

УДК 004.421.2+519.6

К.т.н., доцент Бранцевич П.Ю.
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Ph. D., Associate professor Brancevich P.J.
(The Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)

Анализ вибрационных характеристик пусков-выбегов подшипниковых опор

Analysis of vibration characteristics of start and coast-downs of bearing supports

Вибрационные характеристики пуска-выбега, отражающие вибрационное состояние подшипниковых опор механизмов и агрегатов, могут использоваться для оценки их технического состояния. Предложен способ автоматического принятия решения о подобии сравниваемых характеристик выбега на базе типового решающего элемента. Разработаны функции вычисления параметров характеристик пуска-выбега и решающие функции для их сравнения. Показана последовательность действий по созданию системы автоматического принятия решений. Представлен пример сравнительного анализа реальных характеристик пуска-выбега.

Vibration start-coast characteristics, reflecting the vibration state of bearing supports of mechanisms and units, can be used to assess their technical condition. A method for automatic decision-making on the similarity of the compared run-out characteristics is proposed, based on a typical decisive element. Functions for calculating the parameters of the start-run-out characteristics have been developed and decision functions for their comparison. The sequence of actions for creating an automatic decision-making system is shown. An example of a comparative analysis of the real characteristics of the start-run-out is presented.

Введение

При решении задач технической диагностики производственного оборудования требуется определять и анализировать различные параметры и характеристики. Для механизмов и агрегатов с вращательным движением, к одним из таких, относятся вибрационные характеристики пусков-выбегов. Они представляют зависимость изменения размаха виброперемещения в точке контроля от частоты вращения вала и могут быть получены с помощью современных систем виброконтроля и программ обработки вибросигналов [1,2].

Вибрационные характеристики выбега получают при свободном торможении вращающегося вала во время остановки механизма, а пуска – при его запуске и наборе оборотов. Чаще всего их используют при оценке технического

состояния механизмов и агрегатов с подшипниками скольжения (турбоагрегаты, мощные насосы и двигатели). Эти характеристики интересны тем, что во время переходного процесса, связанного с изменением частоты вращения вала, происходит вибрационное возбуждение элементов вращения и опор на собственных частотах, и параметры оборотных составляющих вибрации, вычисляемые в этих состояниях, позволяют оценить величину дисбалансов валопровода и выявить ряд других дефектов [3,4].

Осуществляя сравнение самих вибрационных характеристик пусков-выбегов, полученных на протяжении некоторого, достаточно протяженного, интервала времени, можно делать выводы об изменении технического состояния механизма или агрегата [5]. Применение методов

формализации принятия решений позволяет автоматизировать реализацию процедуры сравнения [6,7].

Вибрационные характеристики выбега

Форма вибрационных характеристик выбега весьма разнообразна, причем существенные отличия наблюдаются даже для одноименных подшипников разных однотипных механизмов [8]. На рис. 1 представлен пример таких характеристик.

Но для переходных вибрационных характеристик можно выделить и некоторые закономерности, напри-

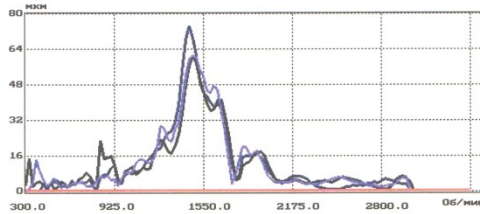


Рис. 1. Вибрационные характеристики выбега подшипниковой опоры турбоагрегата, полученные в разное время. Зависимость размаха виброперемещения (мкм) от частоты вращения вала (мин⁻¹)

мер, наличие максимумов, глобального и локальных, которые по форме напоминают параболу, а также плавность изменения характеристик в какой-то частотной зоне.

Для специалистов в области вибрации интерес представляет изменение переходных вибрационных характеристик, полученных для одного и того же подшипника в разное время, так как их причиной могут быть достаточно серьезные дефекты, например, смещение в частотной области значений собственных частот, или изменение величины дисбаланса ротора.

Однако следует учитывать, что время пуска или выбега не является постоянным и зависит от многих факторов, поэтому исходные данные, полученные с помощью систем вибромониторинга, требуется предварительно нормировать по оси абсцисс, представляющей изменение частоты вращения вала, чтобы дальнейший анализ проводить в единых координатных осях [9].

Аппроксимация вибрационных характеристик выбега

Проводить сравнение переходных вибрационных характеристик, полученных непосредственно контрольно-измерительными приборами или системами, достаточно сложно, так как они содержат помеховые составляющие и приборные погрешности. Поэтому, целесообразно про-

вести аппроксимацию исходных характеристик, а сравнительный анализ выполнять по аппроксимированным характеристикам. Форма представленных на рис. 1 вибрационных характеристик выбега, позволяет сделать предположение, что они с хорошим приближением могут быть аппроксимированы некоторым количеством гармонических составляющих, параметры которых вычисляются с помощью дискретного преобразования Фурье [9]. Аппроксимированная характеристика выбега вычисляется как:

$$A_0(k) = A_0 + \sum_{j=1}^L A_j \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot j \cdot k}{N} - \phi_j\right), \quad (1)$$

где A_0 – постоянная составляющая; A_j , ϕ_j – амплитуда и начальная фаза j -й аппроксимирующей гармоники; L – количество аппроксимирующих гармоник; N – размерность массива данных для аппроксимации; k изменяется от 0 до $N - 1$.

$$A_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k); \quad (2)$$

$$A_j = \sqrt{C_j^2 + S_j^2}; \quad \phi_j = \arctg\left(\frac{S_j}{C_j}\right). \quad (3)$$

$$C_j = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot j \cdot (k - IN)}{N}\right); \quad (4)$$

$$S_j = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot j \cdot (k - IN)}{N}\right), \quad (5)$$

где $A(k)$ – k -й элемент массива, в котором записана вибрационная характеристика выбега; N – число элементов в массиве, которые подвергаются аппроксимации, $N = IK - IN + 1$, IN – номер начального элемента данных в массиве, IK – номер конечного элемента данных в массиве.

Применение для дальнейшего анализа аппроксимированной характеристики выбега позволяет исключить случайные возмущения, которые могут привноситься в процессе измерений, а также проводить анализ более гладкой функции. На рис. 2 приведен пример такой аппроксимации двадцатью гармоническими составляющими.

Визуально можно заметить, что аппроксимирующая кривая, полученная с помощью двадцати гармонических

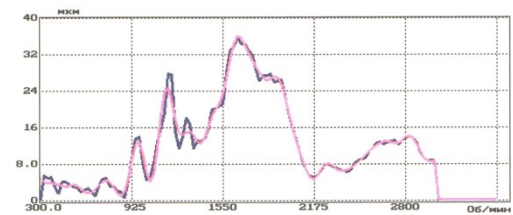


Рис. 2. Аппроксимация вибрационной характеристики выбега двадцатью гармоническими составляющими. Зависимость размаха виброперемещения (мкм) от частоты вращения вала (мин⁻¹)

составляющих, с практической точки зрения достаточно хорошо представляет исходную вибрационную характеристику выбега, так как наблюдается их близкое совпадение по значению частот и амплитуд в точках, где фиксируется большинство локальных максимумов, и лишь незначительные отклонения по амплитудам для островершинных локальных экстремумов.

Модель элемента системы принятия решений

Для выполнения сравнения, требуется некая система принятия решений о подобии сравниваемых характеристик. Предлагается следующая модель базового решающего элемента системы принятия решений по оценке состояния наблюдаемого объекта или выработке рекомендаций по воздействию на данный объект [7,9].

Входными данными базового элемента являются:

x_i – значение параметра i , $i = 1...N$.

$\omega_j(y_{1j}, \dots, y_{kj})$ – характеристика j при дискретных значениях аргумента $y_{ij}, j = 1...M$.

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

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

Причем, разные функции f_l могут применяться по отношению к одному и тому же параметру x_i , а различные функции φ_m – к одному и тому же значению характеристики ω_j . Могут быть и комплексные многопараметрические многохарактеристические функции: $\Psi_n(x_{i_1} \dots x_{i_l} \dots x_{i_n}, \omega_{j_1} \dots \omega_{j_l} \dots \omega_{j_n}, \dots \omega_{j_p})$, где $n = 1...D$; $i, j, k \in 1...N$; $l, m, p \in 1...M$.

По отношению к набору функций: $f_l(x_i), \varphi_m(\omega_j), \Psi_n(x_{i_1} \dots x_{i_l} \dots x_{i_n}, \omega_{j_1} \dots \omega_{j_l} \dots \omega_{j_n}, \dots \omega_{j_p})$ применяются обобщающие функции: $y_k = \Psi_k[f_l(x_i), l = 1...B; \varphi_m(\omega_j), m = 1...C; \Psi_n(x_{i_1} \dots x_{i_l} \dots x_{i_n}, \omega_{j_1} \dots \omega_{j_l} \dots \omega_{j_n}, \dots \omega_{j_p}), n = 1...D]$; $k = 1...L$.

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

Результат функции $S_\eta(y_k)$ определяет одно из возможных состояний анализируемого объекта, тип самого объекта, принимаемое решение. На рис. 3 данная модель представлена в графическом виде.

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

$f_l(x_i) = a_l x_i; \varphi_m(\omega_j) = b_m \omega_j$, где $l = 1...B; m = 1...C; a_l, b_m$ – действительные числа;

$\Psi_n(x_{i_1} \dots x_{i_l} \dots x_{i_n}, \omega_{j_1} \dots \omega_{j_l} \dots \omega_{j_n}, \dots \omega_{j_p}) = C_n \left(\sum_{i=1}^N r_i x_i + \sum_{j=1}^N s_j \omega_j \right)$, где $n = 1...D; i, j, k \in 1...N; l, m, p \in 1...M; r_i, s_j$ – действительные числа.

$y_k = \sum_{l=1}^B u_{l,k} f_l(x_i) + \sum_{m=1}^C v_{m,k} \varphi_m(\omega_j) + \sum_{n=1}^D w_{n,k} \Psi_n(x_{i_1} \dots x_{i_l} \dots x_{i_n}, \omega_{j_1} \dots \omega_{j_l} \dots \omega_{j_n}, \dots \omega_{j_p})$, где $k = 1...L; u_{l,k}, v_{m,k}, w_{n,k}$ – действительные числа.

$S_\eta(y_k) = \rho_\eta y_k$, где $\eta = 1...P; \rho_\eta$ – действительное число.

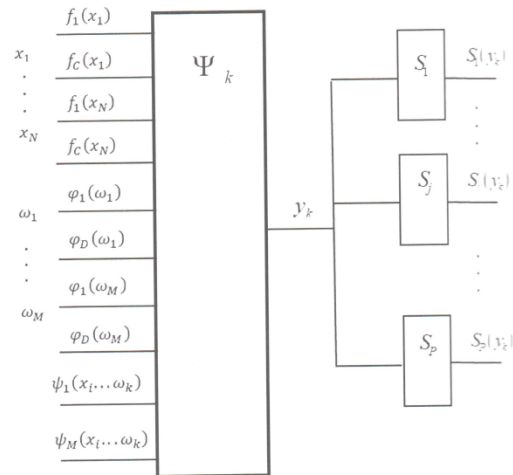


Рис. 3. Модель базового элемента принятия решений по оценке состояния наблюдаемого объекта

Сравнительный анализ вибрационных характеристик пуска-выбега

Промышленная эксплуатация систем непрерывного вибрационного контроля и мониторинга позволяет получить вибрационные характеристики пусков и выбегов за длительный временной интервал, месяцы и годы. На этапе предварительной обработки проводится их нормализация. Специалист в области вибрационной диагностики, проводя визуальный анализ этих характеристик, может сделать выводы об изменении технического состояния механизма. Но, вместе с тем, актуальной является задача автоматизации процессов такого анализа.

При сопоставлении характеристик (функций) выбега одна из функций принимается за базовую, а вторая – за сравниваемую.

Для любой характеристики выбега, рассматривая ее либо как обычную функциональную зависимость, либо как функцию плотности вероятностей, можно определить ряд параметров, каждый из которых отражает какие-то ее свойства. Чтобы снизить влияние случайных искажающих факторов, которые имеют место при определении характеристики выбега, ее можно представить в виде аппроксимирующего разложения (1) по некоторому количеству, 12-20 гармонических составляющих, а затем по аппроксимирующей функции вычислить информативные параметры.

Исходными данными для системы принятия решения о подобию вибрационных характеристик пуска-выбега являются массивы $RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})$ и $RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})$, содержащие значения размаха виброперемещения подшипниковой опоры, вычисленных при изменении частоты вращения вала через фиксированное значение оборотов в минуту полученные в моменты времени i и j .

Использованы следующие функции первичной обработки для вычисления параметров, используемых далее в решающих функциях [6, 10].

Функции $\varphi_{1,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{1,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$ предназначены для вычисления постоянных составляющих сравниваемых характеристик, формула (2).

Функции $\varphi_{2,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{2,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$ предназначены для вычисления максимумов размаха виброперемещения сравниваемых характеристик.

$$R_{max} = \max(A(k)), k = IN \dots IK. \quad (6)$$

Одновременно фиксируется индекс $J_{R_{max}}$ массива данных A , соответствующий R_{max} .

Функции $\varphi_{3,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{3,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$ предназначены для вычисления частот вращения вала, соответствующих максимумам размаха виброперемещения сравниваемых характеристик.

$$\Omega_{R_{max}} = \Omega_{A(IN)} + J_{R_{max}} \cdot \Delta\Omega, \quad (7)$$

где $\Omega_{A(IN)}$ – частота вращения вала, соответствующая начальной точке массива данных; $\Delta\Omega$ – шаг изменения частоты вращения вала от точки к точке.

Функции $\varphi_{4,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{4,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$ предназначены для вычисления коэффициентов амплитуд сравниваемых характеристик.

$$K_A = \frac{R_{max} - A_0}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{IK-IN+1} A_i^2}{2}}} \quad (8)$$

Функции $\varphi_{5,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{5,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$ предназначены для вычисления средневзвешенных частот вращения вала сравниваемых характеристик:

$$\Omega_{cp} = \Omega_{A(IN)} + \sum_{i=0}^{IK-IN} i \cdot \Delta\Omega \cdot p_i, \quad (9)$$

$$\text{где } p_i = \frac{A(i)}{\sum_{i=IN}^{IK} A(i)}$$

Функции $\varphi_{6,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{6,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$; $\varphi_{7,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{7,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$; $\varphi_{8,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{8,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$; $\varphi_{9,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{9,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$

предназначены для вычисления, соответственно, первых, вторых, третьих и четвертых начальных моментов сравниваемых характеристик:

$$\alpha_s[\Omega] = \sum_{i=0}^{IK-IN} (\Omega_{A(IN)} + i \cdot \Delta\Omega)^s \cdot p_i, \quad (10)$$

где s – номер момента.

Функции $\varphi_{10,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{10,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$; $\varphi_{11,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{11,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$; $\varphi_{12,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{12,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$; $\varphi_{13,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{13,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$ предназначены для вычисления, соответственно, первых, вторых, третьих, четвертых центральных моментов сравниваемых характеристик:

$$\mu_s[\Omega] = \sum_{i=0}^{IK-IN} (\Omega_{A(IN)} + i \cdot \Delta\Omega - \alpha_1[\Omega])^s \cdot p_i. \quad (11)$$

Функции $\varphi_{14,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{14,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$ предназначены для вычисления средних квадратических отклонений частоты вращения вала от средневзвешенных частот сравниваемых характеристик:

$$\sigma = \sqrt{\mu_2[\Omega]}. \quad (12)$$

Функции $\varphi_{15,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{15,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$ предназначены для вычисления коэффициентов асимметрии сравниваемых характеристик:

$$Sk = \frac{\mu_3[\Omega]}{\sigma^3}. \quad (13)$$

Функции $\varphi_{16,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{16,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$ предназначены для вычисления коэффициентов островершинности сравниваемых характеристик:

$$\varepsilon_{\Omega} = \frac{\mu_4[\Omega]}{\sigma^4} - 3. \quad (14)$$

Функции $\varphi_{17,i}[RC_i(x_0, \dots, x_{N-1})]$, $\varphi_{17,j}[RC_j(x_0, \dots, x_{N-1})]$ предназначены для вычисления количества экстремумов сравниваемых характеристик.

Локальные максимумы и минимумы находятся с помощью первой

$$A'_0(IN+k) = \sum_{j=1}^k (-j) \cdot A_j \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot j \cdot k}{N} - \varphi_j\right), \quad (15)$$

и второй

$$A'_0(IN+k) = \sum_{j=1}^k (-j^2) \cdot A_j \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot j \cdot k}{N} - \varphi_j\right), \quad (16)$$

производных аппроксимирующей характеристики выбега. Здесь k изменяется от 0 до $N-1$.

Характеристика выбега, представленная массивом данных $A_0(k)$, $k = IN \dots IK$, будет иметь локальный максимум в том случае, если выполняются следующие условия:

$$A'_0(i) \geq 0; A'_0(i+1) < 0; A''_0(i+1) < 0. \quad (17)$$

Частота вращения вала, соответствующая этому локальному максимуму, будет равна:

$$\Omega_{\max,i} = \Omega_{A(iN)} + (i+1) \Delta\Omega - \frac{A'_0(i+1)}{A'_0(i+1) - A'_0(i)} \cdot \Delta\Omega, \quad (18)$$

а амплитуда

$$A_{a,\max,i} = A_0 + \sum_{j=1}^L A_j \cdot \cos(2\pi \cdot j \cdot p - \varphi), \quad (19)$$

$$\text{где } p = \frac{\Omega_{\max,i} - \Omega_{A(iN)}}{\Omega_{A(iN)} - \Omega_{A((i+1)N)}}.$$

Функции $\varphi_{18,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{18,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{20,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{20,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{22,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{22,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$ предназначены для вычисления частот, соответственно, первых, вторых и третьих максимумов сравниваемых характеристик.

Функции $\varphi_{19,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{19,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{21,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{21,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{23,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{23,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$ предназначены для вычисления амплитуд, соответственно, первых, вторых и третьих максимумов сравниваемых характеристик.

Характеристика выбега, представленная массивом данных $A_a(k) \cdot k = IN/K$, будет иметь локальный минимум в том случае, если выполняются следующие условия:

$$A'_0(i) \leq 0; A'_0(i+1) > 0; A''_0(i+1) > 0. \quad (20)$$

Частота вращения вала, соответствующая этому локальному минимуму, будет равна:

$$\Omega_{\min,i} = \Omega_{A(iN)} + i\Delta\Omega + \frac{A'_0(i)}{A'_0(i) - A'_0(i+1)} \cdot \Delta\Omega, \quad (21)$$

а амплитуда

$$A_{a,\min,i} = A_0 + \sum_{j=1}^L A_j \cdot \cos(2\pi \cdot j \cdot p - \varphi), \quad (22)$$

$$\text{где } p = \frac{\Omega_{\min,i} - \Omega_{A(iN)}}{\Omega_{A(iN)} - \Omega_{A((i+1)N)}}.$$

Функции $\varphi_{24,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{24,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{26,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{26,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$ предназначены для вычисления частот первых и вторых минимумов сравниваемых характеристик.

Функции $\varphi_{25,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{25,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{27,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{27,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$ предназначены для вычисления амплитуд первых и вторых минимумов сравниваемых характеристик.

Функции $\varphi_{28,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{28,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{30,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{30,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{32,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{32,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{34,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{34,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{36,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{36,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{38,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{38,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$

$\varphi_{38,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{40,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{40,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{42,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{42,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$ предназначены для вычисления амплитуд, соответственно первой, второй, третьей, четвертой, пятой, шестой, седьмой и восьмой аппроксимирующих спектральных составляющих сравниваемых характеристик.

Функции $\varphi_{29,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{29,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{31,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{31,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{33,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{33,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{35,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{35,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{37,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{37,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{39,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{39,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{41,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{41,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$; $\varphi_{43,i} [RC_i (X_0 \dots X_{N-1})]$, $\varphi_{43,j} [RC_j (X_0 \dots X_{N-1})]$ предназначены для вычисления фаз, соответственно первой, второй, третьей, четвертой, пятой, шестой, седьмой и восьмой аппроксимирующих спектральных составляющих сравниваемых характеристик.

Амплитуды и фазы спектральных составляющих вычисляются по формулам (3)–(5).

Обобщающие функции первого уровня выполняют алгебраические действия над параметрами, вычисленными функциями $\varphi_i()$. Их выходное значение определяется в соответствии с выражением:

$$FR(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq X_1; \\ 0,25, & \text{если } X_1 < x \leq X_2; \\ 0,5, & \text{если } X_2 < x \leq X_3; \\ 0,75, & \text{если } X_3 < x \leq X_4; \\ 1, & \text{если } X_4 < x; \end{cases} \quad (23)$$

где x – параметр, относительно которого определяется значение решающей функции; X_j значения пороговых уровней, причем $X_1 < X_2 < X_3 < X_4$.

Количественные значения пороговых уровней выбираются на основе экспертных оценок и результатов экспериментальных исследований.

Применение решающей функции (23) к параметру r позволяет сделать смысловые выводы о степени подобию сравниваемых характеристик.

Если $FR(r) < 0,25$, то следует вывод – «очень похожи», если $0,25 \leq FR(r) < 0,5$, то – «похожи, но есть и отличия», если $0,5 \leq FR(r) < 0,75$, то – «существенно отличаются», если $0,75 \leq FR(r) < 1$, то – «сильно отличаются», если $1 \leq FR(r)$, то – «совершенно не похожи».

Предлагаются следующие обобщающие функции первого уровня.

$Y_{1,1} = \Psi_1\{\varphi_{18,i} [RC_i 0]; \varphi_{20,i} [RC_i 0]; \varphi_{22,i} [RC_i 0]; \varphi_{18,j} [RC_j 0]; \varphi_{20,j} [RC_j 0]; \varphi_{22,j} [RC_j 0]\}$ учитывает отклонение частот трех основных максимумов.

$Y_{1,2} = \Psi_2\{\varphi_{19,i} [RC_i 0]; \varphi_{21,i} [RC_i 0]; \varphi_{23,i} [RC_i 0]; \varphi_{19,j} [RC_j 0]; \varphi_{21,j} [RC_j 0]; \varphi_{23,j} [RC_j 0]\}$ учитывает отклонение амплитуд трех основных максимумов.

$y_{1,3} = \Psi_3(\varphi_{28,i} [RC_i, 0]; \varphi_{30,i} [RC_i, 0]; \varphi_{32,i} [RC_i, 0]; \varphi_{34,i} [RC_i, 0]; \varphi_{28,j} [RC_j, 0]; \varphi_{30,j} [RC_j, 0]; \varphi_{32,j} [RC_j, 0]; \varphi_{34,j} [RC_j, 0])$ учитывает отклонение амплитуд четырех первых гармоник, аппроксимирующих характеристики выбега.

$y_{1,4} = \Psi_4(\varphi_{29,i} [RC_i, 0]; \varphi_{31,i} [RC_i, 0]; \varphi_{33,i} [RC_i, 0]; \varphi_{35,i} [RC_i, 0]; \varphi_{29,j} [RC_j, 0]; \varphi_{31,j} [RC_j, 0]; \varphi_{33,j} [RC_j, 0]; \varphi_{35,j} [RC_j, 0])$ учитывает отклонение начальных фаз четырех первых гармоник, аппроксимирующих функции выбега.

$y_{1,5} = \Psi_5(\varphi_{4,i} [RC_i, 0]; \varphi_{15,i} [RC_i, 0]; \varphi_{16,i} [RC_i, 0]; \varphi_{4,j} [RC_j, 0]; \varphi_{15,j} [RC_j, 0]; \varphi_{16,j} [RC_j, 0])$ учитывает расхождение параметров формы для сравниваемых характеристик выбега.

$y_{1,6} = \Psi_6(\varphi_{1,i} [RC_i, 0]; \varphi_{1,j} [RC_j, 0])$ учитывает разность постоянных составляющих для сравниваемых характеристик выбега.

$y_{1,7} = \Psi_7(\varphi_{18,i} [RC_i, 0]; \varphi_{18,j} [RC_j, 0])$ учитывает отклонение частоты максимумов сравниваемых характеристик выбега.

$y_{1,8} = \Psi_8(\varphi_{19,i} [RC_i, 0]; \varphi_{19,j} [RC_j, 0])$ учитывает отклонение амплитуды максимумов сравниваемых характеристик выбега.

$y_{1,9} = \Psi_9 [RC_i, 0; RC_j, 0])$ учитывает расстояние между сравниваемыми характеристиками выбега.

Обобщающие функции второго уровня имеют вид.

$y_{2,1} = \Psi_{2,1}(y_{1,1}, y_{1,4}, y_{1,5}, y_{1,7})$ учитывает расхождение формы кривых сравниваемых характеристик выбега.

$y_{2,2} = \Psi_{2,2}(y_{1,2}, y_{1,3}, y_{1,8})$ учитывает несоответствие амплитуд сравниваемых характеристик выбега.

$y_{2,3} = \Psi_{2,3}(y_{1,2}, y_{1,2}, y_{1,3}, y_{1,4}, y_{1,5}, y_{1,6}, y_{1,7}, y_{1,9})$ учитывает параметры формы и параметры амплитуды сравниваемых характеристик выбега.

С учетом экспертных оценок выбраны пороговые уровни (см. Табл. 1) по отдельным параметрам или группам параметров для решающих функций (23), вычисляемых при сравнении характеристик пуска-выбега [6].

Предложенный подход сравнительного анализа вибрационных характеристик пуска-выбега реализован программно и апробирован в ряде практических ситуаций.

Пример сравнительного анализа

Сравниваются вибрационные характеристики выбега для подшипниковой опоры турбоагрегата мощностью 250 МВт, полученные в ходе пуско-наладочных работ, выполняемых после капитального ремонта, с временным интервалом примерно 30-40 минут.

На рис. 4 представлены характеристики выбега для подшипниковой опоры турбоагрегата (темно-синим цветом показаны графики первого выбега, черным – второго, светло-синим – третьего).

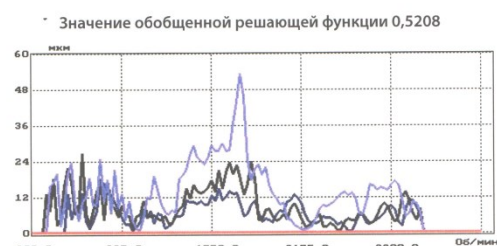


Рис. 4. Вибрационные характеристики выбега для подшипниковой опоры турбоагрегата

Результат сравнительного анализа между первой (базовой) и второй характеристиками выбега для подшипниковой опоры, сформулированный разработанной программой [11] выглядит следующим образом:

Критерий – относительное расстояние между функциями: базовая и текущая характеристики имеют достаточно существенные отличия.

Обобщенная решающая функция: базовая и текущая характеристики имеют достаточно существенные отличия, потому что, формы базовой и текущей характеристик

Таблица 1. Значения пороговых уровней для решающих функций

Наименование параметра	X1	X2	X3	X4
Расстояние по Манхэттену между функциями	0,12	0,22	0,3	0,45
Отклонение амплитуд на частотах максимумов	0,12	0,22	0,3	0,45
Отклонение частоты максимумов, об/мин	70	140	210	270
Отклонение коэффициента амплитуды	0,5	1,0	1,5	2,0
Отклонение коэффициента асимметрии	0,12	0,25	0,35	0,5
Отклонение коэффициента острровершинности	0,15	0,3	0,45	0,6
Отклонение амплитуд спектральных составляющих	0,2	0,35	0,5	0,65
Отклонение фаз спектральных составляющих, град.	30	50	70	90

имеют существенные отличия, а амплитудные параметры базовой и текущей характеристик немного отличаются.

Значение общей РФ по форме – 0,5714.

Значение общей РФ по амплитуде – 0,4635.

Значение решающей функции расстояния – 0,5.

При сравнении первой и третьей характеристик той же опоры заключение имеет следующий вид:

Критерий – относительное расстояние между функциями: базовая и текущая характеристики очень сильно отличаются.

Обобщенная решающая функция: базовая и текущая характеристики имеют большие отличия.

При этом формы базовой и текущей характеристик имеют существенные отличия, а амплитудные параметры базовой и текущей характеристик сильно отличаются.

Значение общей РФ по форме – 0,625.

Значение общей РФ по амплитуде – 0,9688.

Значение решающей функции расстояния – 1,0.

Значение обобщенной решающей функции – 0,8125.

В рассмотренном случае только выявленные отклонения в вибрационных характеристиках выбега позволили обнаружить аномальное состояние в работе турбоагрегата, так как показания вибрации в номинальном режиме не имели заметных отличий и находились в заведомо допустимых диапазонах. Последующий углубленный анализ технического состояния турбоагрегата, выполненный специалистами в области вибрационной диагностики, позволил выяснить причину дефекта и устранить его.

Заключение

Программные средства, использующие в своей работе информативные признаки и решающие функции, позволяют автоматизировать процедуру сравнительного анализа вибрационных характеристик пуска-выбега и синтезируют заключение о степени отличия сравниваемых характеристик, которое позволяет обратить внимание специалистов на возможность развития дефектов.

Литература

1. Бранцевич П.Ю. Применение вибрационных характеристик выбега для оценки технического состояния турбоагрегатов. // Энергетика и ТЭК. – 2009. – № 12 (81). – С. 20-23.
2. Бранцевич П.Ю., Базылев Е.Н. Анализ вибрационных характеристик пусков и выбегов при оценке изменения вибрационного состояния турбоагрегатов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 1. – с. 32-43.
3. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / Ф. Р. Балицкий [и др]. – Москва: Машиностроение, 2005. – Т. 7: Книга 2. Вибродиагностика. – 485 с.
4. Bently D.E., Hatch C.N., Grissom B. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics. – Canada: Bently pressurized bearing company, 2002. – 726 p.
5. Бранцевич П.Ю. Анализ вибрационного состояния механизмов и агрегатов с использованием вибрационных характеристик пусков и выбегов // Актуальные вопросы машиноведения. – 2015. – Вып. 4. – С. 270-275.
6. Бранцевич П. Ю. Оценка технического состояния механизмов с вращательным движением на основе анализа вибрационных характеристик пусков и выбегов / П. Ю. Бранцевич. – Минск: Четыре четверти, 2021. – 236 с.
7. Brancevich, P., Li Y. Model of the decision-making system for assessment of the state of technical objects. // 28th International Congress on Sound and Vibration 2022 (ICSV28). – NY, USA: Curran Associates, Inc., 2023. – P. 1986-1992.
8. Brancevich P, Miao X., Li Y. Organization of the vibration-based monitoring and diagnostics system for complex mechanical system // 20-th International Congress on Sound and Vibration 2013 (ICSV 20). – NY, USA, Curran Associates, Inc., 2014. – Vol. 1. – P.612–619.
9. Бранцевич П.Ю. Принятие решений в задачах, связанных с обработкой вибрационных сигналов // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. научных статей VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Минск: Бестпринт, 2022. – С. 440-449.
10. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – Москва: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1988. – 480 с.
11. Бранцевич П.Ю. Сравнительный анализ амплитудно и фазочастотных вибрационных характеристик // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 5-й междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 210–212.

Дата поступления 18.09.2024.