

МЕТОДОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЗЛОВ НА ЗАВОДАХ-ИЗГОТОВИТЕЛЯХ

Abstract: In the article the methodology of quality control of manufacturing of units of electromechanical systems at plants-manufacturers based on methods of digital processing of a signal and the theory of a pattern recognition, including techniques of a classification, identification of pattern of classes, goal formation, recognition, and also rule decision making is offered. For offered methods the outcomes of numerical research are resulted.

Key words: a methodology of quality control of manufacturing of units, discrete transformation the Fourier, discrete wavelet-transformation, vibroacoustic signal, pattern recognition, identification of parameters pattern of classes.

Анотація: У статті запропонована методологія контролю якості виготовлення вузлів електромеханічних систем на заводах-виготовлювачах, заснована на методах цифрової обробки сигналу й теорії розпізнавання образів, що включає в себе методики класифікації, ідентифікації еталонів класів, цілеутворення, розпізнавання, а також правила прийняття рішень. Для запропонованих методик приводяться результати чисельного дослідження.

Ключові слова: методологія контролю якості виготовлення вузлів, дискретне перетворення Фур'є, дискретне вейвлет-перетворення, віброакустичний сигнал, розпізнавання образів, ідентифікація параметрів еталоном класів.

Аннотация: В статье предложена методология контроля качества изготовления узлов электромеханических систем на заводах-изготовителях, основанная на методах цифровой обработки сигнала и теории распознавания образов, включающая в себя методики классификации, идентификации эталонов классов, целеобразования, распознавания, а также правила принятия решений. Для предложенных методик приводятся результаты численного исследования.

Ключевые слова: методология контроля качества изготовления узлов, дискретное преобразование Фурье, дискретное вейвлет-преобразование, виброакустический сигнал, распознавание образов, идентификация параметров эталоном классов.

1. Введение

Актуальность. В настоящее время актуальной является разработка интеллектуальных систем, предназначенных для идентификации дефектов узлов электромеханических систем на заводах-изготовителях.

Состояние вопроса. В литературе приведены системы обнаружения неисправностей, выделяющие только определенные дефекты [1–2]. Кроме того, эти методы часто обладают высокой вычислительной сложностью и требуют дорогостоящего оборудования.

Постановка задачи. Для повышения надежности обнаружения неисправностей необходимо предложить методологию контроля качества изготовления узлов.

Основная часть. В статье рассматриваются:

- структура методологии контроля качества изготовления узлов;
- методика классификации;
- методики идентификации эталонов классов;
- методика целеобразования;
- методика распознавания;
- правила принятия решений;
- количественный анализ предложенной методологии.

2. Структура методологии контроля качества изготовления узлов

На рис. 1 представлена структура методологии контроля качества изготовления узлов.

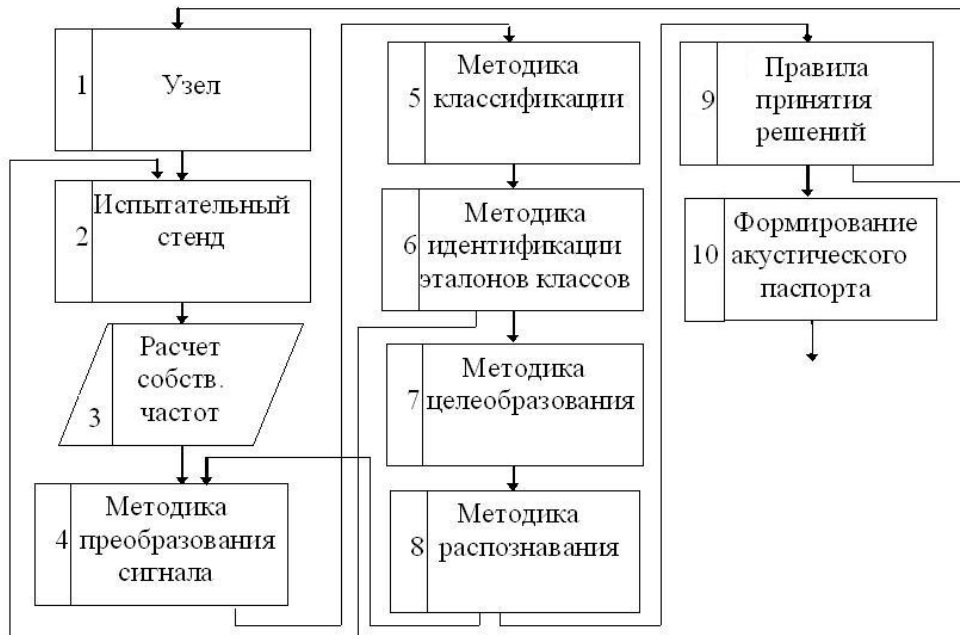


Рис. 1. Методология контроля качества изготовления узлов

3. Расчет собственных частот элементов узлов (блок 3)

1. Задание характеристик элементов узлов:

β_1 – частота вращения рабочего органа (об/мин);

β_2 – угол контакта тел вращения с подшипником (градус);

β_3 – посадочный размер наружного кольца (мм);

β_4 – посадочный размер внутреннего кольца (мм);

β_5 – диаметр тела качения (мм);

β_6 – количество тел качения;

β_7 – количество зубьев;

β_8 – количество лопастей.

2. Расчет собственной частоты вращения рабочего органа f_1 [3]:

$$f_1 = \beta_1 / 60. \quad (1)$$

3. Расчет собственной частоты вращения сепаратора относительно наружного кольца f_2 [3]:

$$f_2 = \frac{f_1}{2} \left(1 - \frac{\beta_5}{D_0} \cos \varphi \right), \quad \varphi = \beta_2 \frac{\pi}{180^\circ}, \quad D_0 = \frac{\beta_3 + \beta_4}{2}; \quad (2)$$

4. Расчет собственной частоты вращения сепаратора относительно внутреннего кольца f_3 [3]:

$$f_3 = \frac{f_1}{2} \left(1 + \frac{\beta_5}{D_0} \cos \varphi \right), \quad \varphi = \beta_2 \frac{\pi}{180^\circ}, \quad D_0 = \frac{\beta_3 + \beta_4}{2}. \quad (3)$$

5. Расчет собственной частоты вращения тел качения вокруг своей оси f_6 [3]:

$$f_6 = \frac{f_1 D_0}{2 \beta_5} \left(1 - \frac{\beta_5^2}{D_0^2} \cos^2 \varphi \right), \quad \varphi = \beta_2 \frac{\pi}{180^\circ}, \quad D_0 = \frac{\beta_3 + \beta_4}{2}. \quad (4)$$

6. Расчет собственной частоты редукторов и зубчатых муфт [3]:

$$f_7 = f_1 \cdot \beta_7. \quad (5)$$

7. Расчет собственной частоты лопаточного аппарата [3]:

$$f_8 = f_1 \cdot \beta_8. \quad (6)$$

8. Расчет собственной частоты перекачивания тел качения по наружному кольцу f_4 [3]:

$$f_4 = f_2 \cdot \beta_6. \quad (7)$$

9. Расчет собственной частоты перекачивания тел качения по внутреннему кольцу f_5 [3]:

$$f_5 = f_3 \cdot \beta_6. \quad (8)$$

4. Методика преобразования виброакустического сигнала (блок 4)

1. Задание характеристик виброакустического датчика и звуковой карты:

$$\omega_1, \omega_2, \mu_1, \mu_2, S, R_n, R_m, R_{вн}, D \quad [4].$$

2. Преобразование виброакустических колебаний p в механические F (виброакустический датчик):

$$F = pS. \quad (9)$$

3. Преобразование механических колебаний F в электрические $U(\omega)$ (виброакустический датчик):

$$U(\omega) = \frac{F(\omega) R_n E(\omega)}{\omega R_m (R_{вн} + R_n) D}. \quad (10)$$

4. Первичное усиление электрического сигнала $U(\omega)$ (виброакустический датчик):

$$U_{\mu 1}(j\omega) = M_1(j\omega)U(j\omega), \quad M_1(j\omega) = \begin{cases} \mu_1, & \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2 \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (11)$$

5. Первичная фильтрация электрического сигнала $U_{\mu 1}(j\omega)$ (виброакустический датчик):

$$U_f(j\omega) = K_1(j\omega)U_{\mu 1}(j\omega), \quad K_1(j\omega) = \begin{cases} 1, & \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (12)$$

6. Вторичное усиление электрического сигнала $U(\omega)$ (звуковая карта):

$$U_{\mu 2}(j\omega) = M_2(j\omega)U_f(j\omega), \quad M_2(j\omega) = \begin{cases} \mu_2, & \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2 \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (13)$$

7. Вторичная фильтрация электрического сигнала $U_{\mu 1}(j\omega)$ (звуковая карта):

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} U_{\mu 2}(j\omega) K_2(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad K_2(j\omega) = \begin{cases} 1, & \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (14)$$

8. Преобразование аналогового сигнала $y(t)$ в дискретный $x(n)$ (звуковая карта):

$$y_M(t) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n\Delta t) \delta(t - n\Delta t), \quad s(t) = y_M(t) + q(t), \quad x(n\Delta t) = \sum_{k=0}^n g(k\Delta t) s((n-k)\Delta t). \quad (15)$$

5. Методика классификации элементов узла (блок 5)

$\Omega 1_i = \{\omega_{ij}\}$ – i -й класс объектов (узлов), $j \in \overline{1, J_i}$, $i \in \overline{1, 4}$, i – номер класса узла, j – подкласс различных конструкций узлов i -го класса, J_i – количество подклассов для i -й класса

$$i = \begin{cases} 1, & \text{подшипник качения} \\ 2, & \text{подшипник скольжения} \\ 3, & \text{редуктор / зубчатая муфта} \\ 4, & \text{лопаточный аппарат} \end{cases}$$

$$\omega_{ij} \leftrightarrow E_{ij}, \quad j \in \overline{1, J_i}, \quad i \in \overline{1, 4};$$

$$E_{ij} = (e_1, \dots, e_N, e_{N+1}, \dots, e_{2N}) \text{ – эталон узла;} \quad (16)$$

e_k , $k \in \overline{1, N}$ – математические ожидания значений диагностических признаков (информативных частот) узлов;

e_k , $k \in \overline{N+1, 2N}$ – среднеквадратические ожидания значений диагностических признаков (информативных частот) узлов;

N – количество признаков.

6. Методика идентификации эталонов классов на стадии испытаний (блок 6)

1. Формирование множества собственных частот K_{ij} и K_{ijt} для конкретного узла i -го класса j -го подкласса:

$$K_{1j} = \bigcup_{t=1}^4 K_{1jt}, \quad (17)$$

$$K_{1j1} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_1}{m} \right\}, K_{1j2} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_4}{m} \right\}, K_{1j3} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_5}{m} \right\}, K_{1j4} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_6}{m} \right\},$$

$$K_{2j} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_1}{m} \right\}, K_{3j} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_7}{m} \right\}, K_{4j} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_8}{m} \right\}, \quad l, m \in \mathfrak{N};$$

\mathfrak{N} – множество натуральных чисел;

l – номер гармоники ($m = 1$) или субгармоники ($m > 1$);

$$t \text{ – номер вида дефекта, } t = \begin{cases} 1, & \text{сборки узла} \\ 2, & \text{наружного кольца} \\ 3, & \text{внутреннего кольца} \\ 4, & \text{тел качения} \end{cases}$$

2. Вычисление спектра виброакустического сигнала $x^p(n)$ для каждой p -й реализации эксперимента на узлах посредством:

а) прямого дискретного преобразования Фурье (ДПФ):

$$X^p(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x^p(n) e^{-j(2\pi/N)nk}, \quad k \in \overline{0, N-1}, \quad (18)$$

$$A^{1p}(k) = |X^p(k)|, \quad k \in \overline{0, N-1}, \quad (19)$$

где N – длина сигнала;

б) дискретного вейвлет-преобразования (ДВП):

$$d_{lm} = a_0^{1/2} \sum_{n=0}^{N/2^{l-1}-1} c_{l-1,n} g_{n+2m}, \quad c_{lm} = a_0^{1/2} \sum_{n=0}^{N/2^{l-1}-1} c_{l-1,n} h_{n+2m}, \quad c_{0n} = x^p(n), \quad (20)$$

$$A^{2p}(k) = \begin{cases} c_{Lm}, & k = m \wedge m \in \overline{0, N/2^{L-1}-1} \\ d_{lm}, & k = N/2^l + m \wedge m \in \overline{0, N/2^{l-1}-1} \wedge l \in \overline{1, L} \end{cases}, \quad m \in \overline{0, N/2^{l-1}-1}, \quad (21)$$

где c_{lm}, d_{lm} – аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты ДВП;

L – количество уровней разложения.

3. Локализация максимумов в спектре $A^{sp}(k)$:

$$\widehat{A}^{sp}(k) = \begin{cases} A^{sp}(k), & A^{sp}(k-1) < A^{sp}(k) > A^{sp}(k+1) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (22)$$

4. Пороговые ограничения в спектре $\widehat{A}^{sp}(k)$:

$$\widetilde{A}^{sp}(k) = \begin{cases} \widehat{A}^{sp}(k), & \widehat{A}^{sp}(k) > T \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (23)$$

$$T = \frac{\sum_{k=0}^N \widehat{A}^{sp}(k)}{R} \text{ – порог,} \quad (24)$$

где R – количество частот с ненулевой амплитудой.

5. Центрирование сигнала на основе множества собственных частот K_{ij} и K_{ijt} :

$$\widetilde{\widetilde{A}}^{sp}(k) = \begin{cases} \widetilde{A}^{sp}(k), & \widetilde{A}^{sp}(k) > 0 \wedge k \in K_{ij} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (25)$$

$$\widetilde{\widetilde{A}}_t^{sp}(k) = \begin{cases} \widetilde{\widetilde{A}}^{sp}(k), & \widetilde{\widetilde{A}}^{sp}(k) > 0 \wedge k \in K_{ijt} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (26)$$

6. Определение параметров эталонов E_{ij} и E_{ijt} :

$$\bar{A}^s(k) = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \widetilde{\widetilde{A}}^{sp}(k), \quad k \in \overline{1, N},$$

$$s^* = \arg \min_s \left(\sqrt{\sum_{k=1}^N (\widetilde{\widetilde{A}}^{sp}(k) - \bar{A}^s(k))^2} \right),$$

$$e_k = \bar{A}^{s*}(k), k \in \overline{1, N},$$

$$e_k = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (\tilde{A}^{s*p}(k))^2 - (\bar{A}^{s*}(k))^2}, k \in \overline{N+1, 2N},$$

$$E_{ij} = (e_1, \dots, e_N, e_{N+1}, \dots, e_{2N}), \quad (27)$$

где p – номер реализации, P – количество реализаций, s – номер системы признаков ($s=1$ – для ДПФ, $s=2$ – для ДВП).

$$\bar{A}_t^s(k) = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \tilde{A}_t^{sp}(k), s^* = \arg \min_s \left(\sqrt{\sum_{k=1}^N (\tilde{A}_t^{sp}(k) - \bar{A}_t^s(k))^2} \right), k \in \overline{1, N},$$

$$e_k = \bar{A}^{s*}(k), k \in \overline{1, N}.$$

$$e_k = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (\tilde{A}_t^{s*p}(k))^2 - (\bar{A}_t^{s*}(k))^2}, k \in \overline{N+1, 2N},$$

$$E_{ijt} = (e_1, \dots, e_N, e_{N+1}, \dots, e_{2N}). \quad (28)$$

7. Методика целеобразования (блок 7)

$$F1 = \psi1(\phi1(x), E_{ij}) \rightarrow \min_{E_{ij}}, \quad (29)$$

$$F1_t = \psi1(\phi1(x), E_{ijt}) \rightarrow \min_{E_{ijt}}, \quad (30)$$

где $\phi1(x)$ – функция определения вектора признаков на основе предложенных методик идентификации эталонов (блок 6, рис. 1);

$\psi1(\phi1(x), E_{ij}), \psi1(\phi1(x), E_{ijt})$ – функции определения меры близости полученного вектора признаков и эталонов (блок 8);

$x(n)$ – виброакустический входной сигнал;

E_{ij}, E_{ijt} – эталоны узлов.

8. Методики распознавания состояния узла при стендовых испытаниях (блок 8)

1. Вычисление спектра $A(k)$ виброакустического сигнала $x(n)$ посредством:

а) прямого дискретного преобразования Фурье (ДПФ):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j(2\pi/N)nk}, k \in \overline{0, N-1}, \quad (31)$$

$$A^1(k) = |X(k)|, k \in \overline{0, N-1}, \quad (32)$$

где N – длина сигнала;

б) дискретного вейвлет-преобразования (ДВП):

$$d_{lm} = a_0^{1/2} \sum_{n=0}^{N/2^{l-1}-1} c_{l-1,n} g_{n+2m}, \quad c_{lm} = a_0^{1/2} \sum_{n=0}^{N/2^{l-1}-1} c_{l-1,n} h_{n+2m}, \quad c_{0n} = x(n), \quad (33)$$

$$A^2(k) = \begin{cases} c_{Lm}, & k = m \wedge m \in \overline{0, N/2^{L-1}-1} \\ d_{lm}, & k = N/2^l + m \wedge m \in \overline{0, N/2^{l-1}-1} \wedge l \in \overline{1, L}, \quad m \in \overline{0, N/2^{l-1}-1}, \end{cases} \quad (34)$$

где c_{lm}, d_{lm} – аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты ДВП;

L – количество уровней разложения.

2. Локализация максимумов в спектре $A^s(k)$:

$$\hat{A}^s(k) = \begin{cases} A^s(k), & A^s(k-1) < A^s(k) > A^s(k+1) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (35)$$

3. Пороговые ограничения в спектре $\hat{A}^s(k)$:

$$\check{A}^s(k) = \begin{cases} \hat{A}^s(k), & \hat{A}^s(k) > T \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (36)$$

$$T = \frac{\sum_{k=0}^N \hat{A}^s(k)}{R} \quad \text{– порог,} \quad (37)$$

где R – количество частот с ненулевой амплитудой.

4. Центрирование сигнала на основе множества собственных частот K_{ij} и K_{ijt} :

$$\tilde{A}^s(k) = \begin{cases} \check{A}^s(k), & \check{A}^s(k) > 0 \wedge k \in K_{ij} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (38)$$

$$\tilde{A}_t^s(k) = \begin{cases} \check{A}^s(k), & \check{A}^s(k) > 0 \wedge k \in K_{ijt} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (39)$$

5. Сопоставление сигнала с эталонами E_{ij} и E_{ijt} :

$$F1 = \sqrt{\sum_{k=1}^N (\tilde{A}^s(k) - E_{ijk})^2} \rightarrow \min_{E_{ij}}, \quad (40)$$

$$F1_t = \sqrt{\sum_{k=1}^N (\tilde{A}_t^s(k) - E_{ijtk})^2} \rightarrow \min_{E_{ijt}}. \quad (41)$$

9. Правила принятия решений (блок 9)

1. Диагностика узлов:

а) подшипника качения:

$$i = 1 \wedge F1 < \varepsilon \rightarrow q = 1 \wedge \Pi_{ij} = E_{ij}, \quad (42)$$

$$i = 1 \wedge F1 > \varepsilon \rightarrow q = 0; \quad (43)$$

б) подшипника скольжения:

$$i = 2 \wedge F1 < \varepsilon \rightarrow q = 1 \wedge \Pi_{ij} = E_{ij}, \quad (44)$$

$$i = 2 \wedge F1 > \varepsilon \rightarrow q = 0; \quad (45)$$

в) редуктора / зубчатой муфты:

$$i = 3 \wedge F1 < \varepsilon \rightarrow q = 1 \wedge \Pi_{ij} = E_{ij}, \quad (46)$$

$$i = 3 \wedge F1 > \varepsilon \rightarrow q = 0; \quad (47)$$

г) лопаточного аппарата:

$$i = 4 \wedge F1 < \varepsilon \rightarrow q = 1 \wedge \Pi_{ij} = E_{ij}, \quad (48)$$

$$i = 4 \wedge F1 > \varepsilon \rightarrow q = 0. \quad (49)$$

2. Диагностика дефекта сборки узла:

$$i = 1 \wedge t = 1 \wedge F1_t < \varepsilon \rightarrow q_t = 1, \quad (50)$$

$$i = 1 \wedge t = 1 \wedge F1_t > \varepsilon \rightarrow q_t = 0. \quad (51)$$

3. Диагностика дефекта на наружном кольце:

$$i = 1 \wedge t = 2 \wedge F1_t < \varepsilon \rightarrow q_t = 1, \quad (52)$$

$$i = 1 \wedge t = 2 \wedge F1_t > \varepsilon \rightarrow q_t = 0. \quad (53)$$

4. Диагностика дефекта на внутреннем кольце:

$$i = 1 \wedge t = 3 \wedge F1_t < \varepsilon \rightarrow q_t = 1, \quad (54)$$

$$i = 1 \wedge t = 3 \wedge F1_t > \varepsilon \rightarrow q_t = 0. \quad (55)$$

5. Диагностика дефекта на телах качения:

$$i = 1 \wedge t = 4 \wedge F1_t < \varepsilon \rightarrow q_t = 1, \quad (56)$$

$$i = 1 \wedge t = 4 \wedge F1_t > \varepsilon \rightarrow q_t = 0, \quad (57)$$

где ε – пороговое значение, Π_{ij} – виброакустический паспорт для конкретного узла i -го класса j -го подкласса, q – состояние узла ($q = 1$ – узел исправен, $q = 0$ – узел не исправен), q_t – признак t -го дефекта ($q_t = 1$ – дефект отсутствует, $q_t = 0$ – дефект присутствует).

10. Численное исследование

Для проведения численного исследования предложенные методики и правила были программно реализованы. В качестве измерительных и регистрирующих средств использовались виброанализатор «Топаз» производства ООО «Диамех» (г. Москва, Россия) и пьезоэлектрический акселерометр типа ВИПРА 057.

Радиально-упорный подшипник качения ($i = 1$) с характеристиками $\beta_2 = 12^\circ$, $\beta_3 = 980$ мм, $\beta_4 = 600$ мм, $\beta_5 = 50$ мм, $\beta_6 = 85$ испытывался на машине с частотой вращения $\beta_1 = 600$ об/мин. Исследуемый частотный диапазон определен в виде $N = 200$ Гц. Акселерометр устанавливался на подшипнике в горизонтальном положении. На рис. 2–5 приведены исходный спектр

вибраакустического сигнала (рис. 2) с выделением строгих максимумов (рис. 3), с выделением строгих максимумов, превышающих порог (рис. 4), с выделением строгих максимумов, превышающих порог и соответствующих информативным частотам (рис. 5). Согласно рис. 5, амплитуды частот 10 Гц (f_1), 20 Гц ($2 \cdot f_1$), 30 Гц ($3 \cdot f_1$), 40 Гц ($4 \cdot f_1$), 60 Гц ($6 \cdot f_1$) значительно превышают значения соответствующих параметров эталона (1.12 мм/с). Отсюда $i = 1 \wedge t = 1 \wedge F1_t > \varepsilon$, где $\varepsilon = 0,1$ мм/с, и в соответствии с правилом (51) подшипник имеет дефект сборки и требует ремонта.

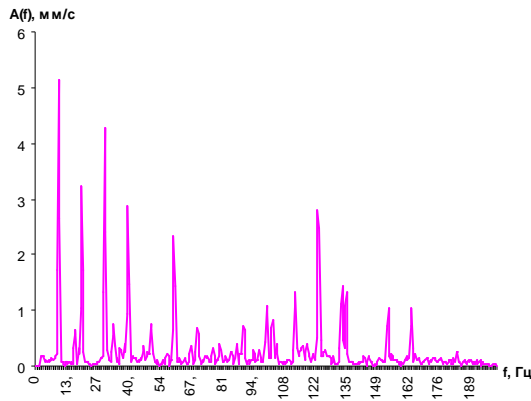


Рис. 2. Спектр сигнала

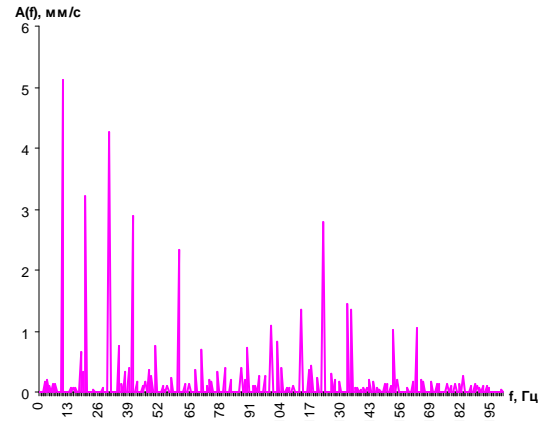


Рис. 3. Спектр сигнала с выделением строгих максимумов

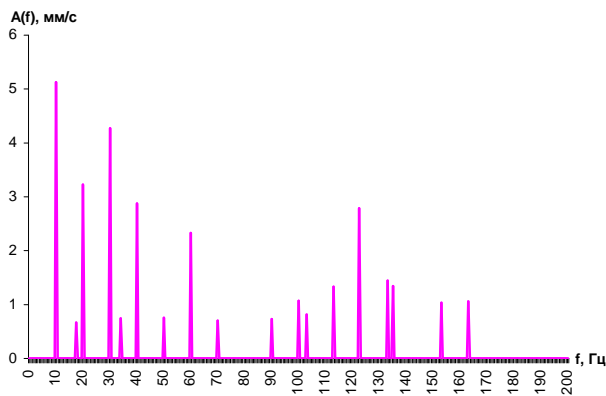


Рис. 4. Спектр сигнала с выделением строгих максимумов, превышающих порог

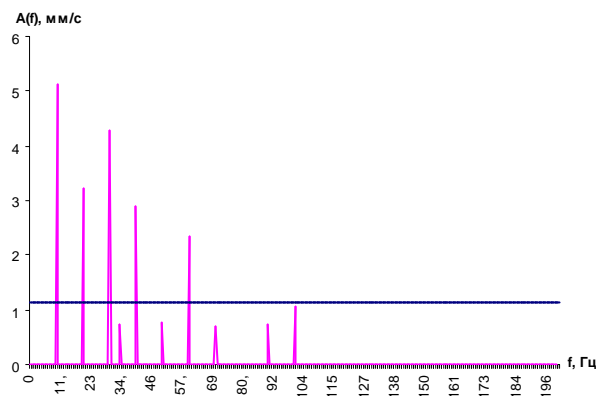


Рис. 5. Спектр сигнала с выделением строгих максимумов, превышающих порог и соответствующих информативным частотам

11. Выводы

Новизна. В статье была предложена методология контроля качества изготовления узлов на заводах-изготовителях, базирующаяся на методах цифровой обработки сигнала и теории распознавания образов. Предложенная методология для повышения вероятности распознавания

использует как преобразование Фурье, так и вейвлет-преобразование, а также применяет адаптивный порог для подавления шума.

Практическое значение. Основные положения данной работы предназначены для реализации в интеллектуальных системах диагностики неисправностей узлов электромеханических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные методы и средства виброакустического диагностирования машин и конструкций // Ф.Я. Балицкий, М.Д. Генкин, М.А. Иванова и др. / Под ред. акад. К.В. Фролова. – М., 1990. – 252 с.
2. Barkov A.V. Optimization of Monitoring and Diagnostics Methods for the Rotating Machines by Vibration and Noise Measurements // Proc. of the 4th International Congress on Sound and Vibration. – St. Petersburg, Russia, 1996. – Vol. 3. – P. 1573 – 1578.
3. Диментберг Ф.М., Колесников К.С. Вибрации в технике: Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – Т. 3. – 544 с.
4. Федоров Е.Е. Модели и методы преобразования речевых сигналов. – Донецк: Норд-Пресс, 2006. – 260 с.

Стаття надійшла до редакції 21.10.2008