

15 ПІДШИПНИКИ КОЧЕННЯ

15.1 Конструкція. Переваги й недоліки

Підшипник кочення (рис. 15.1) у загальному випадку складається із зовнішнього кільця 1, внутрішнього кільця 2, тіла кочення 3 і сепаратора 4, який суттєво зменшує втрати на тертя.

Підшипники кочення стандартизовані. Їх виготовляють в умовах високоспеціалізованого масового виробництва підшипникові заводи. Тому інженерові вкрай рідко доводиться проектувати підшипники кочення. Незрівнянно частіше потрібно підібрати підшипник для вузла опори, спроектувати корпус опори, забезпечуючи технологічність, контроль і ремонтпридатність вузла, а також оцінити залишкову довговічність підшипника при модернізації або формуванні режиму роботи встаткування.

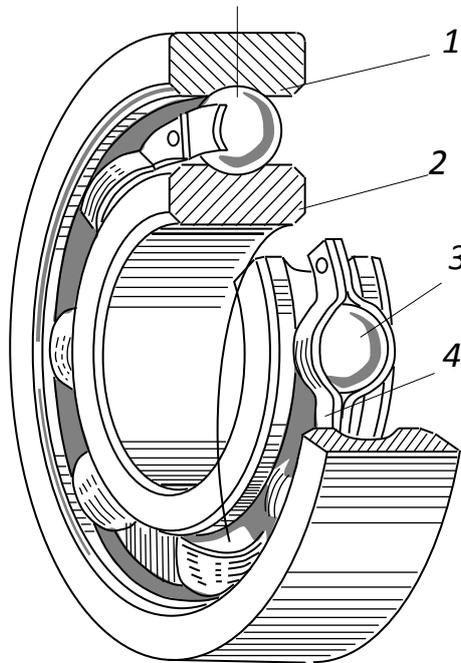


Рисунок 15.1 – Конструкція радіального кулькового підшипника

Кулькові підшипники швидкохідніші та дешевші від роликових, які мають вищу навантажувальну здатність, потребують жорстких валів і самі більш жорсткі, ніж кулькові підшипники.

Голчасті підшипники використовують при:

- дуже стиснених радіальних габаритах;
- колових швидкостях вала d /с;
- коливальних рухах (муфти карданних валів, поршневі пальці).

15.2 Класифікація

Підшипники кочення класифікують по наступних ознаках (табл. 15.2).

Таблиця 15.2 – Класифікація підшипників кочення

№ п/п	Ознака	Тип підшипника
1	<p>Форма тіла кочення:</p> <p>Кулька</p> <p>Ролик:</p> <ul style="list-style-type: none"> - короткий і довгий циліндричний (рис. 15.3, а, б); - витий (рис. 15.3, в); - конічний (рис. 15.3, д); - бочкоподібний (рис. 15.3, г, е); - голчастий (рис. 15.3, ж). 	<p>Кулькові (рис. 15.2)</p> <p>Роликові (рис. 15.3) (рис. 15.4, а, б)</p> <p>(рис. 15.4, г)</p> <p>(рис. 15.4, в)</p> <p>(рис. 15.4, д)</p>
2	<p>Напрямок сприйманого навантаження:</p> <ul style="list-style-type: none"> - тільки радіальне навантаження; - комбіноване (радіальне і осьове) навантаження; - осьове або переважно осьове навантаження; - тільки осьове навантаження 	<p>Радіальні (рис. 15.2, а, в); (рис. 15.3, а, б, в, д)</p> <p>Радіально-упорні (рис. 15.2, б, г); (рис. 15.3, г)</p> <p>Упорно-радіальні (рис. 15.2, д)</p> <p>Упорні (рис. 15.2, е)</p>
3	По числу рядів тіл кочення	<p>Однорядні (рис. 15.2, а, б, г); (рис. 15.3, а, б, г, д)</p> <p>Дворядні (рис. 15.2, в); (рис. 15.3, в)</p> <p>Чотирирядні</p>
4	За способом компенсації перекосів валу	<p>Несамоустановлювальні</p> <p>Сферичні самоустановлювальні (рис. 15.2, в); (рис. 15.3, в)</p>
5	По навантажувальній здатності (по габаритах – по радіальних розмірах з одним і тим же внутрішнім діаметром)	<p>Ділять на серії (рис. 15.5):</p> <p>1 – особливо легка;</p> <p>2 – легка;</p> <p>легка широка;</p> <p>середня;</p> <p>середня широка;</p> <p>важка.</p>

6	По класу точності	0 – нормальна точність; 6 – підвищена точність; 5 – висока точність; 4 – особливо висока точність (прецизійні); 2 – надвисока точність (над прецизійні)
---	-------------------	---

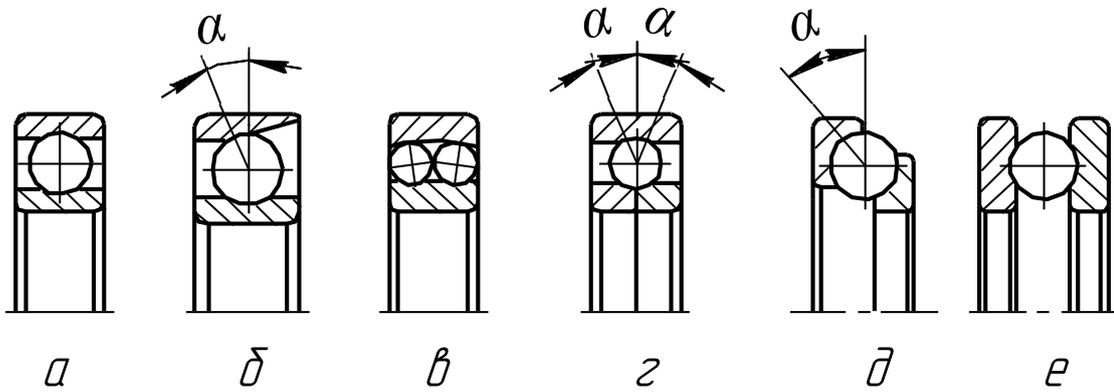


Рисунок 15.2 – Кулькові підшипники

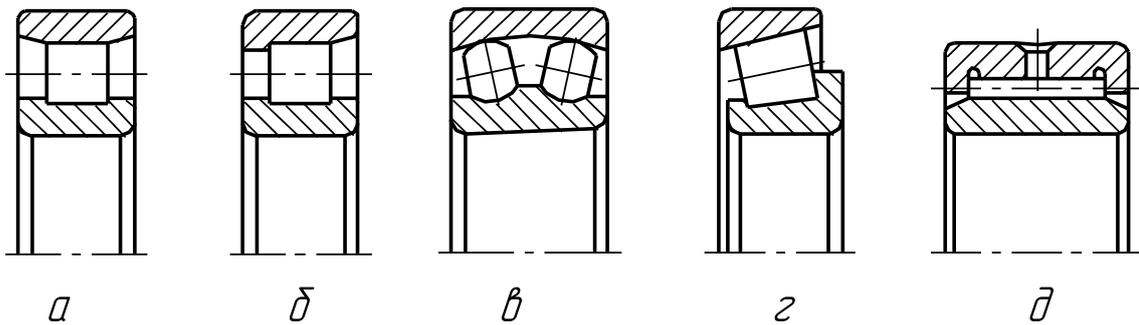


Рисунок 15.3 – Роликові підшипники

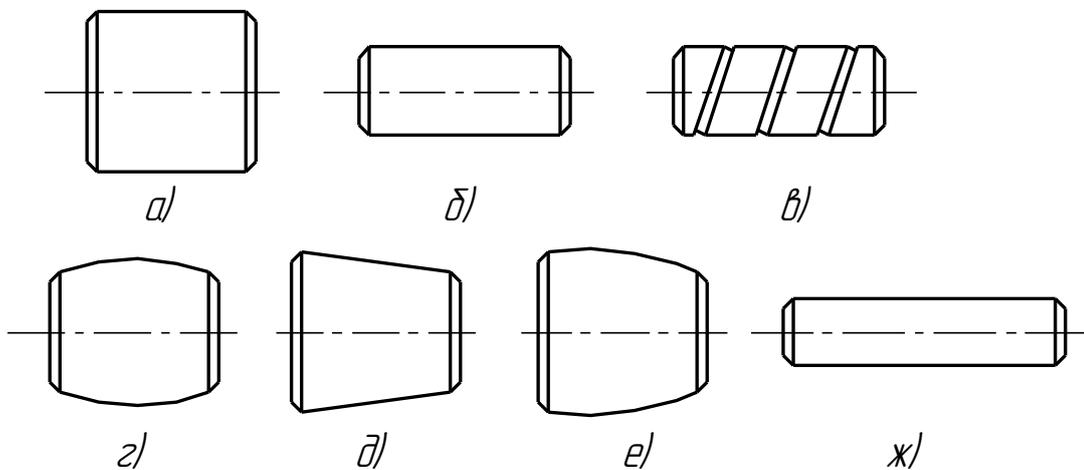


Рисунок 15.4 – Форми роликів у підшипників кочення

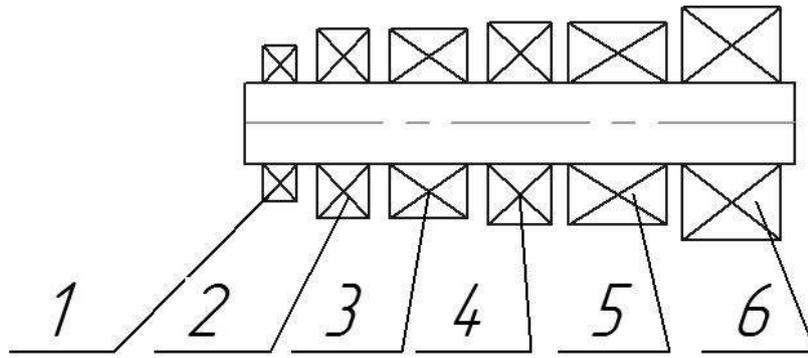


Рисунок 15.5 – Серії підшипників кочення

15.3 Система умовних позначень підшипників кочення

Умовні позначення підшипників кочення складаються із основного і додаткових позначень, які можуть бути розташовані праворуч і ліворуч від основного умовного позначення. Умовні позначення наносяться на торцях кілець підшипників (рис. 15.6).

Позначення підшипників складаються з цифр, що умовно характеризують його основні параметри. Умовними позначеннями характеризуються залежно від місця, займаного в них цифрами (справа наліво):

1-а і 2-а – посадочний діаметр внутрішнього кільця підшипника, частка від ділення внутрішнього діаметру d на 5 (для підшипників з d від 20мм до 495мм).



Рисунок 15.6 – Основні та додаткові позначення підшипників кочення

3-я – серія діаметрів підшипника, **7-а** – серія ширин (висот) підшипника. Сполучення серії діаметрів і серії ширин (висот) утворюють розмірну серію підшипника:

- діаметрів: 0, 8, 9, 1, 7, 2, 3, 4, 5;

- ширин і висот: 7, 8, 9, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Перелік серій діаметрів вказаний у порядку збільшення розміру зовнішнього діаметру підшипника при однаковому внутрішньому діаметру. Перелік серій ширин або висот вказаний у порядку збільшення розміру ширини і висоти. Серія 0 у позначенні не вказується.

Наприклад:

- 8 або 9 – надлегка серія;
- 1 або 7 – особливо легка серія;
- 2 або 5 – легка серія;
- 3 або 6 – середня серія;
- 4 – важка серія;
- 9 – нестандартні підшипники.

4-а – основний тип підшипника.

- 0 – кулькові підшипники радіальні однорядні;
- 1 – кулькові підшипники радіальні дворядні сферичні;
- 2 – роликотпідшипники радіальні з короткими циліндричними роликотками;
- 3 – роликотпідшипники радіальні дворядні сферичні;
- 4 – роликотпідшипники радіальні голчасті;
- 5 – роликотпідшипники радіальні з витими роликотками;
- 6 – кулькові підшипники радіально-упорні;
- 7 – роликотпідшипники радіально-упорні конічні;
- 8 – кулькові підшипники упорні;
- 9 – роликотпідшипники упорні.

5-а і 6-а – конструктивні особливості підшипника.

8-а – клас точності підшипника вказується зліва від умовного позначення. По точності основних розмірів і точності обертання підшипники розділяють на класи 0,6,5,4 і 2 в порядку підвищення точності.

Додаткові знаки (цифри), що розташовані ліворуч від основного позначення:

9-а – означає, що підшипник виготовлено за спеціальними вимогами щодо радіальних зазорів. Радіальний зазор умовно позначають цифрами 6, 7, 8, 9. Якщо особливих вимог до радіального зазору немає (за наявності десятої цифри), то проставляють літеру М;

10-а – вказує на особливі вимоги щодо моменту тертя.

Додаткові знаки (букви), що розташовані праворуч від основного позначення (11, 12, 13, 14, 15...) означають: Ю – деталі підшипника із нержавіючої сталі; Х – деталі із цементованої сталі; Р – деталі із теплостійкої сталі; Г – сепаратор із чорних металів; Б – сепаратор із без олов'яної бронзи; Д – сепаратор із алюмінієвого сплаву; Л – сепаратор із латуні; Е – сепаратор із пластмаси; Я – деталі підшипника із скла, кераміки, пластмаси; М – роликотпідшипники з комбінованими роликотками; К – конструктивні зміни деталей підшипника; Ш – спеціальні вимоги щодо шуму; У – додаткові вимоги до жорсткості, до радіальних зазорів, осьової гри, покриття; С – під-

шипники закритого типу, що змащені спеціальним мастилом; Т – спеціальні вимоги щодо температури відпускання.

Як правило, найпоширеніші підшипники мають скорочене позначення, наприклад:

6-7312 – роликopідшипник радіально-упорний конічний середньої серії, з внутрішнім діаметром 60 мм, 6 класу точності.

15.3.1 Характеристика підшипників кочення

Кулькові підшипники радіальні однорядні. Призначені, в основному, для сприйняття радіальних навантажень. Можуть сприймати одночасно радіальне і осьове навантаження, діюче в будь-якому напрямі, величина якого не повинна перевищувати 70% невикористаного допустимого радіального навантаження. Можуть працювати також при чисто осьовому навантаженні, якщо воно не перевищує 70% того радіального навантаження, на яке розрахований підшипник.

Підшипники цього типу найбільш швидкохідні, мають найменші втрати на тертя. При установці підшипників з великим перекосом можливе їх перегрівання, а також розрив сепараторів. Є одними з найбільш поширених і дешевих підшипників кочення. Характеризуються порівняно малою радіальною і осьовою жорсткістю, тому не рекомендуються для застосування у вузлах, що вимагають особливо точної фіксації валів. Застосовуються, в основному, для установки жорстких двоопорних валів з відстанню між опорами до 10 діаметрів валів.

Кулькові підшипники радіальні дворядні сферичні, і роликopідшипники радіальні дворядні сферичні, (підшипники самовстановлювальні). Призначені, в основному, для сприйняття радіального навантаження. Можуть сприймати також в обидві сторони, одночасно з радіальним і невелике осьове навантаження, величина якого не повинна перевищувати 20% невикористаного допустимого радіального навантаження при заданій розрахунковій довговічності. Можуть працювати при значному перекосі ($2...3^\circ$) внутрішнього кільця відносно зовнішнього. Підшипники можна встановлювати у вузлах машин з корпусами, що стоять окремо, або при можливому неспівпаданні осей посадочних місць під підшипники (при розточуванні отворів в корпусах не за один прохід); використовувати для установки багатоопорних валів, двоопорних валів, схильних до значних прогинів (зокрема валів з навантаженням на консолі) і тому подібне.

Роликopідшипники радіальні з короткими циліндричними роликами. Призначені для сприйняття тільки радіальних навантажень. Мають більшу (приблизно у 1,7 разу) здатність навантаження в порівнянні з кульковими підшипниками. Мають ряд конструктивних різновидів залежно від наявності бортів на бігових доріжках внутрішнього або зовнішнього кільця. Підшипники зазвичай вільно розбираються (кільця знімаються один з одного),

що створює великі зручності при монтажі і демонтажі підшипникового вузла. Підшипники дуже чутливі до перекосів. Рекомендована сфера застосування – короткі жорсткі двоопорні вали, точне розточування отворів в єдиному корпусі.

Роликopідшипники радіальні голчасті і роликopідшипники з витими роликами. Призначені для використання в опорах валів, на які діють тільки радіальні навантаження.

Роликopідшипники голчасті відрізняються підвищеною вантажопідйомністю, малими граничними частотами обертання і мають малі радіальні розміри. Широко застосовуються для роботи в режимі коливального руху. Вони такі чутливі до перекосів, що практично ніяких перекосів валів в опорах не допускають.

Роликopідшипники з витими роликами добре працюють при ударних навантаженнях, але мають знижену вантажопідйомність.

Кулькові підшипники радіально-упорні і роликopідшипники радіально-упорні конічні. Призначені для сприйняття навантажень, діючих як в радіальному, так і в осьовому напрямках. Одинарний підшипник може сприймати осьове навантаження, діюче тільки в одному напрямі. Його величина залежить від кута контакту тіл кочення із зовнішнім кільцем, який змінюється в межах $12...36^\circ$ залежно від серії підшипника.

У радіально-упорних підшипниках від дії радіальних навантажень виникають осьові реакції, які повинні бути сприйняті протилежною опорою, тому у вузлах машин вони завжди встановлюються попарно.

У конічних роликopідшипників і кулькових радіально-упорних, так званих магнітних підшипників, зовнішнє кільце знімне і вони зручні для монтажу і демонтажу.

Радіально-упорні підшипники застосовуються у вузлах машин з жорсткими валами, а також у вузлах, що вимагають регулювання внутрішнього зазору в підшипниках (осьова гра).

Конічні роликopідшипники дуже чутливі до осьової гри: при сильному затягуванні різко підвищується їх температура, при значній осьовій грі втрачається точність.

Вартість конічних роликopідшипників нижча за вартість кулькових радіально-упорних підшипників.

Кулькові дворядні радіально-упорні, роликові конічні дворядні і роликові чотирирядні підшипники. Виготовляються з попереднім натягом, при монтажі не регулюються, можуть сприймати значні радіальні і осьові навантаження змінного напрямку.

Упорні підшипники. Упорні підшипники підрозділяються на кулькові, які можуть бути одинарними і подвійними, і роликові одинарні з конічними роликами.

Підшипники призначені для сприйняття значних осьових навантажень, але можуть працювати лише при малих частотах обертання. Дуже чутливі до перекоосу осей.

15.4 Вибір підшипників кочення

В процесі проектування конструктор вибирає тип, конструктивний різновид і габаритні розміри підшипників. Відомості про підшипники і рекомендацію по їх застосуванню приводяться в довідковій літературі.

При виборі підшипників необхідно враховувати наступне:

- величину і напрям дії навантажень (радіальна, осьова, комбінована);
- характер навантаження (постійна, змінна, вібраційна, ударна);
- яке з кілець обертається (внутрішнє або зовнішнє), частоту обертання;
- необхідний ресурс (у годинах або мільйонах оборотів) і надійність;
- стан довкілля (температуру, вологість, запилену);
- особливі вимоги до підшипників, що витікають з умов їх експлуатації (самоустанавлювальність, здатність допускати осьове переміщення валу, умови монтажу, вимоги до жорсткості і точності обертання, момент тертя, шумність);
- бажані розміри підшипника (посадочні розміри валу, діаметр отвору в корпусі, ширина);
- вартість підшипника і вузла в цілому.

Якщо немає особливих вимог до частоти і точності обертання, застосовують підшипники класу точності 0.

15.5 Розрахунки підшипників кочення

Критерії працездатності. Розрахунки підшипників кочення стандартизований. Основними критеріями розрахунків є довговічність і статична вантажопідйомність. Можливі три розрахункові випадки:

- при $n > 10x\varepsilon^{-1}$ – втомна контактна міцність (довговічність);
- при $n = (1...10)x\varepsilon^{-1}$ – приймаємо $n = 10x\varepsilon^{-1}$ – втомна контактна міцність (довговічність);
- при $n < 1x\varepsilon^{-1}$ – статична контактна міцність.

15.5.1 Алгоритм розрахунків підшипників кочення по динамічній вантажопідйомності

Одним з основних видів руйнування підшипників є втомне зношування. Викришування поверхонь кочення при втомному зношуванні визначає довговічність підшипника кочення. Розрахунки на довговічність (ресурс) ґрунтуються на експериментальних даних, оброблених методами математичної статистики, причому під довговічністю розуміється властивість об'єкту зберігати працездатність до граничного стану, обумовленого в технічній документації. Показниками довговічності можуть служити ресурс або термін служби. Ресурс підшипника – це напрацювання до граничного стану, виражене в мільйонах оборотів або годинах, а термін служби підшипника – календарна тривалість його експлуатації до моменту настання граничного стану, виражена в роках, місяцях, кількості діб, годинах. Термін служби включає напрацювання виробу і час простоїв.

Розрахункова довговічність (ресурс) в мільйонах обертів:

- кулькових підшипників

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^3, \quad (15.1)$$

- роликових підшипників

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^{\frac{10}{3}}, \quad (15.2)$$

Скоректована розрахункова довговічність (ресурс) в мільйонах обертів:

- кулькових підшипників

$$L_a = a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^3, \quad (15.3)$$

- роликових підшипників

$$L_a = a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^{\frac{10}{3}}, \quad (15.4)$$

де C – базова динамічна вантажопідйомність підшипника (для кожного підшипника заздалегідь підраховані і вказані в каталозі);

P – еквівалентне динамічне навантаження: радіальне – P_r або осьове – P_a , а при змінних режимах роботи – P_{er} або P_{ea} ;

коефіцієнт, що враховує надійність підшипників;

a_{23} – коефіцієнт, що враховує умови експлуатації підшипників і якість матеріалів деталей підшипників.

Скоректований розрахунковий ресурс підшипника в годинах

$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L_a, \quad (15.5)$$

де n – число обертів кільця підшипника, $хв^{-1}$.

Довговічність підшипника забезпечена якщо виконується умова:

$$L_h \geq L_{h\text{ номр}}, \quad (15.6)$$

де $L_{h\text{ номр}}$ – довговічність підшипника кочення, що потребується.

15.5.2 Еквівалентне динамічне навантаження на підшипники

Під еквівалентним динамічним радіальним навантаженням P_r радіальних і радіально-упорних підшипників мають на увазі таке постійне радіальне навантаження, яке при прикладанні до підшипника з внутрішнім кільцем, що обертається, і нерухомим зовнішнім кільцем забезпечить такі ж ресурс і надійність, як і за дійсних умов експлуатації.

Під еквівалентним динамічним осьовим навантаженням P_a упорних і упорно-радіальних підшипників мається на увазі таке постійне осьове навантаження, при дії якого підшипник матиме такі ж ресурс і надійність, як і за дійсних умов експлуатації.

Еквівалентне динамічне радіальне навантаження для радіальних кулькових підшипників і радіально-упорних кулькових і роликових підшипників

$$P_r = (X \cdot V \cdot F_R + Y \cdot F_A) \cdot K_B \cdot K_T, \quad (15.7)$$

де F_R, F_A – радіальне і осьове зовнішні навантаження на підшипники відповідно;

X, Y – коефіцієнти радіального і осьового навантаження відповідно;

V – коефіцієнт обертання ($V = 1$ при обертанні внутрішнього кільця підшипника відносно напрямку радіального навантаження і $V = 1,2$ при обертанні зовнішнього кільця).

K_B – коефіцієнт безпеки;

K_T – температурний коефіцієнт.

Еквівалентне динамічне радіальне навантаження для однорядних і дворядних підшипників з короткими циліндричними роликами

$$P_r = F_R \cdot V \cdot K_B \cdot K_T. \quad (15.8)$$

Ці підшипники за відсутності бортів на одному з кілець не сприймають осьові навантаження. Підшипники з бортами на обох кільцях сприймають невеликі осьові навантаження, але прикладені вони не до доріжок кочення, а до бортів. Тому при розрахунку еквівалентних навантажень вони не враховуються.

Еквівалентне динамічне осьове навантаження для кулькових і роликових упорних і упорно-радіальних підшипників

Для упорних підшипників

$$P_a = F_A \cdot K_B \cdot K_T. \quad (15.9)$$

Для упорно-радіальних підшипників

$$P_a = (X \cdot F_R + Y \cdot F_A) \cdot K_B \cdot K_T. \quad (15.10)$$

Значення коефіцієнтів X і Y залежать від типу і конструктивних особливостей підшипника. Їх вибирають на підставі порівняння співвідношення $F_A / (V F_R)$ і параметра осьового навантаження e . Ці коефіцієнти можна вибрати безпосередньо по таблицях стандарту для підшипників.

Радіальне навантаження на підшипник F_R – це результуюча реакція в опорах A, B (див. розрахунок валів):

$$\begin{aligned} F_{R1} &= \sqrt{(R_A^e)^2 + (R_A^g)^2}; \\ F_{R2} &= \sqrt{(R_B^e)^2 + (R_B^g)^2}. \end{aligned} \quad (15.11)$$

Осьові навантаження F_A на радіальні кулькові підшипники приймають рівними зовнішнім осьовим силам F_a , діючим на вал.

Осьові навантаження F_A на радіально-упорні підшипники (кулькові і роликові) визначають по зовнішній осьовій силі F_a , діючій на вал, і осьовим складовим F_{S1} і F_{S2} , які виникають в обох опорах при їх роздільному вантаженні (рис. 15.7).

Завжди для двох радіально-упорних підшипників опор валу повинні зберігатися умови

$$F_{A1} \geq F_{S1}; \quad F_{A2} \geq F_{S2} \quad (15.12)$$

і умова рівноваги валу

$$F_a + F_{A1} - F_{A2} = 0. \quad (15.13)$$

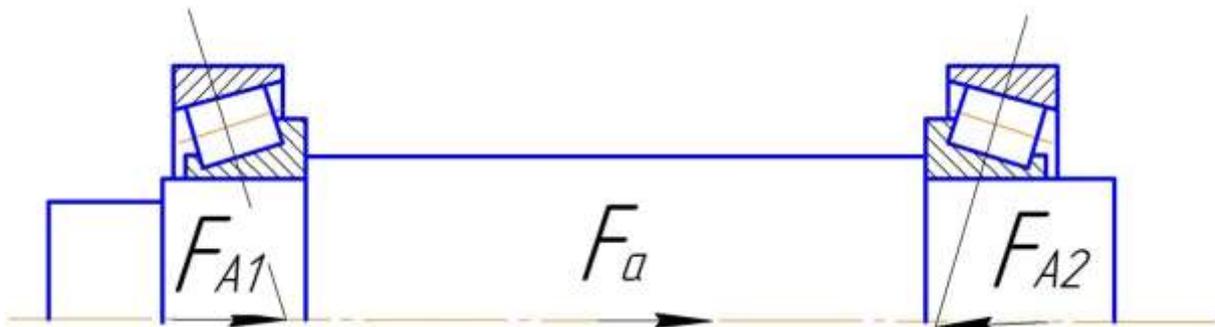


Рисунок 15.7 – Навантаження радіально-упорних підшипників

Осьову складову силу F_S , що виникає при радіальному вантаженні радіально-упорного підшипника знаходять із залежностей:

для конічних роликотпідшипників

$$F_S = 0,83 \cdot e \cdot F_R; \quad (15.14)$$

для радіально-упорних кулькових підшипників

$$F_S = e \cdot F_R. \quad (15.15)$$

15.5.3 Алгоритм розрахунків підшипників кочення по статичній вантажопідйомності

Під базовою статичною вантажопідйомністю підшипника мається на увазі таке статичне навантаження (радіальне для радіальних і радіально-упорних підшипників, центральне осьове для упорних і упорно-радіальних підшипників), яке викликає загальну залишкову деформацію тіла кочення і доріжки кочення в найбільш навантаженій зоні контакту (за відсутності перекосів кілець підшипника), рівну $0,0001$ діаметру тіла кочення.

Значення базової статичної вантажопідйомності для кожного підшипника заздалегідь підраховані і вказані в каталозі. Підшипники вибирають по статичній вантажопідйомності, якщо вони сприймають зовнішнє навантаження в нерухомому стані або при частоті обертання до 1хв^{-1} .

При розрахунку на статичну вантажопідйомність перевіряють, чи не буде зовнішнє радіальне або осьове навантаження перевершувати статичну вантажопідйомність, вказану в каталозі:

$$F_{0R} \leq C_{0r} \text{ і } F_{0a} \leq C_{0a}. \quad (15.16)$$

При дії на радіальні і радіально-упорні кулькові підшипники і радіально-упорні (конічні) роликотпідшипники комбінованих навантажень розрахунок статичної вантажопідйомності виконують по еквівалентному статичному радіальному навантаженню:

$$P_{0r} = X_0 F_R + Y_0 F_a, \text{ але не менше } F_R. \quad (15.17)$$

Значення коефіцієнтів X_0 і Y_0 дані в довідкових таблицях.

Еквівалентне статичне радіальне навантаження – статичне радіальне навантаження, що викликає таку ж загальну залишкову деформацію тіла кочення і доріжки кочення в найбільш навантаженій зоні контакту, що і деформація, що виникає в умовах дійсного навантаження.

Еквівалентне статичне осьове навантаження (поняття має той же сенс, що і еквівалентне статичне радіальне навантаження) на упорно-радіальні кулькові і роликові підшипники

$$P_{0a} = F_a + 2,3F_R \text{tg} \alpha. \quad (15.18)$$

При дії комбінованих навантажень повинні виконуватися умови:

$$P_{0r} \leq C_{0r} \text{ і } P_{0a} \leq C_{0a}.$$