

Герике Б.Л.,
д.т.н., профессор Института Угля и Углекими СО РАН
Сушко А.Е.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СКАЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕКТОРА ПРИЗНАКОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

На сегодняшний день на многих предприятиях все большую актуальность приобретают вопросы повышения надежности работы оборудования. Особенно остро эта проблема стоит на предприятиях угольной промышленности, ведь внезапный отказ оборудования в этом случае может стать не только причиной нарушения производственного цикла, но и привести к человеческим жертвам. В этих условиях особую важность приобретает возможность контроля в процессе работы наиболее уязвимого оборудования с целью предотвращения внезапных отказов и своевременного вывода в ремонт агрегатов, находящихся в неудовлетворительном состоянии. Решение подобной проблемы возможно лишь при внедрении методов неразрушающего контроля, которые обеспечивают получение достоверной информации о состоянии оборудования без нарушения производственного цикла. Анализ отечественного и зарубежного опыта контроля технического состояния систем с вращательным движением силовых узлов показывает, что для обнаружения возможных отказов наиболее эффективен (до 77%) контроль состояния оборудования именно по параметрам вибрации [1].

Одним из наиболее ответственных типов оборудования на шахтах являются вентиляторные установки главного проветривания. Подшипники качения – ключевые узлы этих агрегатов. Именно работоспособность подшипника и его остаточный ресурс в большинстве случаев определяют межремонтный интервал. Состояние подшипника обычно определяют при входном контроле в момент его поступления на склад. Для этого существуют специальные стенды входного контроля подшипников, на которых по нескольким замерам вибрации, выполненным за короткий отрезок времени, могут быть определены погрешности изготовления подшипника – волнистость дорожек, гранность и разноразмерность тел качения и т.д. Для оценки качества проведенного монтажа состояние подшипников контролируют во время приемосдаточных испытаний. В этот момент могут быть выявлены такие дефекты, как перекося одного из колец, неоднородный радиальный натяг, проскальзывание и т.д. На сегодняшний день разработано достаточное количество методик, позволяющих с высокой достоверностью выявить дефекты изготовления и монтажа методами вибрационной диагностики. К сожалению, использование этих методов не позволяет получить ответ на главный вопрос - срок службы подшипника. Поэтому наибольший практический интерес вызывает именно оценка состояния подшипника во время эксплуатации [1].

В настоящее время существует большое количество методов диагностики подшипников качения во время эксплуатации. Однако, как показывает практика, достоверность диагностики состояния подшипника по какому-либо одному методу крайне невелика. Наибольшая достоверность диагностики достигается при одновременном использовании нескольких методов. В этом случае результаты диагностики, полученные разными методами, дополняют друг друга, а заключение о дальнейшем использовании или замене подшипника выдается после комплексного анализа всей имеющейся информации. Основная сложность подобной диагностики – неизбежное влияние человеческого фактора. Отсутствие норм на допустимые уровни «подшипниковых» замеров и необходимость комплексного использования данных различных замеров затрудняют формализацию процедуры диагностики. Основными факторами,

определяющими достоверность, в этом случае служат накопленный опыт и знания специалиста, производящего диагностику. Поэтому основная задача вибрационной диагностики подшипников качения заключается в создании единого универсального обобщенного критерия оценки, объективно отражающего текущее состояние подшипника.

Один из наиболее эффективных подходов при формировании обобщенного критерия, т.е. замене вектора диагностических признаков скалярной величиной, - «оптимальная» скаляризация [2]. Рассмотрим этот подход более подробно. Пусть существуют две группы подшипников: А - «после монтажа» (в хорошем состоянии) и В - «предаварийные» (в крайне неудовлетворительном состоянии). Подшипники каждой из групп характеризуются выборками $X_1^A, \dots, X_{N_A}^A$ и $X_1^B, \dots, X_{N_B}^B$ соответственно, где N_A - количество подшипников в группе А, а N_B - количество подшипников в группе В. Каждый вектор в выборке X_j^z , $z = A, B$, $j = 1, \dots, N_z$ является n -мерным $X_j^z = (X_{j1}^z, \dots, X_{jn}^z)$, где X_{ji}^z - i -й диагностический критерий j -го подшипника. В нашем случае $n=4$ (при диагностике используется 4 критерия). Идея формирования «наилучшей» скаляризации базируется на замене вектора X_j^z скаляром $r_j^z = \sum_{i=1}^n l_i \cdot X_{ji}^z$, где коэффициенты l_i выбираются некоторым «оптимальным образом» [3].

Наиболее наглядно процедуру определения «наилучшей» скаляризации можно представить, используя геометрическую интерпретацию. Замена вектора диагностических критериев X_j^z скаляром $r_j^z = \sum_{i=1}^n l_i \cdot X_{ji}^z$ эквивалентно проектированию каждого X_j^z на некоторую прямую с направляющим вектором $l = (l_1, \dots, l_n)$. На рис. 1 представлены два кластера А и В в двухмерном пространстве. Очевидно, что проекция на направление $l^{(1)}$ позволяет более четко различать А и В, чем проекция на $l^{(2)}$.

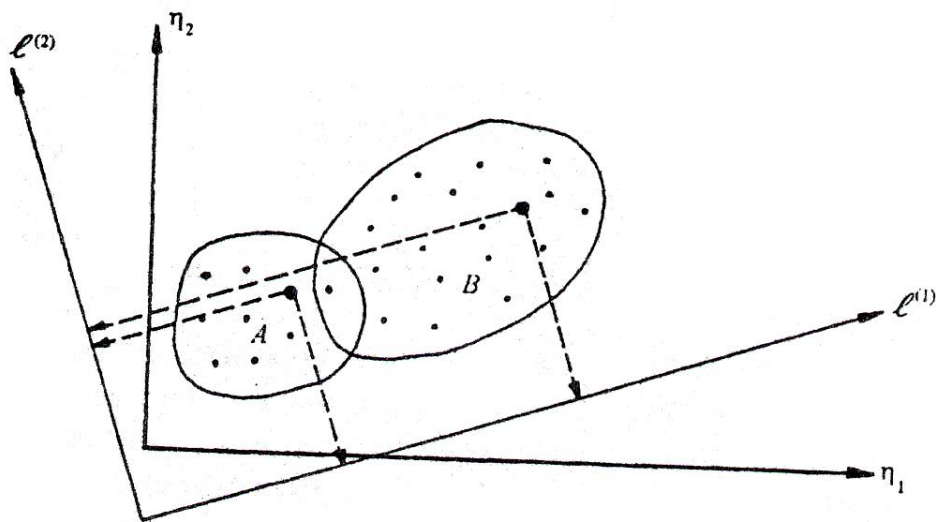


Рис. 1. Геометрическая интерпретация «наилучшей» скаляризации

В одной из работ [4] Р. Фишер предложил выбирать направление l таким образом, чтобы отношение квадратов разностей, спроектированных на l средних значений к сумме дисперсий спроектированных выборок была бы максимальной. Выразим отношение Фишера через векторы средних значений и ковариационные матрицы.

Предположим, что каждый вектор наблюдений заменен его проекцией $y_j^z = l_1 \cdot X_{j1}^z + \dots + l_n \cdot X_{jn}^z = l \cdot X_j^z$ (1). Среднее значение спроектированной выборки равно

$$\hat{y}^z = \sum_{j=1}^{N_z} \sum_{k=1}^n l_k \cdot X_{jk}^z / N_z = l \cdot \hat{\mu}_z \quad (2), \text{ где } \hat{\mu} - \text{математическое ожидание.}$$

$$\mu_A^{(i)} = \sum_{m=1}^{N_A} X_{mi}^A / N_A \text{ и } \mu_B^{(i)} = \sum_{m=1}^{N_B} X_{mi}^B / N_B \quad (3) - \text{соответственно математические ожидания}$$

векторов для групп А и В.

Дисперсия проекций обеих выборок выражается в следующем виде:

$$S = l \cdot \left(\sum_{z=A,B} (N_z)^{-1} \sum_{j=1}^{N_z} (X_j^z - \hat{\mu}_z)(X_j^z - \hat{\mu}_z)^T \right) \cdot l^T = l \cdot (S_A + S_B) \cdot l^T \quad (4)$$

где S_A и S_B – оценки ковариационных матриц для групп А и В

$$S_z = \|V_{ij}^z\|, i, j = 1, \dots, n \quad z = A, B \quad V_{ij}^z = N_z^{-1} \cdot \sum_{m=1}^{N_z} (X_{mi}^z - \hat{\mu}_z^{(i)}) \cdot (X_{mj}^z - \hat{\mu}_z^{(j)}) \quad (5)$$

Таким образом, оптимальный вектор Фишера l максимизирует следующее выражение:

$$D = \frac{(l \cdot (\hat{\mu}_A - \hat{\mu}_B))^2}{l \cdot (S_A + S_B) \cdot l^T}$$

Для неособенных матриц S_A и S_B вектор l_* , максимизирующий D определяется как: $l_*^T = (S_A + S_B)^{-1} \cdot (\hat{\mu}_A - \hat{\mu}_B)$ (6)

Для того чтобы определить, достаточно ли четко разделены группы А и В, может быть использован следующий полуэмпирический критерий:

$$|\hat{y}^A - \hat{y}^B| > 2,5 \cdot (\hat{\sigma}_A + \hat{\sigma}_B) \quad (7)$$

Для практической проверки работоспособности предлагаемой методики автоматизированной диагностики подшипников качения автором в рамках настоящей работы были проведены предремонтные вибрационные обследования вентиляторных установок главного проветривания на нескольких шахтах Кузбасса (всего более ста подшипников). В ходе вибрационных обследований измерялись спектры виброскорости, виброускорения, огибающей и эксцесс. После проведения виброобследований во время ремонта была произведена дефектация подшипников. В таблице 1 представлены выборочные результаты проведенных виброизмерений по 20 различным подшипникам. При помощи алгоритмов, разработанных автором для выделения «подшипниковых» составляющих [5], для каждого из 20 подшипников по результатам виброобследований (таблица 1) были рассчитаны значения четырех диагностических критериев. В таблице 2 представлены значения этих критериев и результаты проведенной дефектации подшипников.

Таблица 1. Результаты вибрационной диагностики подшипников.

№	Место измерения			Результаты виброобследования			
	Агрегат	Точка Напр.	RPM. об/мин	Спектр V	Спектр A	Сп. Огиб.	Эксцесс
1	Агрегат 1	3 Рад	750	1,34	2,30	58,5	11,79
2		4 Рад		2,01	3,24	63,5	3,06
3	Агрегат 2	2 Рад	1500	9,89	41,09	92,5	5,46
4		3 Рад		3,93	12,91	81,7	3,18
5		4 Рад		3,38	10,01	87,1	3,25
6	Агрегат 3	2 Рад	1000	5,38	11,78	70,1	3,63
7		3 Рад		2,89	12,13	78,6	3,03

8		4 Рад		2,17	21,32	85,9	3,03
9	Агрегат 4	2 Рад	1000	4,75	24,55	84,4	18,49
10	Агрегат 5	2 Рад	750	3,14	14,25	86,9	3,70
11		3 Рад		6,83	6,07	61,0	3,08
12	Агрегат 6	3 Рад	1000	5,51	7,91	67,7	4,52
13	Агрегат 7	3 Рад		4,13	27,32	81,7	3,19
14	Агрегат 8	1 Рад	1000	1,26	54,59	98,3	3,94
15		2 Рад		0,92	18,41	90,8	3,32
16	Агрегат 9	4 Рад	1000	2,40	3,23	75,3	6,00
17	Агрегат 10	1 Рад	1500	2,92	9,10	81,2	3,10
18		2 Рад		3,09	49,69	97,9	3,29
19		3 Рад		15,42	159,38	113,7	9,06
20		4 Рад		6,71	91,2	108,5	6,12

Таблица 2. Диагностические критерии оценки состояния подшипников.

№	Место измерения			Диагностические критерии				Результаты дефектовки
	Агрегат	Точка Напр.	RPM	Спектр V	Спектр A	Сп. Огиб	Экссесс	
1	Агрегат 1	3 Рад	750	0,41	0,45	20,9	11,79	Авария
2		4 Рад		0,38	0,25	14,1	3,06	Норма
3	Агрегат 2	2 Рад	1500	4,68	11,33	44,4	5,46	Норма
4		3 Рад		0,47	1,49	13,7	3,18	Норма
5		4 Рад		0,53	4,57	15,5	3,25	Норма
6	Агрегат 3	2 Рад	1000	0,40	2,99	23,7	3,63	Норма
7		3 Рад		0,64	4,77	6,54	3,03	Норма
8		4 Рад		0,53	4,81	16,4	3,03	Пред.
9	Агрегат 4	2 Рад	1000	0,97	10	119,5	18,49	Авария
10	Агрегат 5	2 Рад	750	0,69	6,19	11,4	3,70	Пред.
11		3 Рад		0,44	0,97	13,2	3,08	Норма
12	Агрегат 6	3 Рад	1000	0,52	0,32	14,02	4,52	Норма
13	Агрегат 7	3 Рад		0,56	11,77	15,5	3,19	Пред.
14	Агрегат 8	1 Рад	1000	1,07	42,88	52,8	3,94	Авария
15		2 Рад		0,54	15,20	14,9	3,32	Пред.
16	Агрегат 9	4 Рад		1,04	4,38	13,0	6,00	Авария
17	Агрегат 10	1 Рад	1500	1,05	6,43	10,3	3,1	Норма
18		2 Рад		1,43	40,97	7,01	3,29	Авария
19		3 Рад		8,05	125,67	48,2	9,06	Авария
20		4 Рад		5,8	65,98	27,7	6,12	Авария

В таблицах 1 и 2 используются следующие условные обозначения:

RPM – частота вращения

Спектр V – диагностический критерий (по спектру виброскорости)

Спектр A – диагностический критерий (по спектру виброускорения)

Сп Огиб – диагностический критерий (по спектру огибающей)

Экссесс – высокочастотный экссесс

Норма – подшипник находится в исправном состоянии

Пред. – присутствуют одиночные дефекты

Авария – присутствуют множественные дефекты и значительный износ

Рассчитаем коэффициенты «оптимальной» скаляризации и значения единых диагностических критериев для каждого из подшипников. Для этого из числа обследованных подшипников выберем 4 хороших (группа А) и 4 аварийных (группа В). В таблицах 3 и 4 представлены значения диагностических критериев для выбранных подшипников группы А и В соответственно.

Таблица 3. Значения диагностических критериев. НОРМА (группа А).

№	Спектр V	Спектр А	Сп. Огиб.	Экссесс
2	0,38	0,25	14,1	3,06
4	0,47	1,49	13,7	3,18
11	0,44	0,97	13,2	3,08
12	0,52	0,32	14,02	4,52

Таблица 4. Значения диагностических критериев. АВАРИЯ (группа В).

№	Спектр V	Спектр А	Сп. Огиб.	Экссесс
9	0,97	10	119,5	18,49
14	1,07	42,88	52,8	3,94
16	1,04	4,38	13,0	6,00
20	5,8	65,98	27,7	6,12

Соответственно выборки $X_1^A, \dots, X_{N_A}^A$ и $X_1^B, \dots, X_{N_B}^B$, характеризующие состояние подшипников каждой из групп, где N_A – количество подшипников в группе А, а N_B – количество подшипников в группе В (в общем виде выборки вида X_j^z , $z = A, B, j = 1, \dots, N_z$, $X_j^z = (X_{j1}^z, \dots, X_{jn}^z)$, где X_{ji}^z - i -й диагностический критерий j -го подшипника), примут следующий вид:

$$X_j^A = (X_{j1}^A, \dots, X_{jn}^A), N_A=4$$

$$j=1 \quad X_1^A = (X_{11}^A, \dots, X_{1n}^A) = (0.38, 0.25, 14.1, 3.06)$$

$$j=2 \quad X_2^A = (X_{21}^A, \dots, X_{2n}^A) = (0.47, 1.49, 13.7, 3.18)$$

$$j=3 \quad X_3^A = (X_{31}^A, \dots, X_{3n}^A) = (0.44, 0.97, 13.2, 3.08)$$

$$j=4 \quad X_4^A = (X_{41}^A, \dots, X_{4n}^A) = (0.52, 0.32, 14.02, 4.52)$$

$$X_j^B = (X_{j1}^B, \dots, X_{jn}^B), N_B=4$$

$$j=1 \quad X_1^B = (X_{11}^B, \dots, X_{1n}^B) = (0.97, 10.00, 119.5, 18.49)$$

$$j=2 \quad X_2^B = (X_{21}^B, \dots, X_{2n}^B) = (1.07, 42.88, 52.8, 3.94)$$

$$j=3 \quad X_3^B = (X_{31}^B, \dots, X_{3n}^B) = (1.04, 4.38, 13.00, 6.00)$$

$$j=4 \quad X_4^B = (X_{41}^B, \dots, X_{4n}^B) = (5.8, 65.98, 27.7, 6.12)$$

По формуле (3) рассчитаем вектора $\hat{\mu}_A^{(i)}$ и $\hat{\mu}_B^{(i)}$ для каждой группы подшипников:

$$\hat{\mu}_A^{(i)} = \sum_{m=1}^{N_A} X_{mi}^A / N_A \quad (0.45, 0.76, 13.76, 3.46) \quad \hat{\mu}_B^{(i)} = \sum_{m=1}^{N_B} X_{mi}^B / N_B \quad (2.22, 30.81, 53.25, 8.64)$$

Вычислим ковариационные матрицы S_A и S_B по формуле (5). Получим:

$$S_A = \begin{pmatrix} 0,0026 & 0,0044 & -0,0003 & 0,0251 \\ 0,0044 & -0,2577 & -0,1123 & -0,1367 \\ -0,0003 & -0,1123 & 0,1251 & 0,0923 \\ 0,0251 & -0,1367 & 0,0923 & 0,3766 \end{pmatrix} \quad S_B = \begin{pmatrix} 4,3 & 42,3 & -31,6 & -3,2 \\ 42,3 & 628,6 & -304,7 & -70,1 \\ -31,6 & -304,7 & 1665,5 & 206,3 \\ -3,2 & -70,1 & 206,3 & 33,1 \end{pmatrix}$$

Оптимальный вектор $l_* = (l_1, \dots, l_n)$ может быть рассчитан по формуле (6). Подставив значения для $\hat{\mu}_A$, $\hat{\mu}_B$, S_A и S_B , получим следующее: $l_* = (19.70, -1.86, 1.19, -9.52)$

На основании полученного оптимального вектора l_* для любого вектора диагностических критериев, характеризующего состояние подшипника, по формуле (1) может быть рассчитан единый диагностический критерий. Проверим по одномерным выборкам y_j^A и y_j^B достаточно ли «четко» разделяются подшипники групп А (Норма) и В (Авария). Для этого воспользуемся полуэмпирическим критерием, формула (7). Проведенные вычисления показали «хорошую» степень разделяемости выборок:

$$\frac{|\hat{y}^A - \hat{y}^B|}{(\hat{\sigma}_A + \hat{\sigma}_B)} = 3,21 > 2,5.$$

Теперь для проведения диагностики необходимо установить пороговые значения для различных групп подшипников. Для удобства представления введем пересчет единого диагностического критерия по формуле $y_j'^z = (y_j^z + 23) * (-1)$ (8). Соответственно подшипники $y_j'^z < b$ - отвечают состоянию «Норма», $y_j'^z > B$ - «Авария», $b \leq y_j'^z \leq B$ - «Предупреждение». На основании имеющихся данных было определено $b = -5$, $B = 5$. В таблице 5 представлены значения единого диагностического критерия (1), единого диагностического критерия, пересчитанного по формуле (8), результаты оценки состояния подшипников на основании проведенного анализа и фактической дефектации подшипников.

Таблица 5. Результаты автоматизированной диагностики.

№	Место измерения			Результаты диагностики			Результаты дефектовки
	Агрегат	Точка Напр.	RPM	y_j^z	$y_j'^z$	Заключение	
1	Агрегат 1	3 Рад	750	-80,13	57,13	Авария	Авария
2		4 Рад		-5,34	-17,66	Норма	Норма
3	Агрегат 2	2 Рад	1500	71,92	-94,92	Норма	Норма
4		3 Рад		-7,50	-15,5	Норма	Норма
5		4 Рад		-10,57	-12,43	Норма	Норма
6	Агрегат 3	2 Рад	1000	-4,06	-18,94	Норма	Норма
7		3 Рад		-17,33	-5,67	Норма	Норма
8		4 Рад		-7,85	-15,15	Норма	Пред.
9	Агрегат 4	2 Рад	1000	-33,44	10,44	Авария	Авария
10	Агрегат 5	2 Рад	750	-19,59	-3,41	Пред.	Пред.
11		3 Рад		-6,76	-16,24	Норма	Норма
12	Агрегат 6	3 Рад	1000	-16,71	-6,29	Норма	Норма
13	Агрегат 7	3 Рад	1000	-22,81	-0,19	Пред.	Пред.
14	Агрегат 8	1 Рад	1000	-33,46	10,46	Авария	Авария
15		2 Рад		-31,53	8,53	Авария	Пред.
16	Агрегат 9	4 Рад	1000	-29,31	6,31	Авария	Авария
17	Агрегат 10	1 Рад	1500	-8,54	-14,46	Норма	Норма
18		2 Рад		-71,05	48,05	Авария	Авария
19		3 Рад		-104,20	81,2	Авария	Авария
20		4 Рад		-33,84	10,84	Авария	Авария

Проведенный сравнительный анализ показал практически полное совпадение результатов автоматизированной диагностики с данными визуальной дефектовки подшипниковых узлов. Из 20 подшипников зафиксировано 18 полных совпадений и 2 неполных совпадений диагнозов. Противоположные заключения (несовпадения вида Норма – Авария или Авария - Норма) отсутствуют. Выявленные неполные совпадения могут быть объяснены невозможностью проведения адекватной визуальной оценки переходных состояний подшипников: Норма – Предупреждение и Предупреждение – Авария.

В настоящее время методика диагностика подшипников качения одновременно по нескольким вибрационным критериям, разработанная автором в рамках настоящей работы, успешно используется для оценки состояния подшипниковых узлов специалистами диагностических подразделений различных производств. С небольшими изменениями (необходимо учитывать влияние зубчатых передач и особенности функционирования агрегатов в режиме переменных нестационарных нагрузок) методика может быть использована и для диагностики подшипниковых узлов таких важных агрегатов, как проходческие и очистные комбайны и скиповые подъемные установки. Предложенный автором подход - переход от вектора диагностических признаков к скалярной величине, для которой при помощи современного математического аппарата [6] без труда могут быть получены пороговые значения различных технических состояний, в настоящее время используется в программе автоматизированной диагностики роторного оборудования SAFE PLANT.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. ВВ. Клюева. Т. 7: Кн.2 Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2005.
2. Герцбах И. Теория надежности с приложениями к профилактическому обслуживанию: Монография. / Под ред. В.В. Рыкова; пер. с англ. М.Г. Сухарева – М.:ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003.
3. Gertsbakh, I. Models of Preventive Maintenance. North-Holland, Amsterdam-New York – Oxford, 1977.
4. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971.
5. Сушко А.Е., Чалый В.Д. Разработка системы периодического контроля состояния подшипников качения / Научная сессия МИФИ-2004: Сборник научных трудов в 14 т. М.: МИФИ, 2004. Т.2. С. 205-206.
6. Сушко А.Е. Разработка норм на допустимые пороговые уровни вибрационного состояния основного оборудования металлургических производств / Научная сессия МИФИ-2006: Сборник научных трудов в 16 т. М.: МИФИ, 2006. Т.2. С. 197-198.