

УДК 62.522

**Н.Н. ФАТЕЕВА**, канд. техн. наук; доц. НТУ «ХПИ»

## АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ГИДРОПНЕВМОАГРЕГАТОВ

Рассмотрены вопросы расчета параметрической надежности гидропневмоагрегатов. Предложен обобщенный алгоритм расчета параметрической надежности гидропневмоагрегатов в среде программного обеспечения *MathCad*, что позволяет по результатам расчета обоснованно принимать прогрессивные конструктивные и технологические решения для повышения надежности элементов, гарантируя тем самым оптимальные показатели новой конструкции.

**Ключевые слова:** параметрическая надежность, математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение, квантиль нормального распределения.

### Введение

Проектирование сложных гидро- и пневмоагрегатов немыслимо без учета и анализа надежности. Недостаточная надежность может привести не только к чрезмерным эксплуатационным издержкам (ремонт и восстановление), но и к более тяжким последствиям (невыполнение задачи, опасные ситуации, аварии).

Математической основой теории надежности являются теория вероятностей и математическая статистика, математическая логика, теория случайных процессов, теория массового обслуживания, теория информации, теория планирования эксперимента и другие математические дисциплины.

Практические расчеты в теории надёжности зачастую сводятся к большим аналитическим исследованиям, которые иногда требуют основательных знаний математики и статистики [1]. Благодаря развитию компьютерной техники и применению программных средств появилась возможность существенно упростить порядок расчета и сократить время на его выполнение.

### Постановка задачи

Изменение выходных функциональных параметров гидропневмоагрегатов в процессе эксплуатации, связанное с изменением внутренних структурных параметров и технического состояния деталей и узлов, может быть оценено параметрической надежностью. Она определяется вероятностью невыхода за пределы технических условий функциональных параметров агрегата в процессе отработки установленного ресурса (ресурса до первого ремонта или межремонтного). Такая оценка может быть также произведена по результатам ресурсных испытаний агрегатов или по результатам систематического контроля их параметров в эксплуатации при внедрении прогрессивных методов технического обслуживания и ремонта по техническому состоянию.

### Метод расчета

Для определения вероятности нахождения функциональных параметров агрегата в пределах технических условий в период отработки установленного ресурса может быть использована следующая методика, применяемая на ряде предприятий-разработчиков агрегатов авиационного гидропривода [2]. Суть ее заключается в следующем.

Пусть выходные параметры гидравлического агрегата:  $z_1(t), z_2(t), \dots, z_k(t)$ . При контроле этих параметров в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_p$  для группы из  $N$  агрегатов

© Н.Н. Фатева, 2014

получена следующая матрица значений параметров:

$$Z = \begin{pmatrix} z_{1i}(t_0), z_{1i}(t_1), \dots, z_{1i}(t_p); \\ z_{2i}(t_0), z_{2i}(t_1), \dots, z_{2i}(t_p); \\ \dots \\ z_{ki}(t_0), z_{ki}(t_1), \dots, z_{ki}(t_p), \end{pmatrix} \quad (1)$$

где  $i = \overline{1, N}$ .

Для значений  $z_1, z_2, \dots, z_k$  в каждом временном сечении  $t_1, t_2, \dots, t_p$  необходимо дать оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения:

$$\left. \begin{aligned} \bar{z}_1(t_j) &= \frac{1}{n_{1j}} \sum_{i=1}^{n_{1j}} z_{1i}(t_j); \\ \bar{z}_2(t_j) &= \frac{1}{n_{2j}} \sum_{i=1}^{n_{2j}} z_{2i}(t_j); \\ \dots \\ \bar{z}_k(t_j) &= \frac{1}{n_{kj}} \sum_{i=1}^{n_{kj}} z_{ki}(t_j); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} s_{z_1}^2(t_j) &= \frac{1}{n_{1j} - 1} \sum_{i=1}^{n_{1j}} [z_{1i}(t_j) - \bar{z}_1(t_j)]^2; \\ s_{z_2}^2(t_j) &= \frac{1}{n_{2j} - 1} \sum_{i=1}^{n_{2j}} [z_{2i}(t_j) - \bar{z}_2(t_j)]^2; \\ \dots \\ s_{z_k}^2(t_j) &= \frac{1}{n_{kj} - 1} \sum_{i=1}^{n_{kj}} [z_{ki}(t_j) - \bar{z}_k(t_j)]^2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $n_{lj}$  – число значений параметра  $z_l$ , измеренных в данном временном сечении  $t_j$  при  $l = 1, 2, \dots, k$ .

По полученным оценкам вычисляют вероятности соответствия выходных параметров агрегата заданным требованиям, полагая, что распределение параметров агрегата подчиняется нормальному закону:

$$\left. \begin{aligned} P_{1j} &= P[z_1^H \leq z_1(t_j) \leq z_1^B] = F_0 \left[ \frac{z_1^B - \bar{z}_1(t_j)}{s_{z_1}(t_j)} \right] - F_0 \left[ \frac{z_1^H - \bar{z}_1(t_j)}{s_{z_1}(t_j)} \right]; \\ P_{2j} &= P[z_2^H \leq z_2(t_j) \leq z_2^B] = F_0 \left[ \frac{z_2^B - \bar{z}_2(t_j)}{s_{z_2}(t_j)} \right] - F_0 \left[ \frac{z_2^H - \bar{z}_2(t_j)}{s_{z_2}(t_j)} \right]; \\ \dots \\ P_{kj} &= P[z_k^H \leq z_k(t_j) \leq z_k^B] = F_0 \left[ \frac{z_k^B - \bar{z}_k(t_j)}{s_{z_k}(t_j)} \right] - F_0 \left[ \frac{z_k^H - \bar{z}_k(t_j)}{s_{z_k}(t_j)} \right]; \end{aligned} \right\}$$

где  $z_1^B, z_2^B, \dots, z_k^B$  и  $z_1^H, z_2^H, \dots, z_k^H$  – верхние и нижние пределы контролируемых параметров;  $F_0(x)$  – табулированная функция нормального распределения.

Результаты определения вероятностей соответствия выходных параметров агрегата заданным требованиям представляют в виде матрицы

$$P = |P_{kj}| = \begin{pmatrix} P_{10}, P_{11}, \dots, P_{1p}; \\ P_{20}, P_{21}, \dots, P_{2p}; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ P_{k0}, P_{k1}, \dots, P_{kp} \end{pmatrix}.$$

Из вышеприведенного ясно, что метод определения вероятности нахождения функциональных параметров агрегата в пределах технических условий в период отработки установленного ресурса сложен для выполнения расчетов, так как имеет много переменных, учитывающих различные факторы. Поэтому применение программных средств помогает существенно упростить порядок расчета и сократить время на его выполнение.

В качестве примера определим вероятность соответствия выходных параметров гидронасоса техническим условиям при проведении подконтрольной эксплуатации четырех установок [2].

Техническими условиями установлены следующие требования на выходные параметры насоса: подача насоса  $z_1$  – не менее 650 см<sup>3</sup>/с; пульсация давления нагнетания  $z_2$  – не более 2,5 МПа; внутренние утечки  $z_3$  – не более 2,3 см<sup>3</sup>/с.

Значения измеренных параметров насоса, полученные в процессе контроля его технического состояния при проведении подконтрольной эксплуатации, представлены в таблице 1.

Расчет вероятности нахождения функциональных параметров агрегата в пределах технических условий в период отработки установленного ресурса может быть с успехом выполнен в среде программного обеспечения *MathCad*.

Перечислим расчетные зависимости обобщенного алгоритма-расчета «Оценка параметрической надежности» (для любой системы).

1) Анализируя исходную информацию, задаем матрицу значений параметров системы (выражение (1)).

2) Для определения вероятности невыхода контролируемых параметров агрегата  $z_1, z_2, \dots, z_k$  за пределы технических условий по формуле (2) определяем значения математического ожидания параметров при различных наработках агрегата в эксплуатации:  $\bar{z}_1, \bar{z}_2, \dots, \bar{z}_k$ .

3) По формуле (3) определяем значения среднего квадратического отклонения параметров при различных наработках агрегата в эксплуатации:  $s_{z1}, s_{z2}, \dots, s_{zk}$ .

4) По полученным оценкам и, полагая, что распределение параметров агрегата подчиняется нормальному закону, определяем квантили нормального распределения:

$$\frac{z_i^B - \bar{z}_i}{s_{zi}} \text{ или } \frac{z_i^H - \bar{z}_i}{s_{zi}} \text{ в зависимости от допустимых границ.}$$

5) В соответствии с таблицами параметров нормального распределения [3] по значениям квантилей нормального распределения находим вероятности невыхода параметров агрегата за пределы технических условий для различной наработки.

Таблица 1

Измеренные параметры насоса при проведении подконтрольной эксплуатации

Наработка установки, ч	Номер установки	Значения параметров насоса		
		$z_1, \text{см}^3/\text{с}$	$z_2, \text{МПа}$	$z_3, \text{см}^3/\text{с}$
0	1	670	2,41	1,12
	2	668	2,32	1,20
	3	663	2,34	1,09
	4	665	2,45	1,05
1000	1	668	2,40	1,70
	2	666	2,30	1,83
	3	660	2,31	1,63
	4	664	2,41	1,55
2000	1	664,5	2,40	1,83
	2	662	2,29	1,94
	3	657	2,31	1,75
	4	661,5	2,40	1,80
4000	1	660	2,39	1,95
	2	657	2,27	2,02
	3	655	2,29	1,85
	4	657	2,38	2,05
6000	1	655	2,38	2,10
	2	653	2,26	2,12
	3	652	2,27	2,02
	4	654	2,36	2,21

**Результаты расчета**

Результаты расчетов вероятности нахождения функциональных параметров насоса в пределах технических условий в период отработки установленного ресурса получены в среде программного обеспечения *MathCad* и приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов

Наработка установки, ч	Оценка математического ожидания параметра			Оценка среднего квадратического отклонения параметра			Квантиль нормального распределения		
	$\bar{z}_1, \text{см}^3/\text{с}$	$\bar{z}_2, \text{МПа}$	$\bar{z}_3, \text{см}^3/\text{с}$	$s_{z1}, \text{см}^3/\text{с}$	$s_{z2}, \text{МПа}$	$s_{z3}, \text{см}^3/\text{с}$	$\frac{z_1^H - \bar{z}_1}{s_{z1}}$	$\frac{z_2^B - \bar{z}_2}{s_{z2}}$	$\frac{z_3^B - \bar{z}_3}{s_{z3}}$
0	666,5	2,38	1,115	3,11	0,061	0,064	-5,306	1,967	18,52
1000	664,5	2,355	1,678	3,42	0,058	0,119	-4,24	2,5	5,23
2000	661,25	2,35	1,83	3,123	0,058	0,08	-3,602	2,586	5,875
4000	657,25	2,33	1,97	2,06	0,061	0,089	-3,519	2,787	3,71
6000	653,5	2,32	2,113	1,29	0,061	0,078	-2,71	2,951	2,397

*Примечание.* Для параметров, которым заданы допустимые верхние границы, принимается  $\frac{z_i^H - \bar{z}_i}{s_{z_i}} = -\infty$ ;

для параметров, которым заданы допустимые нижние границы, принимается  $\frac{z_i^B - \bar{z}_i}{s_{z_i}} = -\infty$ .

**Анализ полученных результатов**

В соответствии с таблицами параметров нормального распределения [3] по значениям квантилей нормального распределения находим вероятности невыхода параметров агрегата за пределы технических условий для различной наработки (таблица 3).

Вероятность невыхода параметров агрегата за пределы технических условий

Наработка установки, ч	Вероятность нахождения параметров насоса в заданных пределах		
	$P_{z1}$	$P_{z2}$	$P_{z3}$
0	0,99999995	0,9755	0,999999999
1000	0,99999	0,9913	0,999999993
2000	0,99985	0,9952	0,999999995
4000	0,9998	0,99735	0,9999
6000	0,9967	0,99815	0,99175

Анализ полученных результатов указывает на высокую параметрическую надежность гидронасоса, проходившего подконтрольную эксплуатацию.

**Выводы**

Если полученные результаты не удовлетворяют техническим условиям, то производится корректировка исходных данных. При этом, поскольку известна структура формирования показателей надежности, можно указать оптимальные варианты – за счет каких элементов и насколько необходимо изменить исходные параметры (материалы, смазку, размеры и конструкцию агрегата и т.п.) [4].

Оценка параметрической надежности гидропневмоагрегатов позволяет осуществить рациональный выбор конструктивной схемы и параметров, подобрать соответствующие материалы и элементы реализаций схем.

Оперативный и достоверный анализы надежности элементов гидропневмоагрегатов позволяют обоснованно принимать прогрессивные конструктивные и технологические решения для повышения надежности элементов, гарантируя тем самым оптимальные показатели новой конструкции.

**Список литературы:** 1. Справочник по прикладной статистике [Текст] / под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана – М.: Финансы и статистика, 1989. – 525 с. 2. Надежность гидравлических систем воздушных судов [Текст] / под ред. Т.М. Башты – М.: Транспорт, 1986. – 279 с. 3. Шор, Я.Б. Таблицы для анализа и контроля надежности [Текст] / Я.Б. Шор, Ф.И. Кузьмин – М.: Сов. радио, 1969. – 284 с. 4. Проников, А.С. Надежность машин / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.

*Поступила в редколлегию 04.10.13*

УДК 62.522

**Алгоритм оценки параметрической надежности гидропневмоагрегатов** [Текст] / Н.Н. Фатеева // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 1(1044). – С. 228-232. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-774X.

Розглянуто питання розрахунку параметричної надійності гідропневмоагрегатів. Запропоновано узагальнений алгоритм розрахунку параметричної надійності гідропневмоагрегатів в середовищі програмного забезпечення *Mathcad*, що дозволяє за результатами розрахунку обґрунтовано приймати прогресивні конструктивні і технологічні рішення для підвищення надійності елементів, гарантуючи тим самим оптимальні показники нової конструкції.

**Ключові слова:** параметрична надійність, математичне очікування, середнє квадратичне відхилення, квантиль нормального розподілу.

The questions of calculation of parametric reliability of hydropneumounits are considered. The generalized algorithm of calculation of parametric reliability of hydropneumounits is offered in the environment of *Mathcad* software, that allows on results a calculation grounded to accept progressive structural and technological decisions for the increase of reliability of elements, thus ensuring the optimum indexes of new construction the same.

**Keywords:** parametric reliability, expected value, average quadratic deviation, quantile of normal distribution.