

**М. В. ПРОКОПЕНКО**

## ЗАГАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПІДШИПНИКІВ ЯК ОПОР ДИНАМІЧНИХ РОТОРНИХ СИСТЕМ

На сьогоднішній день підшипники є єдиними технічними пристроями, які використовуються в якості опор обертових осей і валів. Рациональний вибір типу і характеристик підшипника для конкретної моделі експлуатації роторної системи забезпечує більш високе значення коефіцієнту корисної дії, ефективності роботи та працездатності не тільки самої роторної системи, а й всієї машини в цілому. Розглянуто основні схеми підшипників як опор валу. Проаналізовано особливості роботи та принципові схеми підшипників кочення, ковзання та магнітних підшипників. Показано конструктивні особливості підшипників різного типу та вплив цих особливостей на роботу роторних систем.

**Ключові слова:** модель експлуатації роторної системи; підшипник кочення; підшипник ковзання; магнітний підшипник; газотурбінна установка

**Н. В. ПРОКОПЕНКО**

## ОБЩИЙ АНАЛИЗ ПОДШИПНИКОВ КАК ОПОР ДИНАМИЧЕСКИХ РОТОРНЫХ СИСТЕМ

На сегодняшний день подшипники являются единственными техническими устройствами, которые используются в качестве опор вращающихся осей и валов. Рациональный выбор типа и характеристик подшипника для конкретной модели эксплуатации роторной системы обеспечивает более высокое значение коэффициента полезного действия, эффективности работы и работоспособности не только самой роторной системы, но и всей машины в целом. Рассмотрены основные схемы подшипников как опор вала. Проанализированы особенности работы и принципиальные схемы подшипников качения, скольжения и магнитных подшипников. Показаны конструктивные особенности подшипников различного типа и влияние этих особенностей на работу роторных систем.

**Ключевые слова:** модель эксплуатации роторной системы; подшипник качения; подшипник скольжения; магнитный подшипник; газотурбинная установка

**М. PROKOPENKO**

## GENERAL ANALYSIS OF BEARINGS AS SUPPORTS OF DYNAMIC ROTOR SYSTEMS

Today, bearings are the only technical devices that are used as supports for rotating axes and shafts. A rational choice of the type and characteristics of bearing for a particular model of the rotor system operation provides a higher value of the coefficient of performance, efficiency and operability not only for the rotor system itself, but the whole machine. The basic schemes of bearings as shaft supports are considered. The operation features and circuit diagrams of rolling bearings, sliding bearings and magnetic bearings are analyzed. The design features of various types bearings and these features influence on the rotor systems operation are shown.

**Keywords:** rotor system operation model; rolling bearing; sliding bearing; magnetic bearing; gas turbine

**Вступ.** Загальновідомо, що підшипники – це технічні пристрої, які є частиною опор обертових осей і валів. Вони сприймають радіальні і осьові навантаження, прикладені до вала або осі, і передають їх на раму, корпус або інші частини конструкції. При цьому вони мають також утримувати вал в просторі, забезпечувати обертання, хитання або лінійне переміщення з мінімальними енерговтратами. Тобто від якості підшипників значною мірою залежить коефіцієнт корисної дії, працездатність і довговічність машини в цілому [1–3].

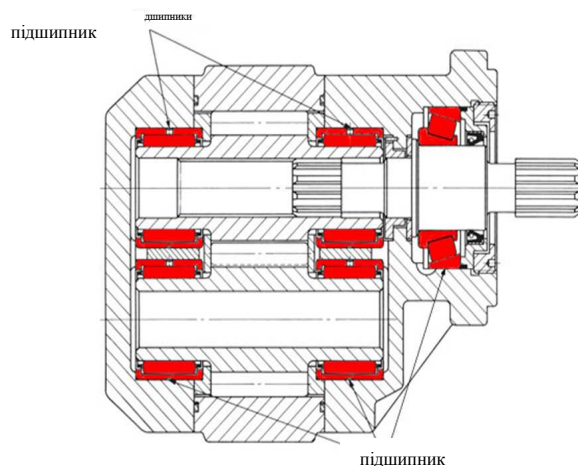


Рисунок 1 – Загальна схема опор валу

як опор валу та підшипників лінійного переміщення [1].

На сьогодні широко знаходять застосування підшипники [1–8]:

- контактні (мають поверхні, що труться) – підшипники кочення і ковзання;
- безконтактні (що не мають поверхні, що труться) – магнітні підшипники.

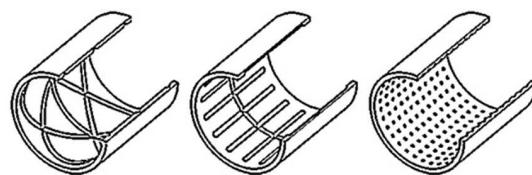


Рисунок 4 – Приклади змащувальних канавок у підшипниках ковзання

Залежно від конструкції, окружної швидкості, умов експлуатації тертя ковзання буває [4]:

- рідинним, коли поверхні валу і підшипника розділені шаром рідкого мастильного матеріалу, безпосереднього контакту між цими поверхнями або немає, або він відбувається на окремих ділянках;
- граничним – поверхні валу і підшипника контактують повністю або на ділянках великої протяжності, причому мастильний матеріал у вигляді

На рис. 1 і 2 наведено загальну схему підшипників

© М.В. Прокопенко, 2020

тонкої плівки;

- сухим – безпосередній контакт поверхонь валу і підшипника по всій довжині або на ділянках великої протяжності, рідинний або газоподібний мастильний матеріал відсутній;

- газове – поверхні валу і підшипника розділені шаром газу, тертя мінімальне.

Існує велика кількість конструктивних типів підшипників ковзання: самоустановлювальні, сегментні, самозмазуючі і т.д.

Наприклад, на рис. 5 показано шарнірний підшипник ковзання [1]. Підшипники ковзання мають наступні переваги:

- дозволяють високу швидкість обертання;
- дозволяють працювати в воді, при вібраційних і ударних навантаженнях;
- економічні при великих діаметрах валів;
- можливість установки на валах, де підшипник повинен бути роз'ємним (для колінчатих валів);
- допускають регулювання різного проміжку і, як наслідок, точну установку геометричної осі валу.

Недоліки підшипників ковзання:

- високі втрати на тертя і, отже, знижений коефіцієнт корисної дії;
  - необхідність у безперервному змащуванні;
  - нерівномірне зношування підшипника;
  - застосування для виготовлення підшипників дорогих матеріалів;
- відносно висока трудомісткість виготовлення

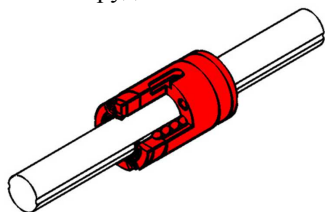
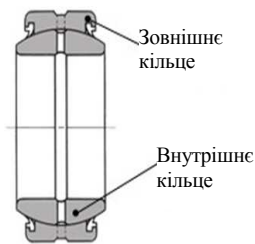


Рисунок 2 – Підшипник лінійного переміщення

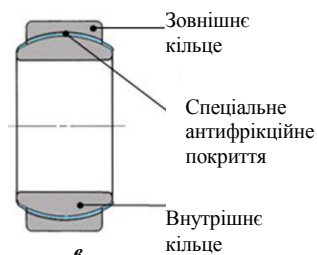
За видом тертя розрізняють [1–3] підшипники ковзання, в яких опорна поверхня осі або валу ковзає



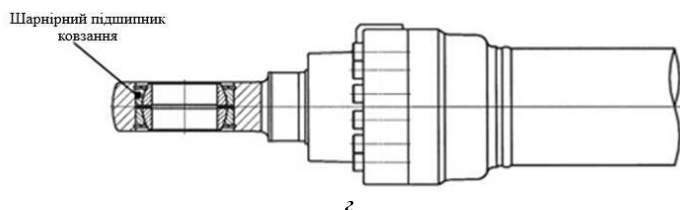
а



б



в



г

Рисунок 5 – Шарнірні підшипники ковзання

Принципова схема опори з підшипником кочення показано на рис. 6 [1]. Підшипники кочення

по робочій поверхні підшипника; підшипники кочення, в яких використовується тертя кочення завдяки установці кульок або роликів між рухомим і нерухомим кільцями підшипника.

Принципова схема опори з підшипником ковзання наведена на рис. 3 [1]. Підшипник ковзання є собою корпусом, який має циліндричний отвір, в який вставляється вкладиш або втулка з антифрикційного матеріалу (часто використовуються кольорові метали), і змазує пристрій. Між валом і отвором втулки підшипника є проміжок, який дозволяє вільно обертатися валу. Для успішної роботи підшипника проміжок попередньо розраховується [2, 3, 6–10].

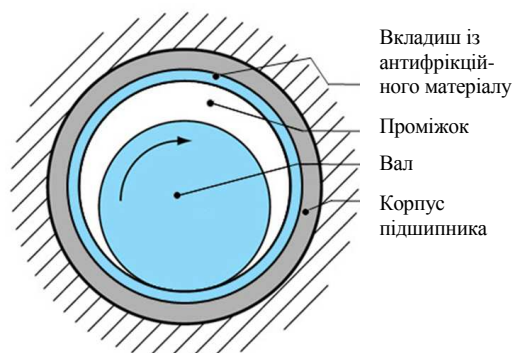


Рисунок 3 – Принципова схема опори з підшипником ковзання

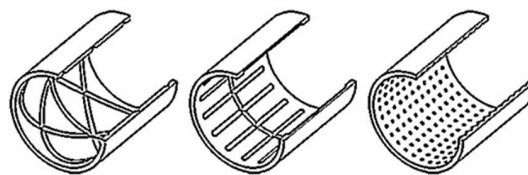


Рисунок 4 – Приклади змащувальних канавок у підшипниках ковзання

На рис. 4 наведено деякі приклади змащення підшипників ковзання [1, 2].

відокремлює тіла кочення один від одного та утримує на рівній відстані і направляє їх рух [1, 11]. На зовнішній поверхні внутрішнього кільця і внутрішньої поверхні зовнішнього кільця (на торцевих поверхнях кілець підшипників) виконують жолоби – доріжки кочення, за якими при роботі підшипника котяться тіла кочення. На рис. 7 показано, які бувають за формою тіла кочення [1].

У деяких вузлах машин з метою зменшення габаритів, а також підвищення точності і жорсткості, застосовуються так звані суміщені опори: доріжки кочення виконуються безпосередньо на валу або на поверхні корпусної деталі. Деякі підшипники кочення виготовляють без сепаратора. Такі підшипники мають велике число тіл кочення і, отже, більшу вантажопідйомність. Однак граничні частоти обертання безсепараторних підшипників значно нижче внаслідок підвищених моментів опору обертанню. Для скорочення радіальних розмірів і маси використовуються «безобойменні» підшипники

(рис. 8) [1].

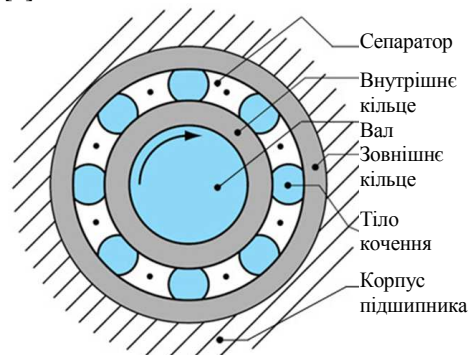


Рисунок 6 – Принципова схема опори з підшипником кочення

В табл. 1 наведено порівняння підшипників кочення за їх експлуатаційними характеристиками [1].

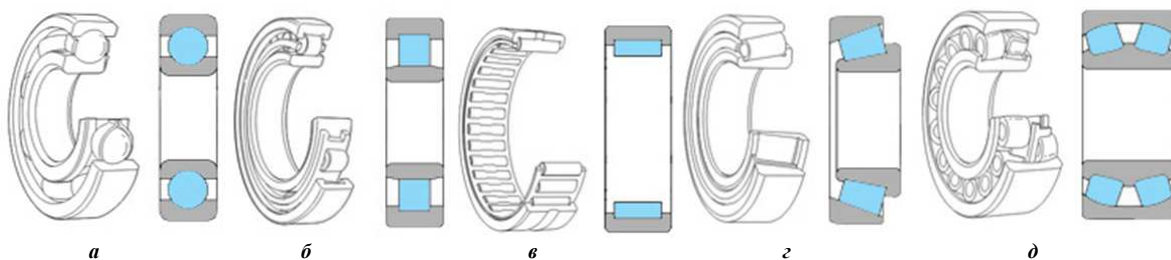


Рисунок 7 – Деякі форми тіл кочення:

а – з кульковими тілами кочення, б – з короткими циліндричними роликами, в – з довгими циліндричними або голчастими роликами, г – з конічними роликами, д – з бочкоподібними роликами

Таблиця 1 – Порівняння підшипників кочення за експлуатаційними характеристиками

Тип підшипника	Навантаження			Велика частота обертів	Сприйняття перекосу
	радіальне	осьове	комбіноване		
Кульковий радіальний	+	+	+	+++	о
Кульковий радіальний дворядний сферичний	+	о	о	++	+++
Радіально-упорний однорядний кульковий	+	+	++	++	о
Радіально-упорний кульковий дворядний і однорядний здвоєний	++	+	++	+	х
Кульковий з чотирихточковим контактом	о	+	+	++	х
З короткими циліндричними роликами без бортів на одному з кілець	+++	х	х	+++	х
З короткими циліндричними роликами з бортами	+++	о	о	+++	х
Радіальний голчастий	+++	х	х	о	х
Сферичний роликовий	+++	+	+++	+	+++
Конічний роликовий	++	++	++	+	о
Упорний кульковий	о	+	о	+	х
Упорний з конічними роликами	о	++	о	о	х
Упорно-радіальний роликовий сферичний	о	+++	++	+	+++

Примітка: \* – позначення: +++ – дуже добре, ++ – добре, + – задовільно, о – погано, х – непридатне

У порівнянні з підшипниками ковзання підшипники кочення мають наступні переваги [11]:

- значно менші втрати на тертя, а, отже, більш високий ККД (до 0,995) і менше нагрівання;
- в 10 ... 20 разів менше момент тертя при пуску;
- економія дефіцитних кольорових матеріалів, які найчастіше використовуються при виготовленні підшипників ковзання;

- менші габаритні розміри в осьовому напрямку;
- простота обслуговування і заміни;
- менше витрата мастильного матеріалу;
- невисока вартість внаслідок масового виробництва стандартних підшипників;
- простота ремонту машини внаслідок взаємозамінності підшипників.

На рис. 9 показано види пошкоджень підшипників кочення [1].



Рисунок 9 – Пошкодження підшипників кочення  
*a* – пошкодження внутрішнього кільця сферичного роликового підшипника, викликане надмірним натягом при посадці; *б* – фреттинг-корозія внутрішнього кільця радіального роликового циліндричного підшипника, викликана дією вібрацій; *в* – пошкодження внутрішнього кільця радіального кулькового підшипника, викликане дією надмірного осьового навантаження; *г* – пошкодження внутрішнього кільця радіального роликового циліндричного підшипника, викликане дією надмірного радіального навантаження; *д* – іржа на поверхні ролика сферичного роликового підшипника, викликана потраплянням води всередину підшипника; *е* – пошкодження сепаратора роликового конічного підшипника, що викликається дією великих навантажень і / або вібрацій, і / або неправильним монтажем, і / або роботою на високих частотах обертання

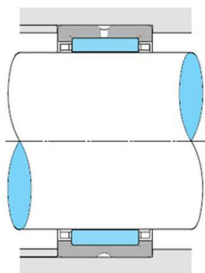


Рисунок 8 – «Безобойменні» підшипники кочення

Недоліками підшипників кочення є [11] обмежена можливість застосування при дуже великих навантаженнях і високих швидкостях; непридатність для роботи при значних ударних і вібраційних навантаженнях через високі контактні напруження і погану здатність демпфювати коливання; значні габаритні розміри в радіальному напрямку і маса; шум під час роботи, обумовлений похибками форм;

складність установки і монтажу підшипникових вузлів; підвищена чутливість до неточності установки; висока вартість при дрібносерійному виробництві унікальних за розмірами підшипників.

На рис. 10 показано зовнішній вигляд магнітного підшипника [1]. Принцип роботи магнітного підшипника (підвісу) заснований на використанні левітації, створюваної електричними і магнітними полями. Магнітні підшипники дають можливість без фізичного контакту здійснювати підвіс обертового валу і його обертання без тертя і зносу [1, 4, 9, 12–14].

Магнітні підвіси залежно від принципу дії розподіляють на [1, 4, 9]: електростатичні; на постійних магнітах; активні магнітні; LC-резонансні; індукційні; кондукційні; діамагнітні; надпровідні; магнітогідродинамічні.

На рис. 11 показана принципова схема системи з активними магнітними підшипниками (АМП). Найбільшу популярність на сьогодні отримали саме активні магнітні підшипники. Активний магнітний підшипник – це керований мехатронний пристрій, в якому стабілізація положення ротора здійснюється силами магнітного тяжіння, що діють на ротор з боку електромагнітів, струм в яких регулюється системою автоматичного управління за сигналами датчиків переміщень ротора [4].

Повний неконтактний підвіс ротора може бути здійснений за допомогою двох радіальних і одного осьового АМП, або двох конічних АМП. Тому система магнітного підвісу ротора включає в себе як самі підшипники, вбудовані в корпус машини, так і електронний блок управління, з'єднаний з обмотками електромагнітів і датчиками. У системі управління може використовуватися як аналогова, так і цифрова обробка сигналів [1, 4].



Рисунок 10 – Магнітний підшипник

На рис. 12 показана принципова схема управління типової системи на основі активного магнітного підшипника [1].

Основними перевагами АМП є [1, 4, 9, 15-17]: відносно висока вантажопідйомність; висока механічна міцність; можливість здійснення стійкої неконтактної підвіски тіла; можливість зміни жорсткості і демпфірування в широких межах; можливість використання при високих швидкостях обертання, у вакуумі, високих і низьких температурах.

Застосування магнітних підшипників дає можливість зробити конструкцію більш жорсткою, що, наприклад, зменшити динамічний прогин вала при високих частотах обертання (рис. 13) [1, 4].

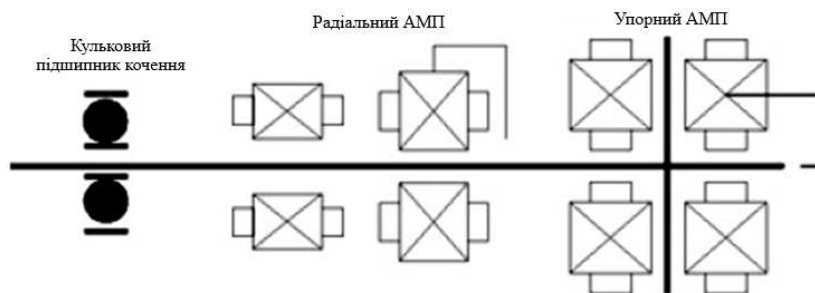


Рисунок 11 – Принципова схема типової системи на основі активного магнітного підшипника

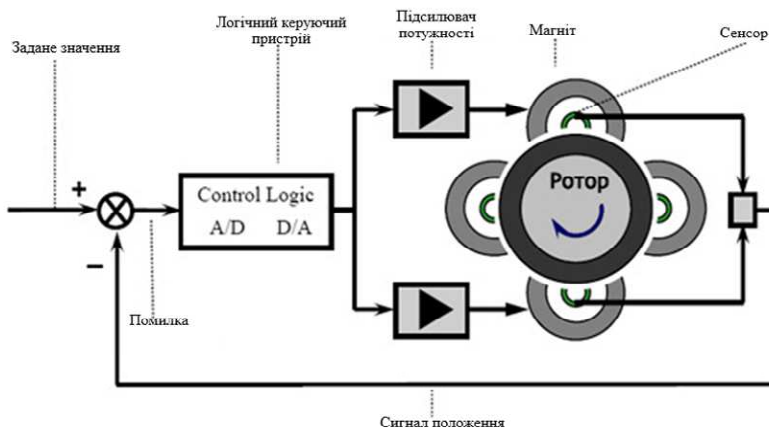


Рисунок 12 – Принципова схема управління типової системи на основі активного магнітного підшипника

АМП знайшли ефективне застосування у багатьох обладнаннях, наприклад [1, 4, 9, 12 –16]: турбокомпресори і турбовентилятори; турбомолекулярні насоси; електрошпинделі (фрезерні, свердлильні, шліфувальні); турбодетандери; газові турбіни та турбоелектричні агрегати; інерційні накопичувачі енергії та ін. (рис. 14).

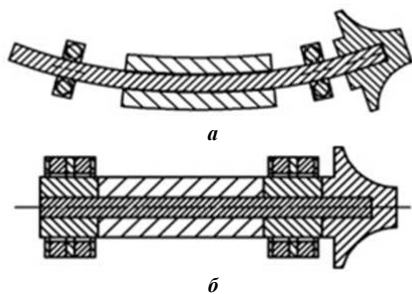


Рисунок 13 – Використання магнітних підшипників  
 а – схема з підшипниками ковчання;  
 б – схема з магнітними підшипниками

Однак АМП вимагають складну і дорогую апаратуру управління, зовнішнього джерела електроенергії, що знижує ефективність і надійність всієї системи. Тому йдуть активні роботи зі створення пасивних магнітних підшипників (ПМП), які не вимагають складних систем регулювання: наприклад, на основі високоенергетичних постійних магнітів NdFeB (неодим-залізо-бор) (рис. 15) [1, 4].

При проектуванні роторної системи, встановленої на АМП, необхідно вирішувати низку проблем, пов'язаних з динамікою ротора [4]. Серед них: центрування ротора в зазорі АМП; перехід через

резонансні режими; обмеження амплітуд коливань роторної системи; вихід роторної системи на обкатку або зворотню прецесію.



Рисунок 14 – Шпинделі для вакуумних машин з активними магнітними підшипниками

До особливостей конструкції на АМП відноситься необхідність установки страхувальних підшипників у зв'язку з можливим падінням ротора через відмову магнітних опор. Це можуть бути як підшипники ковчання, так і звичайні підшипники ковчання. Відмова може статися через перебої в електроенергії, обрив кабелю живлення тощо. У зв'язку з цим треба відповісти на два питання: чи витримають підшипники навантаження, і як буде вести себе ротор на допоміжних опорах при ударі і подальшому вибігу [1, 4, 9].

Страховальні підшипники витримують вкрай мало аварійних ситуацій, після чого їх необхідно міняти. Інша проблема пов'язана з конструктивними рішеннями страхувальних підшипників. Наприклад, у разі використання підшипників ковчання як страхувальних можливий вихід ротора на обкат і в найгіршому випадку на зворотний прецесійний рух. Це пов'язано з

виникненням високого тертя в момент контакту ротора і страхувального підшипника. Вибіг ротора може

супроводжуватися також і високими резонансними навантаженнями та переміщеннями [1, 4].

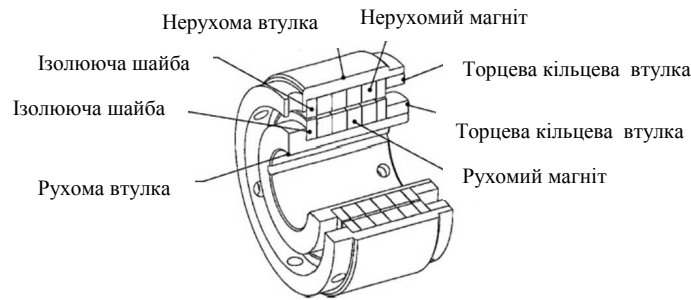


Рисунок 15 – Пасивний магнітний підшипник на основі високоенергетичних постійних магнітів

**Висновок.** У статті здійснено загальний огляд підшипників різного типу, які використовуються як опори валів газотурбінних установок різноманітного призначення. Зрозуміло, що неможливо обрати підшипник, який би водночас найкраще відповідав усім вимогам в експлуатації. Кожен тип підшипника має свої переваги і недоліки. Тому при виборі підшипника потрібно комплексно враховувати всі умови роботи валу та газотурбінної установки в цілому (фізичні та динамічні показники, гідродинамічні параметри, геометричні параметри, параметри навколишнього середовища та ін.).

#### Список літератури

1. [http://www.prompk.ru/ntnsnr/e/about\\_bearings/about\\_bearing.htm](http://www.prompk.ru/ntnsnr/e/about_bearings/about_bearing.htm).
2. Henrik Strand. Design, Testing and Analysis of Journal Bearings for Construction Equipment. Department of Machine Design. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden, 2005.
3. Kazuhisa Miyoshi. Solid Lubricants and Coatings for Extreme Environments: State-of-the-Art Survey. NASA, 2007.
4. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение / Ю.Н. Журавлев. СПб: Политехника, 2003. 206 с.
5. Lei Shi, Lei Zhao, Guojun Yang и др. Design and experiments of the active magnetic bearing system for the htr-10. 2nd International Topical Meeting on high temperature reactor technology. Beijing, CHINA, September 22-24, 2004.
6. Needle Roller Bearings. Cat. № 2300-VII/E. NTN.
7. Needle Roller Bearing Series General Catalogue. IKO.
8. NTN Technical Review №71. April 2004. OSAKA, JAPAN.
9. Torbjorn A. Lembke. Induction Bearings. A Homopolar Concept for High Speed Machines. Electrical Machines and Power Electronics. Department of Electrical Engineering. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden, 2003.
10. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. М.: Машиностроение, 2001.
11. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения. Справочник-каталог. М: Машиностроение, 2003.
12. Lyshevski S.E. Electromechanical Systems and Devices / S.E. Lyshevski. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. 581 p.
13. Schweitzer G., H. Bleuler and A. Traxler. Active magnetic bearings. Zurich: ETH, 1994. 244 p.
14. Maslen E.H. Magnetic Bearings / E.H. Maslen. – Virginia: University of Virginia Department of Mechanical, Aerospace, and Nuclear Engineering Charlottesville, 2000. 231 p.
15. Kirk R.G. Rotordynamics Research: Current Interests and Future Directions / R.G. Kirk // IUTAM Bookseries. – Vol. 25: IUTAM Symposium on Emerging Trends in Rotor Dynamics, New Delhi, India, March 23-26, 2009: Proceedings / Ed. K. Gupta. Dordrecht: Springer, 2011. P. 1–11.
16. Magnetic Bearings and Bearingless Drives / A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa and other. – Oxford: Elsevier Linacre House, 2005. 381 p.
17. Siegwart R., H. Bleuler, A. Traxler Industrial Magnetic Bearings – Basics and Applications *Mechatronic Systems Techniques and Applications*. – Vol. 4: *Electromechanical Systems* / Edited by Cornelius T. Leondes. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publisher, 2000. P. 1–70.

- Emerging Trends in Rotor Dynamics, New Delhi, India, March 23-26, 2009: Proceedings / Ed. K. Gupta. Dordrecht: Springer, 2011. P. 1–11.
16. Magnetic Bearings and Bearingless Drives / A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa and other. Oxford: Elsevier Linacre House, 2005. 381 p.
17. Siegwart R., H. Bleuler, A. Traxler Industrial Magnetic Bearings – Basics and Applications *Mechatronic Systems Techniques and Applications*. Vol. 4: *Electromechanical Systems* / Edited by Cornelius T. Leondes. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publisher, 2000. P. 1–70.

#### References (transliterated)

1. [http://www.prompk.ru/ntnsnr/e/about\\_bearings/about\\_bearing.htm](http://www.prompk.ru/ntnsnr/e/about_bearings/about_bearing.htm).
2. Henrik Strand. Design, Testing and Analysis of Journal Bearings for Construction Equipment. Department of Machine Design. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden, 2005.
3. Kazuhisa Miyoshi. Solid Lubricants and Coatings for Extreme Environments: State-of-the-Art Survey. NASA, 2007.
4. Zhuravlev Yu.N. Aktivnyemagnitnyepodshipniki: Teoriya, raschet, primeneniye / Yu.N. Zhuravlev. SPb: Politehnika, 2003. 206 p.
5. Lei Shi, Lei Zhao, Guojun Yang и др. Design and experiments of the active magnetic bearing system for the htr-10. 2nd International Topical Meeting on high temperature reactor technology. Beijing, CHINA, September 22-24, 2004.
6. Needle Roller Bearings. Cat. № 2300-VII/E. NTN.
7. Needle Roller Bearing Series General Catalogue. IKO.
8. NTN Technical Review №71. April 2004. OSAKA, JAPAN.
9. Torbjorn A. Lembke. Induction Bearings. A Homopolar Concept for High Speed Machines. Electrical Machines and Power Electronics. Department of Electrical Engineering. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden, 2003.
10. Anurev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya. M.: Mashinostroenie, 2001.
11. Chermenskij O.N., Fedotov N.N. Podshipnikikacheniya. Spravochnik-katalog. M: Mashinostroenie, 2003.
12. Lyshevski S.E. Electromechanical Systems and Devices. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. 581 p.
13. Schweitzer G. Active magnetic bearings / G. Schweitzer, H. Bleuler and A. Traxler. – Zurich: ETH, 1994. 244 p.
14. Maslen E.H. Magnetic Bearings / E.H. Maslen. Virginia: University of Virginia Department of Mechanical, Aerospace, and Nuclear Engineering Charlottesville, 2000. 231 p.
15. Kirk R.G. Rotordynamics Research: Current Interests and Future Directions / R.G. Kirk // IUTAM Bookseries. – Vol. 25: IUTAM Symposium on Emerging Trends in Rotor Dynamics, New Delhi, India, March 23-26, 2009: Proceedings / Ed. K. Gupta. Dordrecht: Springer, 2011. P. 1–11.
16. Magnetic Bearings and Bearingless Drives / A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa and other. – Oxford: Elsevier Linacre House, 2005. 381 p.
17. Siegwart R., H. Bleuler, A. Traxler Industrial Magnetic Bearings – Basics and Applications *Mechatronic Systems Techniques and Applications*. – Vol. 4: *Electromechanical Systems* / Edited by Cornelius T. Leondes. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publisher, 2000. P. 1–70.

Поступила (received) 04.05.2020

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Прокопенко Микола Вікторович (Прокопенко Николай Викторович, Prokopenko Mykola)** – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: [kola0123@ukr.net](mailto:kola0123@ukr.net).