

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ

ПОКАЗАТЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ МАШИН

**К.С. Иванов, кандидат технических наук, доцент;
А.В. Широухов;
Н.А. Мороз, кандидат технических наук.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Рассматриваются основы технического диагностирования спектра технических параметров механических узлов и агрегатов машин. Приведена классификация основных показателей диагностирования, влияющих на надежность, а также методика расчета показателей, обеспечивающих контролепригодность объектов.

Ключевые слова: техническое состояние, отказ, дефект, вероятность ошибки, контролепригодность, работоспособность объекта

INDICATORS OF DIAGNOSTICS OF TECHNICAL PARAMETERS OF UNITS AND AGGREGATES OF MACHINE

K.S. Ivanov; A.V. Shiroukhov; N.A. Moroz.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The article discusses the basics of technical diagnostics of technical parameters of spectrum of mechanical knots and units of cars. A classification of the main indicators of the diagnosis affecting the reliability and methods of calculation of indicators, ensuring the testability of objects.

Keywords: technical condition, failure, defect, error probability, testability, operability of the object

В настоящее время предъявляются высокие требования к узлам и агрегатам машин в области их надежности. Для того чтобы оценить надежность какого-либо объекта, необходимо знать его техническое состояние. Процесс определения с известной точностью технического состояния объекта считается техническим диагностированием. Результатом такого диагностирования должно быть заключение о техническом состоянии объекта с указанием, если это необходимо, места, вида и причины дефекта.

Совокупность средств, объекта и исполнителей, осуществляющих диагностирование, называется системой технического диагностирования. Правила, по которым должно осуществляться диагностирование, называют алгоритмом технического диагностирования.

Эффективность технического диагностирования определяется следующими показателями [1]:

1. Вероятностью ошибки диагностирования, под которой понимают вероятность P_{ij} совместного наступления двух событий: объект диагностирования находится в техническом состоянии i , а в результате диагностирования признано, что он находится в техническом состоянии j . Если $i = j$, то P_{ij} является вероятностью правильного определения технического состояния i объекта.

2. Апостериорной вероятностью ошибки диагностирования, которой называют P_{ij}^A нахождения объекта диагностирования в состоянии i при условии, что получен результат диагностирования, по которому объект находится в состоянии j . Если $i = j$, то P_{ij}^A является апостериорной вероятностью правильного определения технического состояния объекта.

3. Вероятностью правильного диагностирования, то есть полной вероятностью D того, что система диагностирования определяет то техническое состояние, в котором действительно находится объект диагностирования.

4. Средней оперативной продолжительностью диагностирования τ_d .

5. Средней стоимостью диагностирования C_d .

6. Средней оперативной трудоемкостью диагностирования S_d .

7. Глубиной поиска дефекта, то есть указанием составных частей объекта или их участков, с точностью до которых определяется место дефекта.

Следует сразу объяснить, что далеко не все машины, аппараты или приборы, выпускаемые промышленностью, могут быть подвергнуты диагностированию. Для осуществления диагностирования необходимо, чтобы контролируемый объект был контролепригодным.

Под контролепригодностью понимают программно-аппаратурную приспособленность объекта к техническому диагностированию в процессе его производства, эксплуатации и ремонта в соответствии с заданными требованиями к эффективности диагностирования, а также взаимную согласованность характеристик изделий, методов диагностирования и характеристик средств диагностирования. Контролепригодность изделий должна обеспечиваться на стадиях разработки и их изготовления.

Контролепригодность изделий характеризуется следующими показателями:

- коэффициентом полноты проверки исправности;
- коэффициентом глубины поиска дефекта;
- длиной теста диагностирования;
- средним временем подготовки объекта к диагностированию заданным числом специалистов;
- средней трудоемкостью подготовки изделий к диагностированию;
- коэффициентом избыточности объекта, то есть относительной массой или объемом составных частей объекта, не участвующих в диагностировании;
- коэффициентом унификации устройств сопряжения объекта со средствами диагностирования;
- коэффициентом трудоемкости подготовки объекта к диагностированию;
- коэффициентом использования специальных средств диагностирования;
- уровнем контролепригодности при дифференциальных и комплексных оценках.

Результат диагностирования зависит не только от состояния объекта, но и от требований, предъявляемых объекту при диагностировании, а они определяются назначением объекта. Поэтому при диагностировании, прежде всего, необходимо выявить диагностические параметры, по значениям которых должен определяться или оцениваться результат диагностирования. Таких параметров может быть произвольное количество, однако необходимо учитывать, что с увеличением количества диагностических параметров возрастают трудоемкость диагностирования и сложность средств диагностирования. Поэтому обычно число параметров диагностирования выбирают от двух до шести.

Обычно выбор диагностических параметров представляет значительную трудность. Во-первых, желательно использовать комплексные параметры, так как контроль одного или двух таких параметров позволяет судить о функциональности объекта. Однако для большинства объектов такие параметры еще не выявлены, и для их выявления необходимо проводить исследовательскую работу. Во-вторых, контроль даже всех параметров, регламентированных в технических условиях на объект диагностирования, обычно не позволяет с полной достоверностью судить о функциональности объекта, и необходимо вводить дополнительные параметры.

В качестве примера можно привести диагностирование подшипников качения. На них ГОСТом установлен ряд параметров: осевой зазор, биения, геометрические размеры. Однако их контроль не обеспечивает достоверного диагностирования, и поэтому на протяжении многих лет изыскиваются комплексные параметры, которые более полно позволяли бы проводить диагностирование подшипников.

После выбора диагностических параметров необходимо установить их номинальные значения для объекта исследования и их допустимые предельные значения.

При диагностировании необходимо также учитывать погрешности измерения диагностических параметров, так как при увеличении этих погрешностей возрастает вероятность ошибки диагностирования.

Результат диагностирования зависит от погрешностей средств диагностирования, а вероятность ошибки диагностирования зависит от вероятностей появления различных технических состояний объекта диагностирования. Поэтому для проведения расчета показателей диагностирования необходимо знать вероятность появления тех или иных технических состояний и среднюю стоимость диагностирования.

Вероятность ошибки диагностирования P_{ij} определяется по формуле [2]:

$$P_{ij} = P_i^0 \sum_{l=1}^k P_l^c P_{jli}^y = \sum_{l=1}^k P_l^c P_{jl}^a P_{ijl}^b,$$

где k – число технических состояний средства диагностирования; P_i^0 – априорная вероятность нахождения объекта диагностирования в состоянии i ; P_{ijl}^y – условная вероятность того, что в результате диагностирования объект будет признан находящимся в состоянии j при условии, что он находится в состоянии i и средство диагностирования находится в состоянии l ; P_{jl}^a – условная вероятность получения результата «объект диагностирования находится в состоянии j » при условии, что средства диагностирования находятся в состоянии l ; P_{ijl}^b – условная вероятность нахождения объекта в состоянии i , при условии, что получен результат «объект диагностирования находится в состоянии j » и средство диагностирования находится в состоянии l .

Оценку вероятности ошибки диагностирования вычисляют по формуле:

$$\hat{P}_{ij} = P_i^0 \sum_{l=1}^k P_l^c \frac{r_{jli}}{N_{li}},$$

где N_{li} – общее число операций диагностирования объекта, находящегося в состоянии i , средством диагностирования, находящимся в состоянии l ; r_{jli} – число испытаний, при

которых система диагностирования зафиксировала состояние j . Вероятности P_i^0 и P_i^c определяются методами теории надежности.

Если состояние объекта диагностирования определяется совокупностью n независимых диагностических параметров и средство диагностирования определяет 2^n состояния объекта, то вероятность P_{ij} вычисляют по формуле:

$$P_{ij} = P_i^0 \sum_{l=1}^k P_l^c \prod_{v=1}^n f_{ijvl}, \quad (1)$$

где $f_{ijvl} = P_v - a_{vl}$, если в состоянии i и j объекта диагностический параметр v находится в поле допуска при условии, что средство диагностирования находится в состоянии l ; $f_{ijvl} = a_{vl}$, если в состоянии i объекта диагностический параметр v находится в поле допуска, а в состоянии j он выходит за пределы поля допуска; $f_{ijvl} = \beta_{vl}$, если в состоянии i объекта v находится вне поля допуска, а в состоянии j этот параметр входит в поле допуска; $f_{ijvl} = 1 - P_v - \beta_{vl}$, если в состояниях i или j параметр v находится вне поля допуска; P_v – априорная вероятность нахождения параметра v в пределах поля допуска; a_{vl} – вероятность совместного наступления двух событий; β_{vl} – вероятность совместного наступления двух событий, параметр v находится вне поля допуска, а считается, что находится в его пределах.

Для систем диагностирования, предназначенных только для проверки работоспособности объекта, возможны два состояния: объект работоспособен и объект неработоспособен: $m = 2$. При этом значения индексов i и j соответствуют следующим состояниям объекта: $i = 1$ – работоспособное и $i = 2$ – неработоспособное. Для такой системы возможны два вида ошибок: $i = 1, j = 2$, то есть объект неработоспособен, а признан работоспособным, и $i = 2, j = 1$, то есть объект неработоспособен, а признан работоспособным. Этим случаям соответствуют вероятности P_{12} , P_{21} , которые рассчитывают по формулам:

$$P_{12} = P_1^0 \sum_{l=1}^k P_l^c P_{21l}^y = \sum_{l=1}^k P_l^c P_{2l}^a P_{12l}^b ;$$

$$P_{21} = P_2^0 \sum_{l=1}^k P_l^c P_{12l}^y = \sum_{l=1}^k P_l^c P_{1l}^a P_{21l}^b ,$$

где P_1^0 – априорная вероятность нахождения объекта в работоспособном состоянии; P_2^0 – то же, для объекта диагностирования в неработоспособном состоянии; все остальные символы представляют собой условные вероятности при средстве диагностирования, находящемся в состоянии l : P_{21l}^y – признание работоспособного объекта неработоспособным; P_{12l}^y – признание неработоспособного объекта работоспособным; P_{2l}^a – признание объекта неработоспособным; P_{1l}^a – то же, работоспособным; P_{12l}^b – нахождения объекта диагностирования в работоспособном состоянии при получении результата диагностирования

«объект находится в неработоспособном состоянии»; P_{21l}^b – нахождения объекта диагностирования в неработоспособном состоянии при результате диагностирования «объект работоспособен».

В тех случаях, когда состояние объекта определяется совокупностью n независимых диагностических параметров, вероятности ошибок P_{12} , P_{21} вычисляют по формулам:

$$P_{12} = \sum_{l=1}^k P_l^c \left[\prod_{v=1}^n P_v - \prod_{v=1}^n (P_v - a_{vl}) \right],$$

$$P_{21} = \sum_{l=1}^k P_l^c \left[\prod_{v=1}^n (P_v - a_{vl} + \beta_{vl}) - \prod_{v=1}^n (P_v - a_{vl}) \right].$$

Возможен случай, когда средство диагностирования может находиться в одном из трех состояний: $i = 1$ – работоспособность при правильной индикации своего состояния; $i = 2$ – неработоспособность при индикации работоспособности средства измерения и работоспособности объекта в любом его состоянии; $i = 3$ – неработоспособность при индикации работоспособности средства измерения и неработоспособности объекта при любом его состоянии. В этом случае вероятности ошибок вычисляют по формулам:

$$P_{12} = P_1^0 P_l^c P_{21l}^y + P_1^0 P_3^c = P_1^c P_{21l}^a P_{12l}^b + P_3^c P_{123}^b,$$

$$P_{21} = P_2^0 P_l^c P_{12l}^y + P_2^0 P_3^c = P_1^c P_{1l}^a P_{21l}^b + P_3^c P_{213}^b.$$

Если при тех же возможных состояниях средства диагностирования состояние объекта диагностирования определяется совокупностью n независимых диагностических параметров, то вероятности ошибок рассчитывают по формулам:

$$P_{12} = P_1^c \left[\prod_{v=1}^n P_v - \prod_{v=1}^n (P_v - a_{v1}) \right] + P_3^c \prod_{v=1}^n P_v;$$

$$P_{21} = \sum_{l=1}^k P_l^c \left[\prod_{v=1}^n (P_v - a_{vl} + \beta_{vl}) - \prod_{v=1}^n (P_v - a_{vl}) \right] + P_3^c \left(1 - \prod_{v=1}^n P_v \right).$$

Следует иметь в виду, что если какой-либо из диагностических параметров не проверяется, то для него:

$$a_{vl} = 0, \beta_{vl} = 1 - P_v.$$

В тех случаях, когда вероятность открытых отказов средств диагностирования пренебрежимо мала, следует полагать $P_1^c = 1, P_2^c = P_3^c = 0$. При этом формулы для определения вероятностей ошибок примут вид:

$$P_{12} = P_1^c \left[\prod_{v=1}^n P_v - \prod_{v=1}^n (P_v - a_{vt}) \right] ;$$

$$P_{21} = \prod_{v=1}^n (P_y - a_{vt} + \beta_{vt}) - \prod_{v=1}^n (P_v - a_{vt}) .$$

Апостериорную вероятность ошибки вычисляют по формуле:

$$P_{ij}^A = \frac{P_{ij}}{\sum_{l=1}^m P_{lj}} . \quad (2)$$

Вероятность правильного диагностирования:

$$D = \sum_{i=1}^m P_{ij} = 1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m P_{ij} .$$

Оценка вероятности правильного диагностирования:

$$\hat{D} = \sum_{i=1}^m \hat{P}_{ij} = 1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \hat{P}_{ij} .$$

Если средство диагностирования может находиться в одном из трех состояний: работоспособном при правильной индикации своего состояния, неработоспособном при индикации работоспособного состояния объекта и средств диагностирования и неработоспособном при индикации своего работоспособного состояния и всегда неработоспособного состояния объекта диагностирования, вероятность правильного диагностирования вычисляют по формуле:

$$D = P_1^c \prod_{v=1}^n (1 - a_{vt} - \beta_{vt}) + P_2^c \prod_{v=1}^n P_v + P_3^c \prod_{v=1}^n (1 - P_y) .$$

Если вероятность скрытых отказов средств диагностирования пренебрежимо мала, то:

$$D = \prod_{v=1}^n (1 - a_{vt} - \beta_{vt}) .$$

Средняя оперативная продолжительность диагностирования определяется по формуле:

$$\tau_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \tau_i P_i^0 = \sum_{i=1}^n P_i^0 \sum_{j=1}^k \tau_{ij} P_{ij}^c ,$$

где τ_i – средняя оперативная продолжительность диагностирования объекта, находящегося в состоянии i ; τ_{ij} – оперативная продолжительность диагностирования объекта, находящегося в состоянии i при условии, что средство диагностирования находится в состоянии l .

Величина τ_i включает продолжительность выполнения вспомогательных операций и продолжительность собственно диагностирования.

Оценку средней оперативной продолжительности диагностирования проводят по формуле:

$$C_d = \frac{1}{N} \sum_{g=1}^N \sum_{i=1}^m \tau_{idg} P_i^0$$

Средняя стоимость диагностирования определяется по формуле:

$$C_d = \sum_{i=1}^m C_i P_i^0 = \sum_{i=1}^m P_i^0 \sum_{l=1}^k C_{il} P_l^c$$

где C_i – средняя стоимость диагностирования объекта, находящегося в состоянии i ; C_{il} – стоимость диагностирования объекта, находящегося в состоянии i при условии, что средство диагностирования находится в состоянии l .

Величина C_i включает амортизационные затраты при диагностировании, затраты на эксплуатацию системы диагностирования и затраты, связанные с изнашиванием объекта в процессе диагностирования.

Средняя оперативная трудоемкость диагностирования:

$$S_d = \sum_{i=1}^m S_{di} P_i^0 = \sum_{i=1}^m P_i^0 \sum_{l=1}^k S_{dil} P_l^c$$

Оценку средней оперативной трудоемкости диагностирования проводят по формуле:

$$\hat{S}_d = \frac{1}{N} \sum_{g=1}^N \sum_{i=1}^m \hat{S}_{idg} P_i^0$$

Рассмотрим пример расчета показателей диагностирования, подобный приведенному в ГОСТ 23564–79. Диагностирование должно обеспечить контроль технического состояния объекта диагностирования (ОД) с глубиной поиска дефекта до каждого структурного элемента [3]. Для характеристики технического состояния каждого блока выберем четыре диагностических параметра (ДП). При расчетах примем, что все ДП имеют нормальные распределения с математическими ожиданиями, равными номинальным значениям ДП $N_{\mu\nu}$ и средними квадратическими отклонениями $\sigma_{\eta\nu\nu}$.

Далее предложим, что анализ отказов показал, что в процессе диагностирования они могут находиться:

- в состоянии $t = 1$ с вероятностью P_1^e ;
- в состоянии $t = 2$ с вероятностью P_2^e ;
- в состоянии $t = 3$ с вероятностью P_3^e .

Предположим, что систему диагностирования (СД) обслуживают два оператора, причем в процессе отладки системы участвуют оба оператора, а в процессе собственно диагностирования – только один из них.

Расчет начинается с определения нормированных величин: для ДП с двусторонним допуском:

$$X_{\mu\nu} = |\Delta_{\mu\nu}| / \sigma_{\eta\mu\nu}$$

Для ДП с односторонним допуском:

$$X_{\mu\nu} = \frac{\Delta_{\mu\nu} - N_{\mu\nu}}{\sigma_{\eta\mu\nu}}$$

Затем определяем:

$$z_{\mu\nu} = \sigma_{\eta\mu\nu}(\text{ПИ}) / \sigma_{\eta\mu\nu}(\text{ДП})$$

Затем определяют вероятности:

$$\alpha_{\mu\nu 1} = \frac{1}{2\pi} \int_{-x_{\mu\nu}}^{x_{\mu\nu}} e^{-y^2/2} \left[\int_{-\infty}^{\frac{-x_{\mu\nu}-y}{z_{\mu\nu}}} e^{-t^2/2} dt + \int_{\frac{x_{\mu\nu}-y}{z_{\mu\nu}}}^{\infty} e^{-t^2/2} dt \right] dy$$

$$\beta_{\mu\nu 1} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{-x_{\mu\nu}} e^{-y^2/2} \left[\int_{\frac{-x_{\mu\nu}-y}{z_{\mu\nu}}}^{\frac{x_{\mu\nu}-y}{z_{\mu\nu}}} e^{-t^2/2} dt \right] dy + \int_{x_{\mu\nu}}^{+\infty} \left[\int_{\frac{-x_{\mu\nu}-y}{z_{\mu\nu}}}^{\frac{x_{\mu\nu}-y}{z_{\mu\nu}}} e^{-t^2/2} dt \right] dy \right\}$$

Вероятность того, что диагностический параметр находится в допустимых пределах, для ДП с двусторонним допуском:

$$P_{\mu\nu} = 2\Phi_0(x_{\mu\nu})$$

Для ДП с односторонним допуском:

$$P_{\mu\nu} = 0,5\Phi_0(x_{\mu\nu})$$

$$\Phi_0(x_{\mu\nu}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_{\mu\nu}} e^{-t^2/2} dt$$

нормированная функция Лапласа.

Априорная вероятность работоспособности каждого блока определяется:

$$P_{\mu} = \prod_{v=1}^4 P_{\mu v} .$$

Вероятность $P_{1,2,\mu}$ и $P_{2,1,\mu}$ находят по формулам, которые для данного случая принимают следующий вид:

$$P_{1,2,\mu} = \alpha_{\mu 1} = P_{\mu} - \prod_{v=1}^4 (P_{\mu v} - \alpha_{\mu v 1}) ;$$

$$P_{2,1,\mu} = \beta_{\mu 1} = \prod_{v=1}^4 (P_{\mu v} - \alpha_{\mu v 1} + \beta_{\mu v 1}) - \prod_{v=1}^4 (P_{\mu v} - \alpha_{\mu v 1}) .$$

Вероятность правильного диагностирования ОД определяют по формуле:

$$D = P_1^c \prod_{\mu=1}^2 (1 - \alpha_{\mu v} - \beta_{\mu 1}) + P_2^c \prod_{\mu=1}^2 P_{\mu} + P_3^c \prod_{\mu=1}^2 (1 - P_{\mu}) .$$

Рассчитывают матрицу вероятностей ошибок диагностирования вида P_{ij} по формуле (1).

Для иллюстрации развернем данную формулу для P_{11} и P_{24} :

$$P_{11} = P_1^c \prod_{\mu=1}^2 (P_{\mu} - \alpha_{\mu 1}) + P_2^c \prod_{\mu=1}^2 P_{\mu} ;$$

$$P_{24} = P_1^c \alpha_{11} (1 - P_2 - \beta_{21}) + P_3^c P_1 (1 - P_2) .$$

Матрица апостериорных вероятностей ошибок диагностирования вида P_{ij} определяется по формуле (2).

Априорные вероятности состояний ОД определены по формуле:

$$\begin{aligned} P_1^0 &= P_1 P_2; \\ P_2^0 &= P_1 (P - P_2); \\ P_3^0 &= P_2 (1 - P_1); \\ P_4^0 &= (1 - P_1)(1 - P_2) . \end{aligned}$$

Разработка алгоритма диагностирования является одним из важнейших этапов создания автоматических контролируемых установок. При решении этой задачи нужно знать все свойства и параметры объекта диагностирования, необходимые для выбора диагностических параметров, характеристики средств диагностирования, которые можно использовать.

Литература

1. Карташова Л.Н. Достоверность измерений и критерии качества испытаний приборов. М.: Изд-во стандартов, 1967.
2. Воронцов Л.Н., Корнодорф С.Ф. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1988.
3. Якушев А.И., Воронцов Л.Н., Федотов Н.М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Машиностроение, 1986.