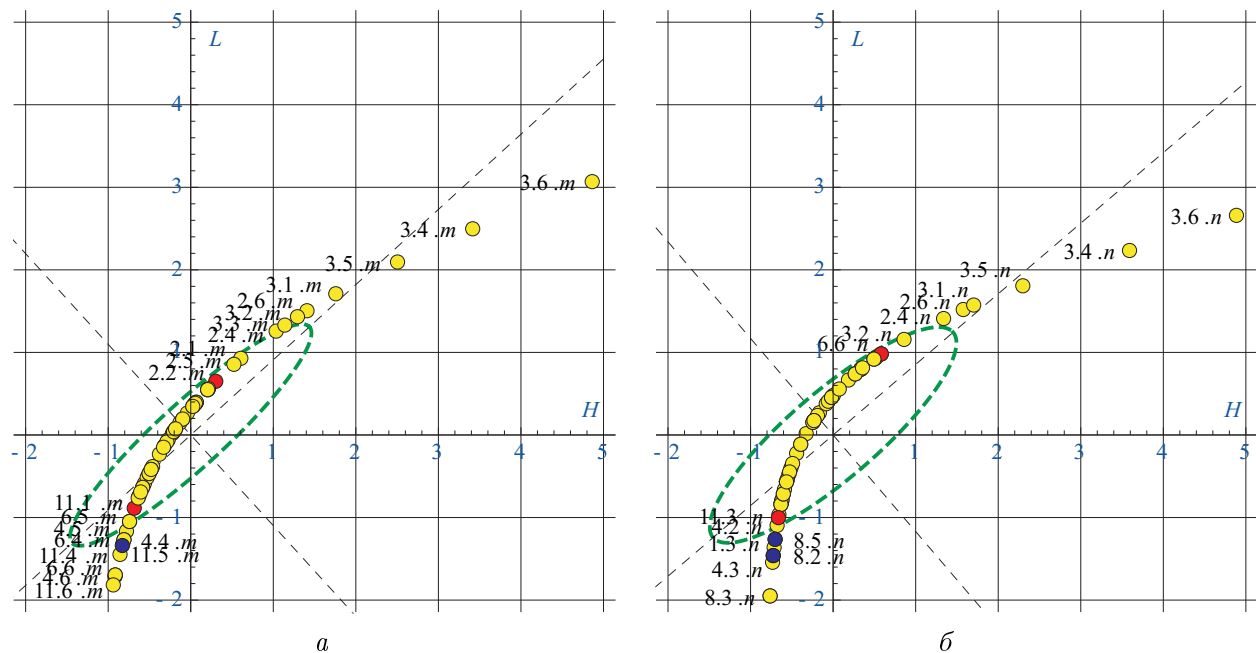


Рис. 2. Фазовые портреты подмножеств  $R_m$  (а) и  $R_n$  (б) амплитуд  $A_m$  и  $A_n$

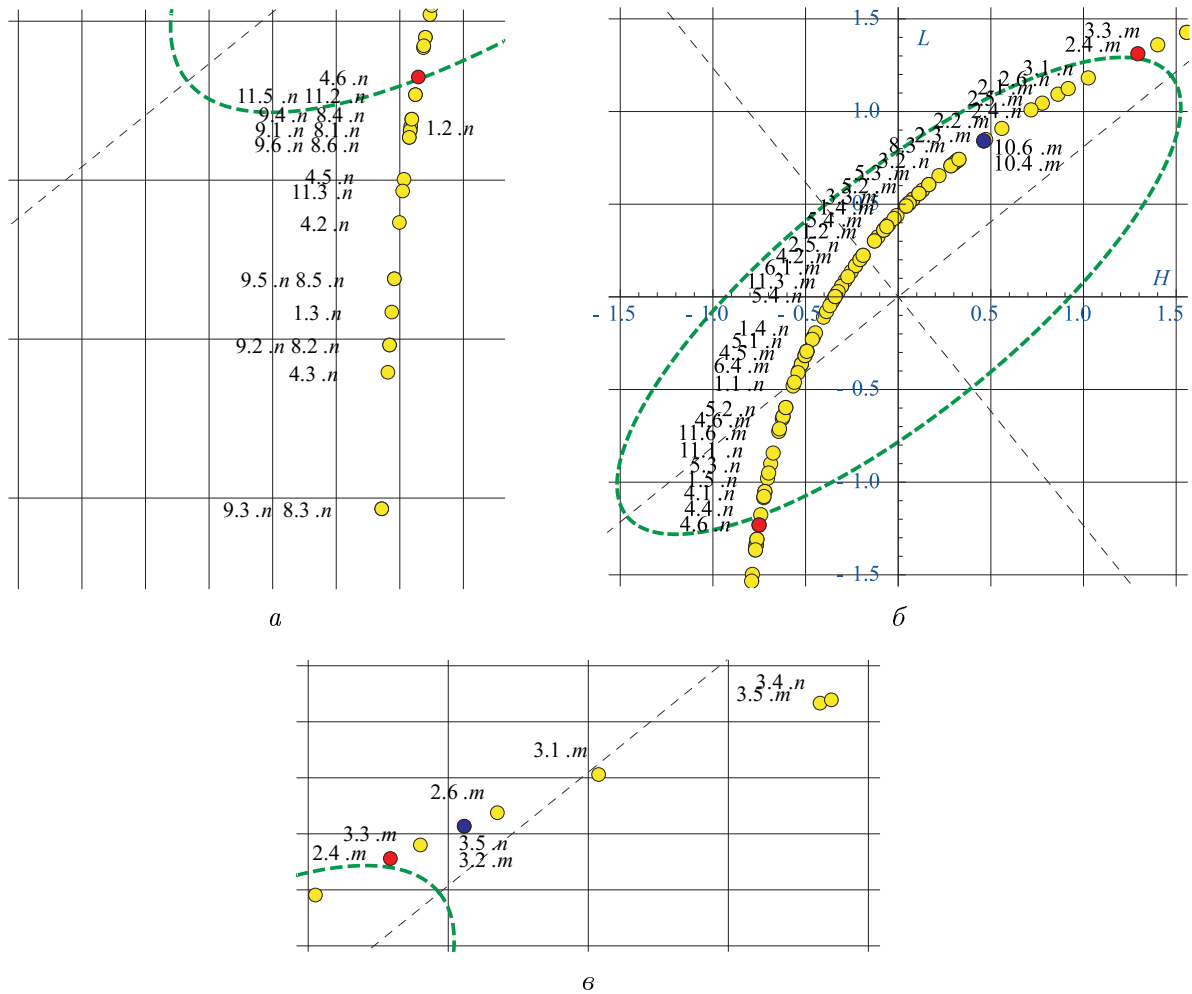


Рис. 3. Детальный фазовый портрет полного набора данных  $R$  ( $a$  —  $г$  выполнено в разных масштабах)

практически полностью определяется  $n$ -ми гармониками и аналогична приведенной на рис. 2, б.

Следует подчеркнуть доминирующую роль модели № 3 в области “тяжелых” режимов. Далее без существенных разрывов она подменяется моделью № 2, которая обеспечивает переход через граничный эллипс в область “рабочих” режимов. Здесь изображающие точки подписаны выборочно и только с целью показать характерное положение моделей, которые претерпевают интенсивное перемешивание при смене частотного состава.

Полученные данные позволяют сделать важные для практической вибродиагностики выводы:

- ранние стадии “деградации” описываются последовательным изменением нескольких моделей (динамических систем), упорядоченных по уровню третьей гармонической компоненты (высшей гармоники);

- завершающие стадии “деградации” характеризуются принадлежностью преимущественно к модели № 3, вызываются изменением ее параметров и сопровождаются соответствующей перестройкой спектра вибрации.

Отметим, что распространенное в вибродиагностике представление об ухудшении состояния объекта при перестройке спектра с четных гармоник на нечетные при сохранении среднего энергетического уровня вибрации в рассмотренной группе моделей подтверждается только для частных случаев.

Таким образом, наличие двух очевидных форм “деградации”, порождающих перестройку спектрального состава вибраций, указывает на то, что при моделировании и оценивании вероятности переходов можно использовать фазовые плоскости типа диаграмм состояния. Такая диаграмма представлена на рис. 4. Она построена в виде фазового портрета функциональной связи  $R_n(R_m)$  и разделяет все множество состояний, описываемых группой моделей, на подсистемы и тренды, наиболее характерные из которых следующие:

- тренд от состояния 8.3 (9.3) до состояния 8.1 (9.1) с пересечением границы и переходом от “легких” режимов к “рабочим”;
- группа очень близких состояний моделей № 8, 9, 1 (показано состоянием моделей № 8.1), которые формируют своеобразную узловую точку диаграммы;
- тренд от состояния 6.4 до 5.3, примыкающего к узловой точке;
- тренд от состояния 2.4 до 2.3, примыкающего к узловой точке, с пересечением границы и переходом от “рабочих” режимов к “тяжелым”;
- автономный тренд от состояния 4.3 до 4.5 с пересечением границы и переходом от “легких” режимов к “рабочим” — по-видимому, единственный эволюционный путь к автономной группе состояний моделей № 11 и 5;
- тренд от состояния 1.3 до 2.3, обеспечивающий эволюционный переход самых “легких” режимов к “рабочим”, и далее от 2.3 до 2.4 — переход к “тяжелым” режимам;
- автономный тренд от состояния 6.3 до 6.6, имеющий легкий переход к основному тренду через состояние 6.4;
- автономный тренд от состояния 10.6 до 10.1 без очевидных легких переходов к основным трендам.

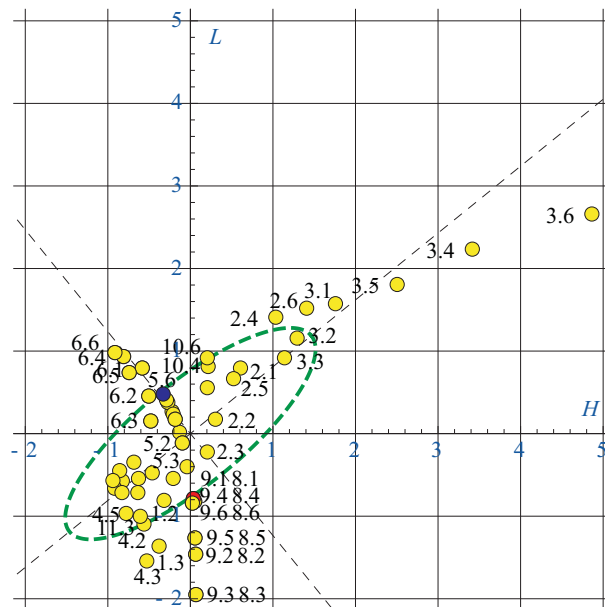


Рис. 4. Фазовая диаграмма видов состояний 11 моделей



Состояния модели № 3 характеризуются столь резким возрастанием амплитуд, что плотная группа или упорядоченный тренд не сформировались и переход к ним наиболее вероятен по основному тренду, заданному моделью № 2 в окрестности состояний 2.4 и 2.6.

Отображение на такую диаграмму амплитуд выборочных измерений позволяет для любой частотной комбинации сопоставить вероятности (энергии) и/или риски переходов в другие виды состояния и оценить направление “деградации” объекта.

### 3. Заключение

На основе полученных результатов можно сформулировать положения предложенной концепции вибродиагностики уникальных объектов:

— многообразие видов технического состояния объекта описывается полной группой моделей полигармонических колебаний с заданным числом компонент;

— текущее состояние объекта идентифицируется путем энтропийного отображения измеренных параметров вибрации на фазовые диаграммы гармонических компонент моделей, характеризуется свойствами наиболее близких по параметрам моделей и оценивается по положению относительно границ видов состояний на фазовой диаграмме;

— прогноз технического состояния объекта осуществляется на основе построения на фазовой диаграмме траекторий деградации и оценивания энергии перехода от текущего состояния к модельным и между ними.

Полученные фазовые портреты и особенно структурированный сводный портрет состояний можно рассматривать как аргумент, подтверждающий их адекватность группе из 11 стационарных моделей.

### Список литературы

- [1] ВИБРАЦИЯ энергетических машин. Справ. пособие / Под ред. Н.В. Григорьева. Л.: Машиностроение, 1974. 464 с.
- [2] ЛОГОВ А.Б., ЗАМАРАЕВ Р.Ю. Математические модели диагностики уникальных объектов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 228 с.
- [3] ЛОГОВ А.Б., ЗАМАРАЕВ Р.Ю., ЛОГОВ А.А. Анализ состояния систем уникальных объектов // Вычисл. технологии. 2005. Т. 10, № 5. С. 49–53.
- [4] ЛОГОВ А.Б., ЗАМАРАЕВ Р.Ю., ЛОГОВ А.А. Моделирование тенденций поведения элементов систем уникальных объектов // Там же. Т. 10, № 5. С. 54–56.
- [5] ЛОГОВ А.Б., ЗАМАРАЕВ Р.Ю., ЛОГОВ А.А. Алгоритмы энтропийного метода анализа для отображения свойств объекта в фазовом пространстве // Там же. Т. 10, № 6. С. 75–81.

*Поступила в редакцию 10 августа 2009 г.,  
с доработки — 30 октября 2009 г.*