

О ВЫБЕГЕ РОТОРОВ НА СТРАХОВОЧНЫХ ПОДШИПНИКАХ

А.П. Воловик, В.А. Воронкин
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Рассмотрены подшипники качения, применяемые в качестве страховочных подшипников для отладки или при аварийном отказе оборудования в мощных роторных машинах на магнитных опорах. Приведен пример расчета для случая, когда страховочные подшипники посажены по наружному кольцу, а внешний зазор находится между неподвижным внутренним кольцом СП и валом. Целью данного расчета является определение нагрузок, при которых режим выбега ротора будет наиболее оптимальным.
Ключевые слова: магнитные опоры, страховочные подшипники, выбег ротора.

Конструкции мощных роторных машин на магнитных опорах (нагнетатели, электродвигатели, турбопривода), как правило, в своем составе имеют страховочные узлы с подшипниками качения (ПК), предназначенные для работы как при отладке магнитного подвеса, так и при его аварийном отказе. Страховочные подшипники (СП) устанавливаются с гарантированным внешним радиальным зазором либо по наружному, либо по внутреннему кольцу СП. В период выбега в зависимости от вида движения ротора (вала) внутри свободного внешнего зазора нагрузка на СП может превысить допустимые пределы.

Специфика расчёта ПК, используемого в качестве СП, состоит в том, что стандартные зависимости, применяемые в расчетах ПК, в данном случае не приемлемы, так как усталостная прочность, традиционно определяющая долговечность ПК, не является критерием работоспособности СП. Кроме того, во многих случаях СП используется при частотах вращения в несколько раз превышающих допустимые частоты вращения применяемых ПК. При использовании в СП пластичной смазки (ПС) этот граничный каталожный показатель может быть в три и более раз меньше частоты вращения ротора нагнетателя в начале выбега. Инерционные силы, действующие на комплект стальных шаров и массивный сепаратор СП при падении ротора на СП с частот вращения превышающих 8000 1/с, могут привести к резкому возрастанию тепловых потерь в СП и его заклиниванию.

Очевидно, что главным и при определении работоспособности СП являются его контактная прочность, температурный режим, гарантирующий сохранение достаточного радиального зазора в СП, а также обеспечение благоприятного динамического режима в период выбега ротора машины, при котором не возникает критического роста нагрузки на СП. Актуальным является оптимизация конструкции собственно СП.

Рассмотрим случай, когда страховочные подшипники посажены по наружному кольцу, а внеш-

ний зазор находится между неподвижным внутренним кольцом СП и валом.

Допустим, что на опоры горизонтального ротора A и B действуют статические силы \overline{Q}_A и \overline{Q}_B (постоянные по величине и по направлению), а также динамические силы \overline{P}_A и \overline{P}_B , вращающиеся вместе с ротором.

Будем понимать под динамическим возбуждением ротора не только неуравновешенность ротора, но и возбуждение ротора от перекатывания шаров СП по неидеальной дорожке качения, а также от движения вала по геометрическим несовершенствам формы внутренней поверхности внутреннего кольца СП, величины которых, как будет показано далее, сопоставимы с величиной остаточной неуравновешенности роторов.

При сделанном допущении можно считать, что во время вращения неуравновешенного ротора на его опоры действуют результирующие силы:

$$\begin{aligned}\overline{R}_A &= \overline{Q}_A + \overline{P}_A; \\ \overline{R}_B &= \overline{Q}_B + \overline{P}_B,\end{aligned}$$

которые являются переменными, как по величине, так и по направлению.

Оценим силовое возбуждение в плоскости каждого СП величиной коэффициентов K_A и K_B , как отношения между динамическими и статическими силами, действующими на ротор:

$$K_A = \overline{P}_A / \overline{Q}_A; \quad K_B = \overline{P}_B / \overline{Q}_B.$$

В зависимости от величины коэффициентов K_A и K_B можно разграничить три режима [1] при выбеге ротора на СП: первый – $K_{A,B} < 1$, второй – $K_{A,B} = 1$, третий – $K_{A,B} > 1$. При исследовании режимов работы ротора в дальнейшем ограничимся рассмотрением явлений на опоре A , допуская, что влияние опоры B на опору A несущественно.

Первый режим $K_A < 1$

Обозначим центр вала ротора, внутри СП, как O_1 . Тогда вектор динамической силы $P_A = \text{const}$ бу-

дет вращаться вместе с ротором, а его годографом будет окружность радиуса равного модулю вектора \vec{P}_A . Покажем на рис.1 вектор \vec{P}_A , образующий с вертикальной осью O_1y угол φ . В результате сложения вектора \vec{P}_A с вектором \vec{Q}_A , постоянным по величине и направлению (вес ротора, приходящийся на СП), получим суммарный вектор силы \vec{R}_A для некоторого момента времени t . Если операцию сложения векторов \vec{P}_A и \vec{Q}_A повторять для различных моментов времени, получим геометрическое место концов вектора \vec{R}_A , т. е. годограф вектора \vec{R}_A (см. рис.1). Очевидно, что годограф вектора силы \vec{R}_A будет также окружность, радиус которой равен модулю вектора \vec{P}_A , но только она будет описана из центра O_2 , смещенного относительно центра O_1 по линии действия вектора \vec{Q}_A на величину модуля вектора \vec{Q}_A . Конец вектора \vec{R}_A движется по своему годографу с постоянной линейной скоростью: $V_0 = \omega b$, где ω – угловая частота вращения ротора; b – радиус окружности O_2 (см. рис. 1). Это свойство годографа сил \vec{R}_A следует из механизма параллелограмма (рис. 2), построенного на векторах \vec{P}_A и \vec{Q}_A [1]. Из свойства годографа можно показать, что величина и направление вектора \vec{R}_A изменяются периодически, причем частота этого изменения численно равна частоте вращения вала. Вектор \vec{R}_A изменяется по величине в пределах: $(Q_A - P_A) \leq R_A \leq (Q_A + P_A)$ и может иметь любое направление, заключенное между лучами O_1a и O_1b угла $2\alpha_0$ (см. рис. 1). При первом режиме центр вала ротора будет совершать относительно внутреннего кольца СП колебательное движение по дуге окружности радиуса $\delta = \Delta/2$, где Δ – диаметральный зазор между валом ротора и внутренней поверхностью внутреннего кольца СП. Если провести из центра O (рис. 3) два луча, касательные к годографу силы \vec{R}_A (см. рис. 1), то очевидно, что дуга ab является геометрическим местом контактирования вала ротора и внутренней поверхности внутреннего кольца СП.

Таким образом, при условии $K_A < 1$, т. е. когда динамические силы, воздействующие на ротор, меньше статических, вал ротора, вращаясь с угловой частотой ω , будет совершать внутри внутреннего кольца СП маятниковые пространственные колебания с угловой амплитудой, примерно равной α_0 , относительно оси Oy (см. рис. 3). Длина дуги ab :

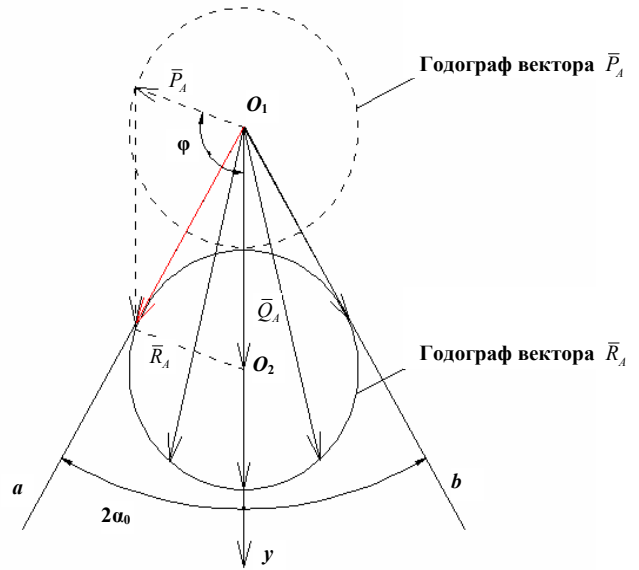


Рис. 1. Вектор силы \vec{R}_A для первого режима

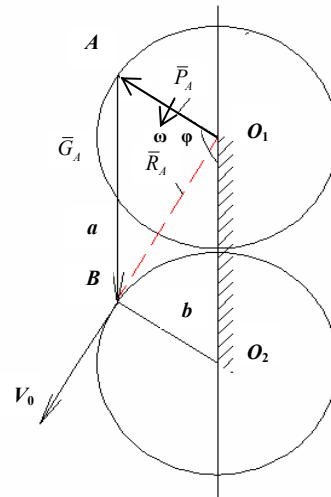


Рис. 2. Направление постоянной линейной скорости



Рис. 3. Изменение положения центра вала ротора для первого режима

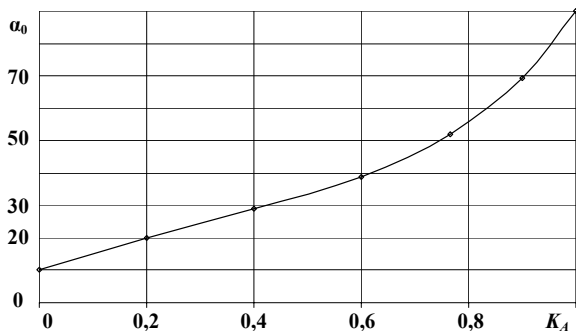


Рис. 4. График функции $\alpha_0 = f(K_A)$

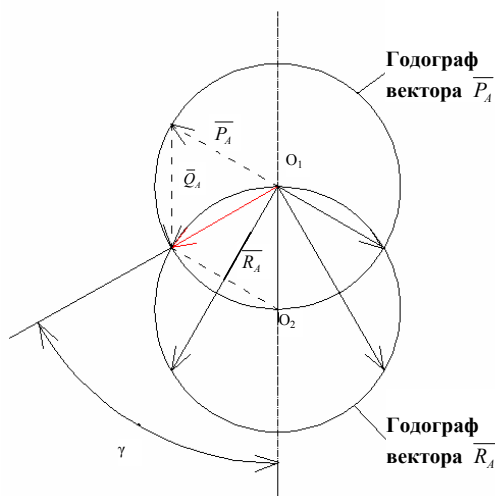


Рис. 5. Вектор результирующей силы для второго режима

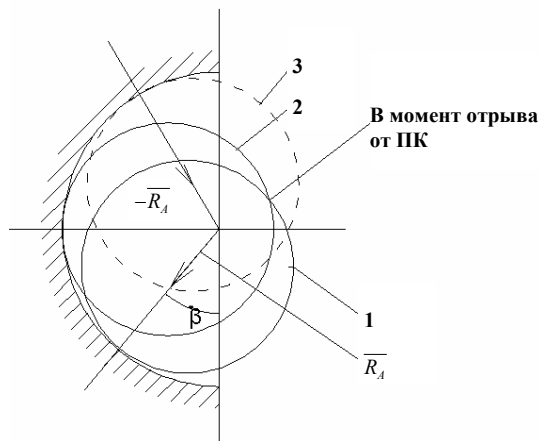


Рис. 6. Положение вала во внутреннем кольце СП

$L_{ab} = 2r\alpha_0$, где r – радиус внутреннего кольца. График функции $\alpha_0 = f(K_A)$ показан на рис. 4.

Из графика видно, что с увеличением коэффициента K_A возрастает амплитуда маятниковых колебаний центра вала, а, следовательно, и длина контактной дуги ab ПК.

Второй режим $K_A = 1$

Годограф вектора $\overline{R_A}$ для случая $K_A = 1$ показан на рис. 5, из которого следует, что величина силы $\overline{R_A}$ изменяется по гармоническому закону: $R_A = 2P_A \cos(\omega/2)t$, где ω – угловая частота вращения ротора; P_A – динамическая составляющая силы $\overline{R_A}$.

Если условиться силу $\overline{R_A}$ считать положительной, когда она прижимает вал к ПК (а в противном случае отрицательной), то на вал будет действовать положительная сила $\overline{R_A}$ только в том случае, когда угол β (рис. 6), определяющий положение центра вала внутри ПК, удовлетворяет неравенствам:

$$0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ;$$

$$270^\circ < \beta \leq 360^\circ,$$

1, 2, 3 – последовательные положения вала во внутреннем кольце СП.

Сила $\overline{R_A}$ остается положительной все время, пока центр вала ротора находится в двух нижних четвертях осевой проекции СП. Если же центр вала смещается в одну из двух верхних четвертей (в зависимости от направления вращения), то на вал будет действовать отрицательная сила $\overline{R_A}$, направленная к центру ПК.

Теоретически отрыв вала от ПК происходит при угле $\beta = 90^\circ$, т. е. когда сила $Q_A = P_A$ и они противоположно направлены. Движение центра вала после отрыва от ПК происходит по некоторой кривой окружности радиуса δ , где $\delta = \Delta/2$, до тех пор, пока вал не ударится о внутреннее кольцо СП (рис. 7).

Затем этот цикл будет повторяться. Таким образом, при втором режиме происходят периодические удары вала о СП, при чем частота ударов близка к частоте вращения ротора.

На практике значение критического коэффициента K_A^* второго режима можно расширить до диапазона $0,8 < K_A^* < 1,2$.

Третий режим $K_A > 1$

Из рис. 8 видно, что конец вектора $\overline{R_A}$ движется по своему годографу так же, как и при первом и втором режимах, с постоянной линейной скоростью. При этом вектор $\overline{R_A}$ изменяется по модулю $|\overline{R_A}|$ в зависимости от угла γ согласно рис. 9 (за единицу измерения силы $\overline{R_A}$ принято ее значение, равное $\overline{P_A}$) и вращается с некоторой переменной угловой скоростью ω_2 . При этом ω_2 равна [1]:

$$\omega_2 = \omega \frac{|\overline{P}_A| \times (|\overline{Q}_A| \cos \omega, t + |\overline{P}_A|)}{P_A^2 + Q_A^2 + 2|\overline{P}_A| \times |\overline{Q}_A| \cos \omega, t},$$

где ω – угловая частота вращения вала; ω_2 – переменная частота обката вала по внутреннему кольцу СП. График $\lambda = \omega_2/\omega$ при $K_A = \overline{P}_A/\overline{Q}_A = 4$ представлен на рис. 10.

Вектор \overline{R}_A вращается со скоростью ω_2 и остается все время положительным, что следует из рис. 9. Вал в этом случае всегда будет прижат к ПК. При третьем режиме работы центр вала будет двигаться в одном направлении по окружности радиуса, равного половине зазора Δ (см. рис. 3). При движении (рис.10) вал будет всегда обращен к ПК одной стороной (половиной). Рассмотрим, например, нижнее и верхнее положение вала в СП. В нижнем положении заштрихуем ту часть вала, которая обращена к ПК. Из рис.11 следует, что при переходе из нижнего в верхнее положение вала вектор \overline{R}_A поворачивается на 180° . Из годографа \overline{R}_A (см. рис. 8) видно, что при $\gamma = 0^\circ$ и $\gamma = 180^\circ$ векторы \overline{R}_A и \overline{P}_A совпадают по направлению. Отсюда, очевидно, что вектор \overline{R}_A и вектор \overline{P}_A и, следовательно, ротор относительно которого вектор \overline{P}_A неподвижен, одновременно повернутся на угол 180° при переходе из нижнего положения в верхнее, и при этом вал снова окажется обращенным к ПК той же стороной. Однако в связи с тем, что $\omega_2 \neq \omega_1$, вал в процессе вращения вокруг своей оси и орбитального движения внутри внутреннего кольца СП будет совершать на углах от 0 до 360° орбитальное вращение с переменной угловой частотой, причем на угле 180° частота орбитального вращения вала будет максимальна, а на угле 0° – минимальна (см. рис. 10).

Следует учитывать, что по мере износа вала увеличивается расстояние от центра массы ротора до оси вращения, вследствие чего возрастает сила \overline{R}_A , а это в свою очередь, приводит к увеличению интенсивности износа СП и вала. Поэтому в третьем режиме имеет место прогрессивный износ вала и СП. Если учесть, что в таком режиме действуют значительно неуравновешенные силы, превышающие статическую нагрузку на СП, то, очевидно, этот режим является наиболее неблагоприятным для выбега ротора агрегата.

В качестве практического примера определим вид режима выбега ротора электродвигателя мощностью 6,3 МВт в СП 1000928Л ГОСТ 8338. Система классов точности балансировки для этих роторов ЭД регламентирует 3 класс точности балансировки по ISO – значение произведения удельного дисбаланса $e_{ст}$ на максимальную эксплуатационную уг-

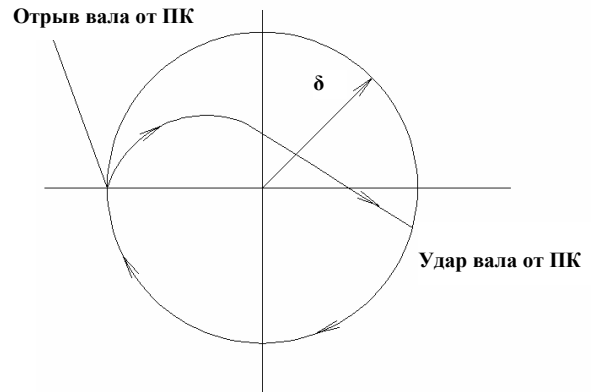


Рис. 7. Изменение положения центра вала ротора для второго режима

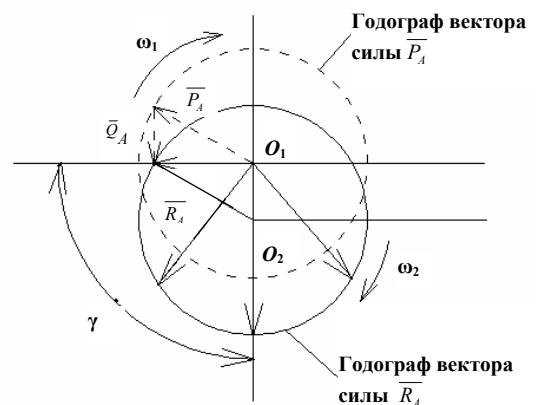


Рис. 8. Вектор результирующей силы для третьего режима

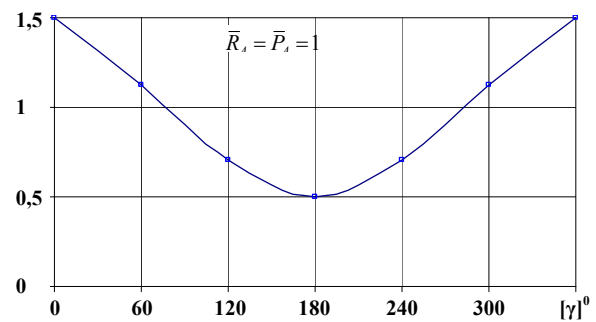


Рис. 9. Зависимость вектора R_A от угла поворота вала

ловую скорость вращения $\omega_{3 \max}$, т. е. $e_{ст} \omega_{3 \max}$ (мм·рад/с) равно: наименьшее 1,00 наибольшее 2,50. Величина наибольшего дисбаланса 2,5.

Верхнее значение главного вектора допустимых дисбалансов равно [2]: – для ротора, балансируемого в изделии в сборе: $D_{ст.доп.верх} = m_{рот} e_{ст.табл}$; для ротора, балансируемого в виде отдельной детали: $D_{ст.доп.верх} = m_{рот} e_{ст.табл} - D_{ст.т}$, где $m_{рот}$ – масса ротора в сборе; $e_{ст.табл}$ – табличное значение удельного дисбаланса, определяемое для данного изделия по верхней границе класса точности балансировки; $D_{ст.т}$ – значение

главного вектора технологических дисбалансов; $D_{ст.т} = m_{рот} e_{ПК}$, где $m_{рот}$ – масса ротора; $e_{ПК}$ – наибольшее возможное смещение центра масс ротора от несовершенства геометрии внутреннего кольца ПК (колебания толщины внутреннего кольца по дорожке качения); $e_{ПК} = 0,5(\delta_1)$, где δ_1 – диаметральный биение дорожки качения внутреннего кольца ПК в сборе, мм.

Для ротора ЭД 6,3 МВт значение $e_{ст.табл} = 0,00176$ мм. Величина δ_1 для СП 1000928Л с внутренним диаметром 140 мм приведена в таблице.

Класс точности СП	δ_1 , мм	Коэффициент дисбаланса K_A	Динамические нагрузки от дисбаланса на один СП, кг	Ожидаемый режим
0	0,030	1,2	731	третий
6	0,018	0,73	438	первый
5	0,008	0,325	195	первый
4	0,006	0,24	146	первый

Динамическая нагрузка от дисбаланса: $P = m_{рот} e \omega^2$, где ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с; $\omega = (\pi/30)n_{пр}$; $n_{пр} = 8610$ об/мин; $\omega = (3,14/30)8610 = 901$ рад/с; $e = 0,5\delta_1 + e_{ст.табл}$.

Результаты расчета динамических нагрузок от дисбаланса при выбеге ротора в СП, коэффициента дисбаланса и ожидаемый режим работы в зависимости от класса точности ПК при номинальной радиальной нагрузке от веса ротора показаны в вышеприведенной таблице.

Оценка возможного режима работы СП при выбеге ротора сделана со следующими допущениями: опора А и опора В одинаковы и их взаимное влияние отсутствует; дисбаланс опоры А равен дисбалансу опоры В; ротор и корпус ЭД абсолютно жесткие; ротор и кольцо ПК работают без проскальзывания. Расчетные величины радиальных биений СП принимались равными максимальной величине.

Выводы и рекомендации для рассмотренных в примере рабочих условиях использования СП:

1. Для принятых условий работы ротора с СП 1000928Л класса точности 0 может иметь место третий режим работы при выбеге, т. е. полный обкат ротора по внутренней поверхности внутреннего кольца СП. При этом могут возникать значительные дополнительные динамические силы, действующие на СП. Ротора с СП 1000928Л классом точно-

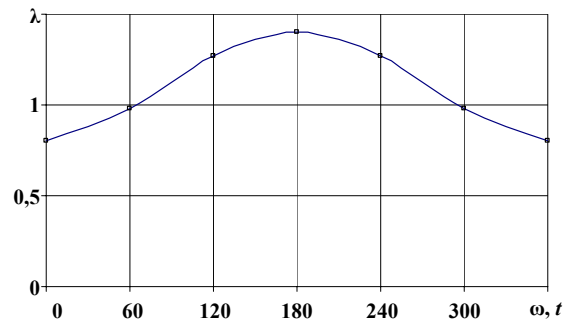


Рис. 10. Зависимость скорости от угла поворота вала для случая $K_A = 4$

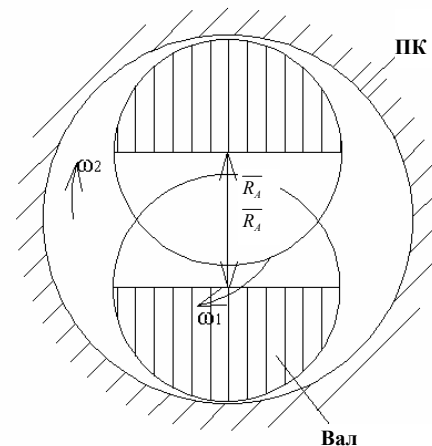


Рис. 11. Переход вала из нижнего в верхнее положение во внутреннем кольце подшипника

сти 6 и выше имеют режим маятниковых колебаний. Такой режим является наиболее предпочтительным для СП, так как он не связан со значительным увеличением нагрузок на СП.

2. В рассмотренных рабочих условиях при конструктивно заданном типоразмере СП (1000928Л) следует применять ПК не хуже 5 класса точности с увеличенным начальным радиальным зазором (не ниже С3) и лёгким преднатягом. Для повышения надёжности целесообразно использовать бессепараторные радиально-упорные подшипники с керамическими шарами (уменьшенная масса и отсутствие тенденции к схватыванию) и сухой смазкой на основе дисульфида молибдена.

3. Время выбега ротора должно быть предельно ограничено.

Литература

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. – М.: Наука, 1988.
2. Гост 22062-76 и методические указания. Система классов точности балансировки. – М.: Изд. Стандартов, 1977.

Поступила в редакцию 14.01.2009

Анна Петровна Воловик, инженер, т. 366-33-56.
 Вячеслав Анатольевич Воронкин, канд. техн. наук, начальник лаборатории, т. 366-33-65.
 E-mail: vniiem@vniiem.ru.