

## ОБОСНОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ДИСБАЛАНСА РОТОРОВ

А. С. ЛОПАТИН, А. М. МАРКОВ, В. А. СМИРНОВ, В. Л. ХРИСТЕНЗЕН

*Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния дисбаланса на вибрацию газотурбинных установок. Рассмотрена методика выявления дисбаланса роторов методами вибродиагностики с помощью анализа низкочастотных спектров и функции когерентности.*

*The paper gives the results of theoretical and experimental investigations of the influence of disbalance on vibration of gas-turbine units. A procedure is considered for detection of rotor disbalances by the methods of vibration diagnostics, using analysis of low-frequency spectra and coherence function.*

Для обнаружения неисправностей в газотурбинных агрегатах на начальной стадии развития дефекта применяется способ сравнения спектров вибрации реальной турбины с эталонными спектрами. Однако здесь трудности связаны с выбором необходимого числа спектральных составляющих, подлежащих анализу.

Выявление дефектов, возникновение которых обуславливает силовое возбуждение вибрации, осуществляется анализом спектральных составляющих, связанных с частотой вращения ротора.

Основные дефекты, появление которых сопровождается высоким уровнем вибрации (дисбалансы, расцентровки, коробления корпусных деталей и т. д.), связаны с частотой вращения ротора и кратными с ней гармоническими составляющими.

До настоящего времени нет однозначной методики диагностирования и конкретных признаков разделения этих дефектов, так как все они базируются на определении роста первой роторной гармоники. В результате диагностические признаки этих дефектов не соответствуют требованиям однозначности и достаточности. Кратные роторные гармоники также фигурируют почти во всех случаях (почти с одной конфигурацией) и только усложняют постановку точного диагноза. В результате достоверность диагностирования этих как бы давно изученных дефектов по прежнему остается низкой.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили найти закономерности в вибрационных процессах, возбуждаемых при появлении этих дефектов.

Одним из основных признаков этих дефектов является закономерность распределения уровней роторных гармоник.

Теоретически и экспериментально доказаны существование бесконечного ряда кратных роторных гармоник, закон распределения их уровней, который изменяется при возникновении различных дефектов.

Виброперемещения точек корпуса подшипника в любом направлении описываются выражением:

$$X(t) = \sum_{k=1/m}^n A_k \cos(k\omega_p t - \varphi_k), \quad (1)$$

где  $A_k$  — амплитуда  $k$ -й гармоники;  $k$  — порядок гармоники;  $m, n$  — целые положительные числа;  $\omega_p$  — угловая частота вращения ротора.

Наиболее сильная частотная составляющая этого ряда — первая роторная гармоника. Исследования вибрационных процессов в эксплуатационных условиях показали, что интенсивность высших гармоник бездефектного механизма убывает с увеличением номера гармоник по закону, близкому к экспоненциальному. Нарушение экспоненциального закона распределения амплитуд роторных гармоник происходит при появлении и развитии определенных дефектов.

Характер изменения роторной вибрации определяется упруго-массовыми свойствами системы «ротор-опоры-корпус» и степенью демпфирования колебаний, которые в практике всегда нелинейные.

Предполагаем, что нелинейные колебания являются периодической функцией обратной частоты, раскладываемой в ряд Фурье. Тогда амплитуды роторных гармоник являются результатом разложения в ряд Фурье функции, являющейся решением нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих вынужденные колебания системы «ротор-опоры-корпус».

Известно, что если абсолютная величина функции интегрируема на интервале разложения, то коэффициенты Фурье при  $k \rightarrow \infty$  стремятся к нулю (теорема Римана-Лебега). Если функция на всем интервале разложения имеет непрерывные производные до  $(m-1)$ -го порядка включительно, причем каждая из этих производных на концах интервала имеет одно и то же значение, и если  $m$ -я производная кусочно-непрерывна, то коэффициенты Фурье убывают не медленнее, чем  $k^{-m}$ . Рассматриваемая в нашем случае функция [1] удовлетворяет перечисленным условиям, и, следовательно, амплитуды роторных гармоник убывают не медленнее, чем  $k^{-m}$ , т. е.



$$|A_k| < \frac{C}{k^m}, \quad (2)$$

где  $C$  — постоянная.

Аппроксимируем уровни роторных гармоник экспоненциальной функцией в виде:

$$|A_k| = \Phi \exp(-rk\omega_p), \quad k = 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где  $\Phi$  и  $r$  — постоянные аппроксимации.

Известное теоретическое распределение вероятности амплитуд вибрации отдельного агрегата, аппроксимируемое моделью «синусоида + шум», описывается законом Райса. При явно выраженных дискретных составляющих спектра распределение амплитуд можно отнести к нормальному. В практике с помощью статистической обработки выявлено распределение вероятности амплитуд вибрации, близкое закону Рэлея. Однако статистические данные экспериментальных исследований парка газотурбинных установок различного типа позволили обнаружить новые закономерности в распределении плотности вероятности амплитуд вибрации [1] по сравнению с известными теоретическими распределениями.

Полученное распределение спектра уровней роторных гармоник (3) позволяет представить модель виброскорости в виде полигармонического дискретного процесса (1). Переходя к эквивалентной комплексной записи, получаем выражение для комплексного общего уровня виброскорости:

$$\bar{V} = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{A}_k \exp(+ki\omega_p t), \quad (4)$$

где  $\bar{A}_k = A_k \exp(i\phi_k)$  — комплексная амплитуда виброскорости  $k$ -й роторной гармоники, характеризующая модулем  $A_k$  и фазой  $\phi_k$  колебаний;  $\omega_p$  — частота вращения ротора;  $t$  — время;  $i^2 = -1$ .

Теоретические и экспериментальные исследования [2] показали, что между комплексными амплитудами виброскорости роторных гармоник спектров, полученных на корпусах подшипниковых опор ГТУ, существует зависимость:

$$\bar{A}_k = \alpha_{k-1} \bar{A}_1^k. \quad (5)$$

Здесь  $\alpha_{k-1}$ ,  $k = 1, 2, \dots$  — коэффициенты пропорциональности [1];  $\bar{A}_k$  — средняя амплитуда виброскорости первой роторной гармоники.

Комплексную амплитуду первой роторной гармоники колебаний корпусов подшипников ротора ТВД представляем линейной функцией параметров дисбаланса [3] с помощью передаточных функций в виде:

$$\bar{A}_1 = \omega^3 \sum_{k=1}^{\infty} Q_k \bar{D}_k, \quad (6)$$

где  $\bar{D}_k = D_k \exp(i\phi_k)$  — комплексная амплитуда дисбаланса ротора, харак-

теризуемая модулем  $D_k$  и фазой колебания  $\phi_k$ ;  $Q_k$  — передаточные функции, вычисление которых производим по [1];  $k$  — число точек ротора, в которых сосредоточен дисбаланс.

Для дисбаланса ротора ТВД предполагаем, что в эксплуатационных условиях весь дисбаланс сосредоточен на ступенях ОК и определяется только установкой лопаток на ступень. Применяя для анализа вибрации ротора ТВД выражение (6), дисбаланс ротора для  $k$ -й ступени выразим в виде:

$$\bar{D}_k = \sum_{j=1}^{m_k} \left[ \frac{\mu_j L_j}{2} \right]_k \exp\left(-i \frac{2\pi(j-1)}{m_k}\right), \quad (7)$$

где  $\mu_0$ ,  $L_j$  — соответственно масса и длина лопатки;  $m_k$  — число лопаток на ступени.

Нормирование общего уровня вибрации позволяет определить наличие и степень развития дефекта в ГТУ, но не вскрывает обуславливающей его причины. Определить конкретный дефект при силовом и кинематическом возбуждении вибрации возможно только при анализе распределения уровней гармонических составляющих спектра вибрации.

Для нормирования амплитуд виброскорости роторных гармоник, распределенных по экспоненте, необходимо учитывать плотности распределения вероятности отдельных гармоник при исследовании партии ГТУ. Выражение для плотности вероятности первой роторной гармоники описывается распределением Рэлея. При  $\alpha = \text{const}$  плотность распределения вероятности  $A_k$  представим в виде:

$$P(A_k) = P(A_1) \frac{A_1}{k A_k}. \quad (8)$$

Вычисляя моменты  $m$ -го порядка, получаем связь моментов  $k$ -й и первой роторных гармоник в виде:

$$M(A_k^m) = \alpha^{(k-1)m} M(A_1^{km}). \quad (9)$$

Вводя приближенное соотношение  $M^m(A_1^k) \approx M(A_1^{km})$  и вычисляя момент второго порядка, получаем выражение  $k$ -й роторной гармоники в виде:

$$\sqrt{M(A_k^2)} \approx \sqrt{2} \sigma(A_k), \quad (10)$$

где  $\sigma(A_k)$  — дисперсия  $k$ -й роторной гармоники;

$$A_{k \text{ бд}} = \alpha_1 \sqrt{2} \sigma(A_k); \quad A_{k \text{ нр}} = \alpha_1 3\sigma(A_k); \quad (11)$$

$\sigma(A_k)$  — дисперсия  $k$ -й гармоники колебаний.

Используя максимальное значение коэффициента  $\alpha_1 = 1,86$  и выбирая среднестатистические

**Нормы уровней роторных гармоник спектра виброскорости агрегата ГТК-10-4**

Параметр	Номер гармоники				
	1	2	3	4	5
Среднее квадратическое отклонение $\sigma(A_k)$ , мм/с	1,8	0,75	0,68	0,62	0,57
Нормы бездефектного ГПА $A_{k \text{ бд}}$ , мм/с	4,7	1,95	1,76	1,6	1,5
Нормы предельно допустимые $A_{k \text{ нр}}$ , мм/с	10,0	6,0	3,8	3,0	2,4

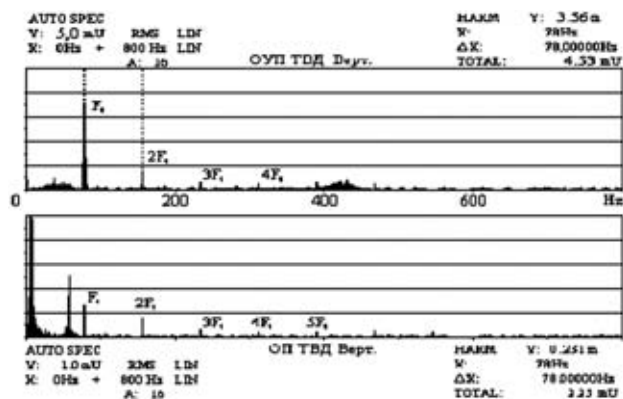


Рис. 1. Спектры вибрации ГТК-10-4 (подшипники ротора ТВД; исходное состояние)

значения роторных гармоник в трех направлениях на корпусах всех подшипников, получим значения  $A_{кбд}$  и  $A_{кпр}$  для пяти роторных гармоник ГТУ ГТК-10-4 (таблица).

Дисбалансы роторов в эксплуатационных условиях могут значительно превышать допустимые нормы. Это происходит в случае обрыва пера лопатки ОК, турбины или частичной поломки лопатки по высшим модам собственных колебаний, возникновения тепловых дисбалансов, статических прогибов ротора, коробления корпусных деталей и т. д. Закон распределения уровней роторных гармоник при больших значениях дисбаланса роторов ГТУ изучался при проведении специальных экспериментальных исследований.

Исследования вибрационного состояния газовых турбин в эксплуатационных условиях показали, что при возникновении различных дефектов существует зависимость уровней роторных гармоник. Наличие ярко выраженных дискретных гармонических составляющих в спектрах вибрации подтверждает, что вибрационные процессы для всех типов турбин являются полигармоническими, с большим отношением «сигнал-шум». Изменение уровней роторных гармоник в эксплуатационных условиях, безусловно, является диагностическим признаком возникновения дефектов и степени их развития. Выявить закономерности изменения уровней роторных гармоник для каждого конкретного дефекта, а следовательно, повысить достоверность и однозначность диагностического признака возможно только экспериментальными исследованиями с введением каждого дефекта при натурных испытаниях. Несмотря на некоторое удорожание исследований, только этот метод дает наиболее достоверные результаты.

Исследования проводились на агрегате ГТК-10-4, который отработал назначенный ресурс и подлежал демонтажу.

В программу эксперимента входили: исследование вибрационных процессов, возбуждаемых роторами ТВД и ТНД при искусственном введении дисбалансов в плоскости коррекции и на консольных дисках каждого ротора; исследование вибрационных процессов, возбуждаемых при расцентровках роторов ТНД и нагнетателя, дисбалансе соединительной муфты, а также ослаблении пред-

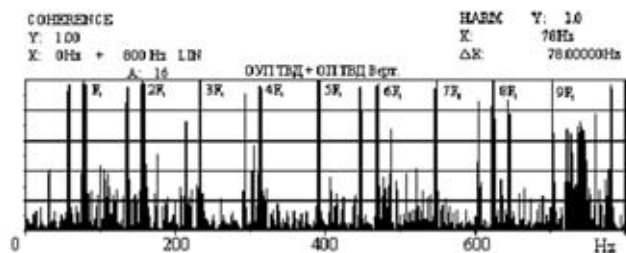


Рис. 2. Спектр функции когерентности, полученный на подшипниках ротора ТВД в вертикальном направлении (исходное состояние)

варительного натяга на вкладышах подшипников скольжения. Для исследования вибрационных процессов двухканальный анализатор 2034 был настроен для получения следующих конфигураций: автоспектры, взаимные спектры, спектры функции когерентности, спектры когерентной выходной мощности, фазовые спектры.

Изменение балансировки роторов ТВД и ТНД проводилось последовательной установкой дополнительных грузов в плоскостях коррекции (балансировочных пазах) роторов. Для каждого значения вводимых дисбалансов проводились исследования вибрационного состояния на трех режимах по оборотам роторов ГТУ. Для численной оценки процессов использовались следующие характеристики: динамический диапазон в автоматическом режиме; частотный диапазон  $F_1 = 0 \dots 800$  Гц; разрешающая способность  $\Delta F = 1$  Гц; параметр «виброскорость»; индикация уровней дискретных составляющих и общего уровня вибрации.

Исходное состояние экспериментальных исследований дисбаланса роторов соответствовало допустимому остаточному дисбалансу ТВД: по 1-й плоскости коррекции  $D_{ост} = 154$  г·см, по консольному диску —  $D_{ост} = 86$  г·см.

Автоспектры, полученные на корпусах подшипников, представляют собой дискретные эквидистантные спектры со случайными узкополосными процессами и акустическим шумом (рис. 1). Остаточный дисбаланс в районе опорно-упорного подшипника (ОУП) ротора ТВД превышает остаточный дисбаланс ротора в районе опорного подшипника (ОП). Величина виброскорости первой роторной гармоники в спектре, полученном на

ОУП, больше и составляет  $\dot{X} = 3,56$  мм/с. В спектрах вибрации на обоих подшипниках присутствуют кратные роторные гармоники, величина которых убывает с ростом номера гармоники.

В спектре, полученном на ОУП ТВД, присутствуют два широкополосных случайных процесса с центральными частотами 38 и 424 Гц. В спектре на ОП ТВД — два узкополосных процесса с частотами 15 и 58,5 Гц, уровни которых превышают уровни роторных гармоник. Частота  $f_2 = 58,5$  Гц соответствует частоте вращения ротора ТНД. Экспоненциальный закон распределения уровней роторных гармоник сохранился. В видимой части спектра виброскорости присутствуют кратные гармонические составляющие во всем измеряемом диапазоне частот. В спектре функции когерентности

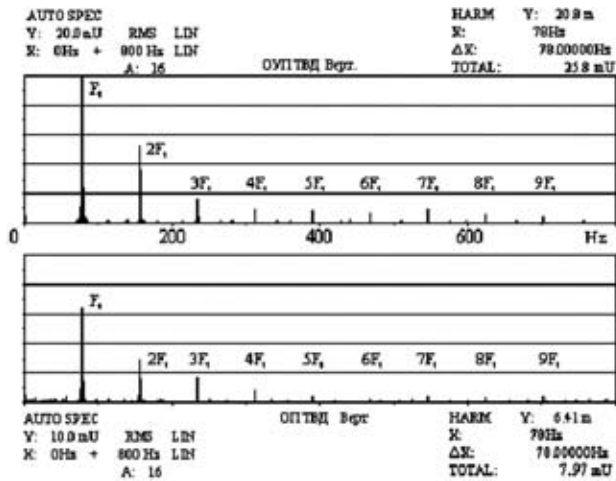


Рис. 3. Спектры виброскорости, полученные на ОУП и ОП ТВД ( $P = 137$  г)

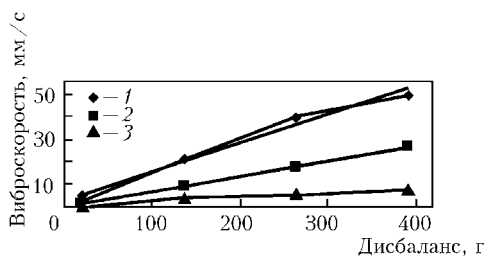


Рис. 4. Зависимость роста амплитуды виброскорости роторных гармоник от дисбаланса ротора ТВД в первой плоскости коррекции: 1 — 1-я; 2 — 2-я; 3 — 3-я гармоники

(рис. 2), полученном с двух акселерометров обоих подшипников ротора ТВД в вертикальном направлении, все роторные гармоники имеют значение  $\gamma^2 \approx 1$ , что подтверждает присутствие кратных гармонических составляющих в вибрационном процессе, возбуждаемом остаточным дисбалансом ротора. Высокий уровень частотных составляющих в спектре функции когерентности свидетельствует о взаимосвязанных колебательных процессах на обоих подшипниках ротора и о том, что эти процессы возбуждаются именно этой деталью ГТУ, т. е. ротором ТВД. Все частотные составляющие с уровнем  $\gamma^2 < 0,9$  возбуждаются другими деталями и передаются на подшипники ТВД по корпусам или по валопроводу ГТУ.

Для увеличения дисбаланса в плоскости коррекции устанавливались последовательно грузы массой  $P = 137, 264, 390$  г соответственно. Уровни виброскорости первой роторной гармоники и кратных к ней частотных составляющих резко возрастали (рис. 3).

Случайные узкополосные процессы и акустический шум ввиду увеличения динамического диапазона измерения остаются за кадром и визуально не различимы. Дальнейшее увеличение дисбаланса приводит к продолжению роста гармонических составляющих спектра виброскорости — практически без изменения закона убывания кратных роторных гармоник. Зависимость увеличения виб-

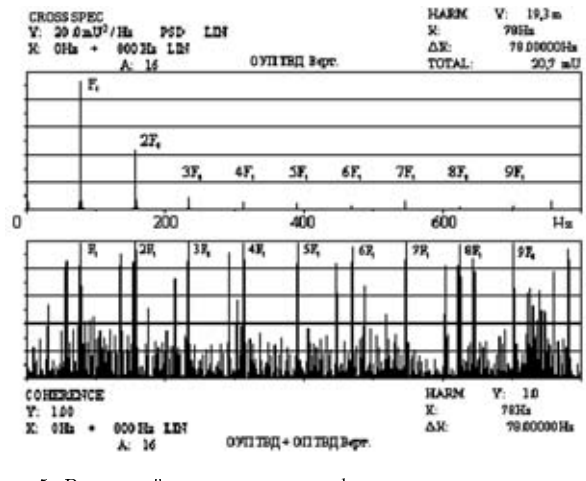


Рис. 5. Взаимный спектр и спектр функции когерентности, полученные на подшипниках ротора ТВД (дисбаланс  $P = 137$  г)

роскорости от дисбаланса по всем гармоникам близка к линейной (рис. 4). Взаимный спектр и спектр функции когерентности, полученные с акселерометров, установленных на двух опорах ротора ТВД в одном направлении, подтверждают наличие кратных роторных гармоник в вибрационном процессе, вызванном дисбалансом ротора (рис. 5). Высокий уровень частотных составляющих спектра функции когерентности ( $\gamma^2 \approx 1,0$ ) характеризует не только взаимосвязь колебательных процессов, но и тот факт, что эти процессы возбуждаются только данной деталью, т. е. ротором ТВД.

Закономерность распределения уровней роторных гармоник сохраняется при дисбалансах, вводимых во вторую плоскость коррекции (ОП ТВД) и на диск турбины — как в плоскости коррекции, так и на лопатках.

### Выводы

Теоретическими исследованиями и статистической обработкой экспериментальных данных подтверждается, что для бездефектного ГТУ уровни роторных гармоник убывают по экспоненциальному закону. Учитывая неизбежность остаточного дисбаланса в бездефектном ГТУ и сохранение закона убывания роторных гармоник с увеличением дисбаланса до предельно допустимых значений (по уровню  $V_{пр}$ ), можно утверждать, что диагностическим признаком дисбаланса ротора ГТУ является пропорциональный рост роторных гармоник. При этом экспоненциальный закон распределения уровней роторных гармоник сохраняется.

1. Бесклетный М. Е., Игуменцев Е. А. Вибрационная диагностика дисбаланса ротора газотурбинной установки ГТ-750-6. — М.: Энергомашиностроение, 1980. — № 4. — С. 27–29.
2. Вибрационный контроль технического состояния газотурбинных газоперекачивающих агрегатов / Ю. Н. Васильев, М. Е. Бесклетный, Е. А. Игуменцев и др. — М.: Недра, 1987. — 198 с.
3. Лобанов В. К. Применение статистических методов при назначении исходных дисбалансов роторов // Динамика гибких роторов. — М.: Наука, 1972. — С. 74–77.