

**ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ
ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ БК-1
НА ПЛАСТИЧНОЙ СМАЗКЕ ВНИИМП-271**

В течении последних трех десятилетий во ВНИИЭМ были проведены многочисленные ресурсные испытания двигателей серии БК-1. На основании их были выпущены отчеты [1-5] с результатами данных испытаний. Приведенная в этих отчетах большая статистика наработок и отказов подшипников качения (ПК) электродвигателей серии БК-1 дает возможность получить уравнения долговечности для приборных ПК, используемых в них.

Известна следующая эмпирическая формула для оценки долговечности приборного ПК [6-7]:

$$L_p = k_p k_t k_1 (C/Q)^{k_2}, \quad (1)$$

где L_p – долговечность ПК с любой заданной вероятностью безотказной работы; k_p – коэффициент надежности ($k_{0,9} = 1$); k_t – температурный коэффициент; k_1, k_2 – коэффициенты, зависящие от величины контактных напряжений и частоты вращения; C – динамическая грузоподъемность; Q – эквивалентная динамическая нагрузка.

Выражение (1) дает неплохую оценку при большой частоте вращения ПК ($n_b = 30000$ об/мин) и использовании смазки ВНИИМП-260. Однако при сравнительно небольших частотах вращения ($n_b = 10000$ об/мин) и использовании других смазок, погрешность при оценке долговечности по формуле (1) быстро возрастает и может достигнуть нескольких порядков.

В работе [8] приведена другая эмпирическая формула для оценки долговечности приборных ПК двигателей серии БК-1:

$$T = \frac{40 \cdot 10^{12}}{d_0 n_b \sigma_m}, \text{ ч},$$

где σ_m – контактное напряжение; d_0 – средний диаметр ПК.

Утверждается, что погрешность при использовании данной формулы не превышает 40%.

По поводу данной формулы следует сделать следующие замечания:

1. Обычно под оценкой долговечности понимается квантиль какого-то уровня.

Например $t_{0,9}$, $t_{0,99}$ и т.п., как в формуле (1). Возможно использование средних наработок до отказа. В данном случае автор работы [8] использовал безотказные наработки в качестве оценки долговечности, что может привести к большой погрешности.

2. Объем выборки, используемый для оценки долговечности ПК очень мал ($N=6 - 12$). Например, если оценить при $N = 6$ нижнюю доверительную границу для вероятности безотказной работы при данной наработке, при доверительной вероятности $\gamma = 0,95$, то согласно [9] получим оценку:

$$\underline{P}^{0,95}(T) = 0,607.$$

Ясно, что подобные оценки не могут удовлетворить высоким требованиям по надежности, предъявляемым в космической технике.

Для получения достаточно точных и надежных уравнений долговечности надо:

- уметь получать оценки долговечности изделий при наличии многократно усеченных выборок для произвольных законов надежности;

- уметь объяснить аналитически зависимость долговечности от ряда существенных факторов.

Экспериментальные исследования отказов приборных ПК [6] показали, что природа их разрушения определяется усталостными повреждениями и потерей смазывающих свойств смазки. В работе [10] было показано, что распределение отказов при усталостных испытаниях подчиняется смеси распределения Вейбулла и логнормального распределения. В этих условиях задача определения достаточно точной оценки долговечности ПК по результатам испытаний является актуальной.

В данной работе для нахождения оценок долговечности ПК по результатам испытаний [1-6] используется методология общего закона надежности, приведенная в работе [10].

Из работ [11-13] следует, что долговечность ПК сложным образом зависит от поведения ряда факторов: λ_a , σ_m , $f_{ц}$ и др. Одним из важнейших факторов является параметр λ_a :

$$\lambda_a = h_0/R_a,$$

где h_0 – толщина пленки смазки в ПК; R_a – шероховатость поверхностей контакта в ПК (для данных ПК $R_a = 0,125$ мкм).

В ряде работ было отмечено, что при данной смазке и σ_m с ростом частоты вращения ПК h_0 начинает расти, а затем достигнув максимума, начинает падать.

Причин данного явления существует несколько:

- растет центробежная нагрузка на тела вращения;

- проявляется эффект масляного голодания;
- ламинарное течение смазки сменяется на турбулентное.

В работах [11-13] были получены уточнения уравнения для определения толщины пленки смазки h_0 :

$$h_0 = \{0,4 \cdot 2^{1,5} n^{1/6} / 3^{1/3} (E^1/W)^{1/6} R^{1/2} \alpha K_0 [u (1-u/u_{пр})^{3,7}]^n \times \\ \times (4+2/n)^n I(n)\}^{1/(n+1/3)}, \quad (2)$$

где E^1 – приведенный модуль Юнга, $E^1 = 2,08 \cdot 10^5$ МПа; W – погонная нагрузка, кГ/м; u – скорость смазки, м/с; R – приведенный радиус поверхностей, м; α – пьезокоэффициент вязкости смазки, 1/МПа; K_0, n – реологические параметры пластичной смазки, представленной в виде модели Бакли-Гершеля [14]:

$$\tau = \tau_0 + K_0 |\dot{\gamma}|^{n-1} \dot{\gamma};$$

τ – напряжение сдвига; τ_0 – остаточный предел текучести; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, (при этом вязкость пластичной смазки равна $\mu_{см} = \tau/\dot{\gamma}$); $u_{пр}$ – предельная скорость смазки, зависящая от предельной частоты вращения ПК;

$$I(n) = \Gamma(n+2/3) \cdot \Gamma(n+1/3) / 2/\Gamma(2 \cdot n+1);$$

$$W = Q_{max} / 2a;$$

$2a$ – большая ось эллипса деформации; Q_{max} – максимальная нагрузка на шарик;

$$2a = 0,0472 \mu (Q_{max} / \Sigma\rho) \cdot 10^{-3}, \text{ м};$$

$$\Sigma\rho = 1/d_{ш} (4 - 1/f_b + 2\gamma/(1-\gamma)), \quad R = 1 / \Sigma\rho,$$

$$u = \pi n_b / 120 / d_0 [d_0^2 - d_{ш}^2 \cdot \cos^2 \alpha_k],$$

$d_{ш}$ – диаметр шарика, мм; α_k – угол контакта.

Для определения Q_{max} используем методику работы [15]. Так как данные ПК являются радиальными и имеется осевая и радиальная составляющие нагрузки, то α_k определяется выражением:

$$\text{tg } \alpha_k = F_a / F_r.$$

Откуда согласно [15 (Таблица 12)] имеем $\varepsilon = 0$, $F_a / F_r \cdot \text{tg } \alpha_k = 1$, $I_r(0) = 1/z$ и согласно [15 формула(36)] имеем

$$Q_{max} = F_r / \cos \alpha_k = F_a / \sin \alpha_k, \quad (3)$$

где z – число шариков в ПК.

Контактное напряжение равно:

$$\sigma_m = 187 / \mu/\nu(Q_{max} \Sigma \rho^2)^{1/3}, \quad (\text{кГ/мм}^2), \quad (4)$$

где параметры μ , ν находятся из [15 (Таблица 5)] в зависимости от значения cost :

$$\text{cost} = (1/f_B + 2\gamma/(1-\gamma)) / (4 - 1/f_B + 2\gamma / (1-\gamma)),$$

$$\gamma = d_{ш} / d_0 \cdot \cos \alpha_k, \quad f_B = 0,52 .$$

Так как пьезокоэффициент вязкости для пластичной смазки (ПС) ВНИИНП-271 неизвестен, то возьмем в качестве первого приближения пьезокоэффициент вязкости самого вязкого масла МС-20 [16]:

$$\alpha = 0,1(0,3045 - 0,00159T), \quad 1/\text{МПа}, \quad (5)$$

где T – температура, °С.

Для ПС ВНИИНП-271 имеем следующие зависимости $K_0=K_0(T)$ и $n = n(T)$ (рис. 1 и 2):

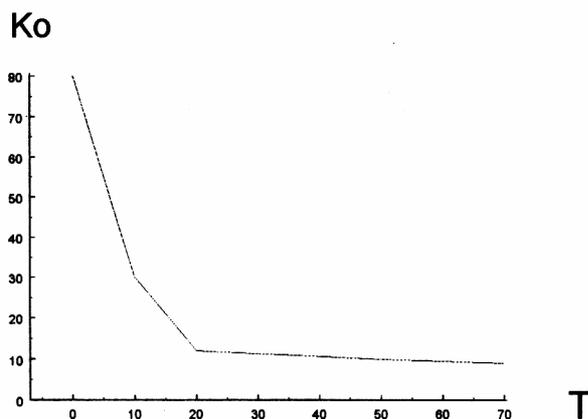


Рис. 1. Зависимость вязкостного параметра K_0 от температуры T

Как видно из рис. 2 реологический параметр n смазки ВНИИНП-271 достигает максимума при $T=20^\circ\text{C}$, а затем при росте T начинает падать.

Из уравнения (2) для толщины пленки смазки видно, что он является одним из важнейших параметров для определения режима смазки подшипника качения. Если данный параметр будет иметь малое значение, то ПК может начать работать при граничном ре-

жиме смазки и его долговечность будет невелика. Если же параметр n будет достаточно велик, ПК начнет работать при гидродинамическом режиме смазки и долговечность ПК будет максимальна.

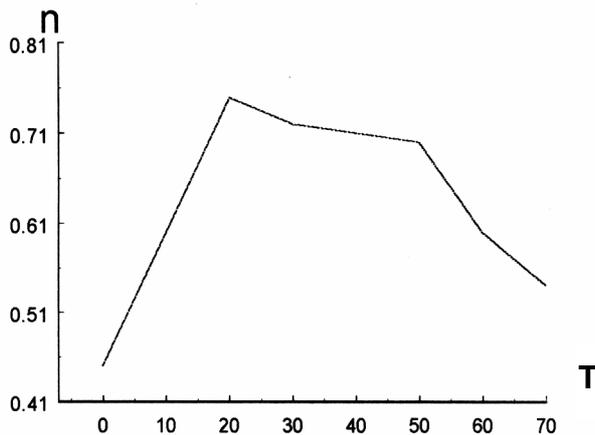


Рис. 2. Зависимость вязкостного параметра n от температуры T

ПК двигателей БК-1 работали при $T=70^\circ\text{C}$ – температура внутреннего кольца ПК с учетом перегрева. При этом будем иметь: $K_0(70) = 9\text{Па}\cdot\text{C}^n$; $\tau_0(70) = 50\text{Па}$; $n(70) = 0,54$; $\alpha(70) = 0,01932\text{ 1/МПа}$.

Частота циклов контактных напряжений равна:

$$f_{\text{ц}} = 60 n_{\text{в}} z (d_{\text{ш}} + d_0 \cos\alpha_{\text{к}}) / 2 d_0 2\psi_1 / 360, \text{ цикл/ч}, \quad (6)$$

где $\psi_1 = \arccos(1-2\varepsilon)$, $\varepsilon = 1/2(1 + \delta_{\alpha}/\delta_r \text{tg } \alpha_{\text{к}})$ – для ПК с одним рядом тел качения; ψ_1 – угол зоны нагружения; δ_{α} , δ_r – перемещения внутреннего кольца относительно наружного в осевом и радиальном направлении.

При наличии осевой нагрузки в ПК $\psi_1 = 180^\circ$.

В таблице приведены данные по используемым для анализа типам двигателей БК-1, ПК и основным факторам, влияющим на долговечность ПК, рассчитанные по формулам (2) – (6). Кроме того, приведены также оценки долговечности ПК – $t_{0,9}$, полученные с помощью вычислительной программы «Ravik3».

Как видно из таблицы, контактное напряжение σ_m очень мало изменяется для всех габаритов двигателей и лежит в пределах $91,3 - 100,7\text{ кГ/мм}^2$. Поэтому основным нагрузочным фактором для ПК является частота вращения или частота циклов нагружения. Частота вращения меняется в широких пределах от $3000 - 10000\text{ об/мин}$.

п/п	Тип двигателя БК-1	Тип подшипника	Число отказов/Объем выборки	d_0 , мм	$d_{ш}$, мм	z	n_v , об/м	$f_{ш} \cdot 10^{-6}$, цикл/ч	σ_m , кг/мм ²	h_0 , МКМ	λ_a	$t_{0,9}$, ч	v
1	1323 (1324)	25-800 33ю	1/78	6,6	1,59	7	3000 (4000)	0,851	100,1	0,00428	0,0342	64344	0,605
2	1316	- " -	2/200	6,6	1,59	7	6000	1,532	100,4	0,00492	0,0394	101359	0,4
3	1317 (1318)	- " -	3/52	6,6	1,59	7	7500 (10000)	2,128	100,7	0,00486	0,0389	34367	0,216
4	1414	25-800 74ю	4/36	8,2	2,38	6	4000	0,912	87	0,00639	0,0511	50210	0,254
5	1418	- " -	5/26	8,2	2,38	6	10000	2,28	88,55	0,00549	0,0439	23750	0,347
6	1423 (1424, 1425)	- " -	6/166	8,2	2,38	6	3000 (4000, 5000)	0,8	86,8	0,00616	0,0493	30556	0,258
7	1533 (1534)	25-800 65ю	7/42	10	3,18	6	3000 (4000)	0,779	91,85	0,00603	0,0482	23028	0,365
8	1518	- " -	8/22	10	3,18	6	10000	2,338	95,17	0,00610	0,0488	20325	0,3
9	1526	- " -	9/102	10	3,18	6	6000	1,402	92,9	0,00434	0,0347	40464	0,203
10	1826	25-800 58ю	11/30	17,75	4,76	7	6000	1,581	91,3	0,00473	0,0378	10014	0,333

На рис.3 показано изменение долговечности ПК $t_{0,9}$ (ч) в зависимости от n_b (об/мин) для трех габаритов двигателей.

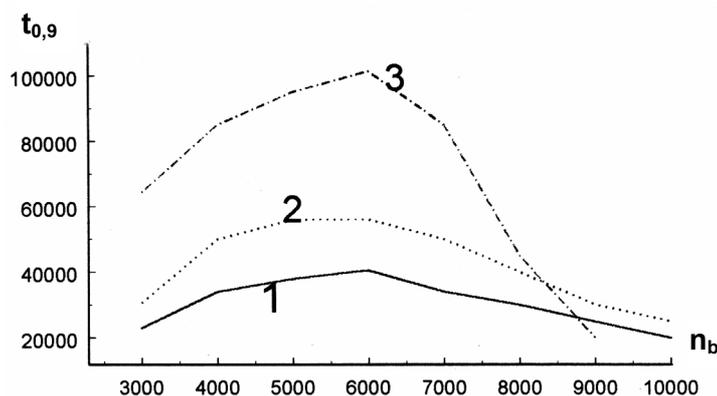


Рис. 3. Зависимость долговечности ПК от n_b для трех габаритов двигателей БК-1:

1 – 3-й габарит ($d_0=6,6$ мм); 2 – 4-й габарит ($d_0=8,2$ мм); 3 – 5-й габарит ($d_0=10$ мм)

Полученные закономерности изменения долговечности приборных ПК в зависимости от частоты вращения при данном контактом напряжении, температуре и типе смазки позволяют сделать три вывода:

1. Оптимальная частота вращения двигателей типа БК-1 лежит в районе 6000 об/мин.

2. Формула предельной частоты вращения, рекомендованная справочниками, в данном случае не верна. Так, согласно [15], для ПК 1-го габарита двигателей будем иметь:

$$n_{пр} = \frac{(d_0 n)_{к}}{d_0} = \frac{4,5 \cdot 10^5}{6,6} = 70000 \text{ об/мин.}$$

3. Долговечность ПК обратно пропорциональна среднему диаметру ПК, таким образом действует так называемый “масштабный” фактор.

При этом возникает вопрос – что вызывает увеличение долговечности при увеличении частоты вращения до $n_{опт}$. Единственное объяснение – это учет влияния толщины пленки смазки h_0 и, соответственно, фактора λ_a . Ибо, как следует из формулы (2), с ростом n до определенного предела растет h_0 и λ_a и, следовательно, улучшается режим смазки ПК. При этом, для того, чтобы поведение

фактора λ_a , соответствовало поведению $t_{0,9}$ в зависимости от n_B (рис.3) необходимо правильно выбрать величину $u_{пр}$. Путем пробных подсчетов это удалось сделать. Получили, что $u_{пр} = 5,3$ м/с. Как следует из таблицы, при этом фактор λ_a , также растет с ростом n_B до оптимальной величины, а затем начинает падать.

Итак, в данном случае получили следующие факторы, влияющие на долговечность ПК:

$$t_{0,9} = f(\lambda_a, f_{ц}, d_0, \sigma_m).$$

Методология нахождения уравнения долговечности ПК в зависимости от этих факторов достаточно полно изложена в работах [12-13]. Используя вычислительную программу КАР10s найдем уравнения долговечности ПК для 3, 4, 5 и 8 габаритов двигателей БК-1:

при $3000 < n < 6000$ об/мин

$$t_{0,9} = 10^{-0,6923} \frac{\sigma_m^{6,782} \lambda_a^{3,399}}{d_0^{3,774}}, \text{ ч};$$

при $6000 < n < 10000$ об/мин

$$t_{0,9} = 10^{30,7} \frac{\lambda_a^{2,823}}{f_{ц}^{3,232} d_0^{2,116}}, \text{ ч},$$

где σ_m (кГ/мм²), $f_{ц}$ (цикл/ч), d_0 (мм), λ_a (безразмерный).

Погрешности долговечности ПК данных формул не превышают 2% от экспериментальной долговечности, приведенной в таблице.

Выводы

1. Проведенное исследование долговечности приборных ПК двигателей серии БК-1 на пластичной смазке ВНИИНП-271 показали, что основными факторами, влияющими на долговечность ПК являются $\lambda_a, f_{ц}$ и d_0 .

2. Показано, что при данных нагрузках и типе смазки существует оптимальная долговечность ПК.

3. Для повышения долговечности двигателей БК-1 имеет смысл применить другие смазки с лучшими реологическими характеристиками, например ВНИИНП-260, ВНИИНП-288 и т.п.

4. Используя полученные уравнения долговечности ПК можно решить задачу ускоренных испытаний, например повышая температуру смазки ПК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ресурсные испытания и оценка надежности электродвигателей малой мощности. Технический отчет ОАГ.129.375. ВНИИЭМ. М.: 1986.
2. Оценка долговечности и безотказности бесконтактных электродвигателей постоянного и переменного тока по результатам ресурсных испытаний. Технический отчет ОАБ.126.962. ВНИИЭМ. М.: 1978.
3. Исследование и повышение надежности бесконтактных микродвигателей постоянного и переменного тока систем управления. Технический отчет ОАБ.126.798. ВНИИЭМ. М.: 1972.
4. Результаты ресурсных испытаний и оценка количественных показателей надежности электродвигателей малой мощности. Технический отчет ОАБ.126.863. ВНИИЭМ. М.: 1975.
5. Оценка безотказности и долговечности бесконтактных электродвигателей малой мощности. Технический отчет ОАБ.127.974. ВНИИЭМ. М.: 1980.
6. Расчет долговечности высокоскоростных приборных подшипников в зависимости от основных эксплуатационных условий / Ружальский В.З., Бауэр А.В., Жевтунов В.П. // Труды ВНИПП. М.: 1976. № 3.
7. Исследование долговечности высокооборотных шариковых подшипников, работающих при температуре менее 100⁰С / Ружальский В.З., Рюмина Э.М. // Труды ВНИПП. М.: 1987. №3.
8. Опыт проектирования и эксплуатации опор качения электродвигателей научной и служебной аппаратуры в космических аппаратах / Михайлов Е.М. // Труды ВНИИЭМ. М.: 1998. Т. 98.
9. Статистические задачи обработки систем и таблицы для числовых расчетов показателей надежности. Под редакцией Р.С.Судакова. М.: Высшая школа. 1975.
10. Методология для определения закона надежности усталостных испытаний / Баскин Э.М. // Электротехника. 1999. №6.
11. Об оценке долговечности приборных подшипников качения / Баскин Э.М. // Надежность и контроль качества. 1990. №5.
12. Уравнения долговечности приборного подшипника качения для различных режимов смазки / Баскин Э.М. // Трение и износ. Том 12. №5. 1991.
13. Уравнения долговечности силового подшипника качения при различных режимах смазки / Баскин Э.М. // Проблемы машиностроения и надежность машин. 1993. №5.
14. Реологические и теплофизические свойства пластичных смазок / Фройштетер Г.Б., Трильский К.К., Ищук Ю.Л., Ступак П.М. // М.: Химия. 1980.
15. Подшипники качения / Перель Л.Я. // Справочник. М.: Машиностроение. 1983.
16. Контактная гидродинамика смазки деталей машин / Коднир Д.С. // М.: Машиностроение. 1976.