

УДК 621.833

DOI: 10.18372/0370-2197.4(89).15013

П. Л. НОСКО¹, О. В. БАШТА¹, О. В. РАДЬКО², Г. О. БОЙКО³,
О. В. ГЕРАСИМОВА¹

¹Національний авіаційний університет, Україна

²Національний університет оборони України імені І. Черняхівського, Україна

³Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Україна

ВИБІР УЗАГАЛЬНЕНОГО КРИТЕРІЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

Проведено аналіз сучасного стану застосування, режимів експлуатації високошвидкісних зубчастих передач в енергетичному машинобудуванні. Показана доцільність застосування ККД передачі в якості узагальненого критерію ефективності високошвидкісних зубчастих передач, який поєднує енергетичні втрати, показники міцності, геометричні та конструктивні параметри режиму і умов експлуатації, матеріали і технології виготовлення, навантаження і окружні швидкості зубчастих передач. ККД може розглядатися узагальненим критерієм ефективності високошвидкісних зубчастих передач з урахуванням умов та режимів їх експлуатації, матеріалів та технології виготовлення, навантаження що передається та колової швидкості. Втрати потужності можна умовно розділити на ті, що залежать від навантаження, що передається - механічне тертя в зачепленні та підшипниках, і ті, які не залежать від навантаження - аерогідродинамічний опір, періодичне стискання та розширення між зубцями. Основними способами подачі масла до деталей і вузлів зубчастої передачі, є змащування за допомогою занурення в масляну ванну, розбризкування із основної масляної ванни і циркуляційна подача масла їх застосовують в залежності від умов експлуатації. Співвідношення сил аеродинамічного і гідромеханічного опору визначається рівнем масла в масляній ванні. Для кожного зубчастого колеса, частково або повністю зануреного в масляну ванну потужність, затрачену на подолання гідромеханічного опору, можна представити у вигляді суми моменту сил в'язкісного тертя на торцях зубчастого колеса в масляній ванні, моменту сил в'язкісного тертя на периферії головок зубчастого колеса в масляній ванні та моменту сили Кориоліса, яка виникає внаслідок радіального переміщення масла, в западині зубчастого колеса. На даний час відсутня узагальнююча аналітична модель, яка об'єднає всі види втрат. Проведені теоретичні дослідження дозволили встановити наявність двох режимів руху масла в западинах зубчастих коліс. Розрахунок дозволяє врахувати не тільки вплив геометричних параметрів зубчастих коліс, занурених в масляну ванну, але й конструктивні характеристики.

Ключові слова: втрати потужності, зубчасте зачеплення, узагальнений критерій, геометричні параметри.

Вступ. Сучасне енергетичне, хімічне і транспортне машинобудування гостро потребує значної кількості редукторів для компресорних станцій газопроводів, компресорів, перспективних моделей гідравлічних, парових і газових турбогенераторів і коробок швидкостей для двигунів внутрішнього згорання. В якості двигуна в таких установках використовують парову, газову або гідравлічну турбину.

Виконавчими машинами є електрогенератори, повітряні і газові компресори, гідравлічні насоси. Розбіжність оптимальних частот обертання двигуна і виконавчої машини обумовлює необхідність застосування зубчастого редуктора.

Загальною тенденцією розвитку енергетичних машин є зростання їх потужності і ККД.

Аналіз останніх досліджень і літератури. Сучасний стан досліджень зубчастих передач можна розділити за наступними напрямками:

а) розробка геометрії нових видів зачеплень на підставі застосування класичної геометро-кінематичної теорії зачеплення, створеної Х.І. Гохманом [1], М.І. Колчіним [2], Ф.Л. Литвиним [3], В.А. Гавриленко [4,5]. Я. С. Давидовим, Л.В. Коростильовим, М.М. Криловим, М.Л. Новіковим [6], І.І. Дусевим, І.А. Болотовським [7], К.М. Пісманіком, М.Л. Еріховим, Є.Б. Булгаковим і, що отримала подальший розвиток в роботах В.П. Шишова [8, 9, 10, 11, 12], П. Л. Носко [13, 14, 15], В.В. Ставицького [16], П.М. Ткача [17], О.П. Карпова [18], В. І. Безрукова, В. Н. Сизранцева, А. Е. Беляєва, М. Г. Сегалья, Г. І. Шевельової, В. І. Гольдфарба, А. К. Георгієва, С. А. Лагутіна, І. А. Бостан, Б. А. Лопатіна та інших вчених;

б) дослідження напруженого стану зубців передач з метою розробки найбільш достовірною методикою розрахунку на міцність передач. Цей напрямок відображено в роботах М.Б. Громана, В.Н. Кудрявцева [19,20], Д.Н. Решетова [21], М.Д. Генкіна [22], К.І. Заблонського [23], С.С. Гутирі [24], Г.Б. Іосілевіча, Л.Д. Часовнікова, Е.Л. Айрапетова, Ю.А. Державця [25], В.Л. Устиненко, праці яких знайшли своє відображення в стандартних методиках розрахунку певних видів зубчастих передач (розвиток досліджень в цьому напрямку йде шляхом поширення класичних методів розрахунку на новий вид передач з урахуванням їх геометричних особливостей і конкретних умов експлуатації (праці Е.Г. Гінзбурга [26], В.І. Глаза, Г.А. Лопато, Г.А. Журавльова, Р.Б. Юфіса, В.М. Ястребова, Е.С. Трубачова);

в) вдосконалення існуючих методик синтезу передач, шляхом проектування передач на основі оптимізаційних моделей, побудованих на певних умовах, які відображають в собі вимоги до передач в реальних умовах експлуатації (максимальна зносостійкість зубів, максимальна контактна міцність, мінімальні габарити передач і т.п.) (праці Д.С. Кодніра [27], П.А. Журавльова, П.А. Лопато, Ю.Н. Дроздова, А.С. Кунівера, Д.Т. Бабічева та інших вчених);

г) розробка і вдосконалення способів виготовлення і контролю зубців коліс, застосування сучасних матеріалів і різних видів хіміко-термічної обробки коліс, сприяють збільшенню несучої здатності передач (праці Б.А. Тайца, А.Л. Марочної, М.Г. Сегалья, А.К. Георгієва, М.Л. Еріхова, В.Є. Старжинського, Е.І. Тескера і багатьох інших дослідників);

д) експериментальні дослідження напруженого стану зубців і здатності навантаження зубчастих передач з метою уточнення існуючих методик їх розрахунку (праці Г. К. Трубіна, М. Д. Генкіна, Г. Німана, Д. Н. Решетова, В.М. Кудрявцева, Н.Є. Ремезіной, В.Л. Білого, М.М. Хрушова, В.М. Сизранцева, С.А. Голофаства).

В результаті досліджень зубчастих передач запропоновані основні критерії їх працездатності:

а) геометро-кінематичні критерії (відносна швидкість, швидкість точок контакту поверхонь шестерні (колеса) в напрямку перпендикулярному лінії контакту, сумарна швидкість точок контакту, зведена кривизна точок робочих поверхонь зубців, питоме ковзання та інші);

б) комплексні критерії (контактної міцності (Г.Герц), зносу (І.В. Крагельський), товщини масляного шару між робочими поверхнями зубців (Д.С. Коднір), температурного стану (Г. Блок), питомої роботи сил тертя для миттєвої контактної лінії (В.Н. Кудрявцев)).

Аналіз застосування комплексних критеріїв працездатності при синтезі зубчастих передач показав, що їх не можна в повній мірі вважати комплексними

тому що вони розглядаються незалежними один від одного [28]. Тому для вирішення питань синтезу енергозберігаючих високошвидкісних зубчастих передач трансмісій енергетичних машин доцільно застосовувати узагальнений критерій, який поєднує енергетичні втрати, показники міцності, геометричні та конструктивні параметри режими і умови експлуатації зубчастих передач.

У сучасному машинобудуванні спостерігається тенденція зниження маси і габаритів зубчастих передач, що неминує призводить до зниження характеристик теплообміну. У той же час постійне зростання переданих потужностей і швидкостей викликає значну дисипацію енергії і, як наслідок, зростання температур в зубчастих передачах, що в свою чергу погіршує механічні характеристики функціонування деталей передач і знижує їх термін експлуатації. У зв'язку з цим узагальненим критерієм ефективності високошвидкісних зубчастих передач може розглядатися ККД передачі з урахуванням умов і режимів її експлуатації, матеріалів і технології виготовлення, навантаження що передається і окружної швидкості.

Аналіз досліджень ефективності експлуатації зубчастих передач. Проведений аналіз робіт в області досліджень ефективності експлуатації зубчастих передач і джерел дисипації енергії, здійснених під керівництвом Phillipe Velez (Contact and Solid Mechanics Laboratory 'de Mechanical Engineering Department, Lyon, France, ECAM) [29, 30, 31, 32]; під керівництвом Ahmet Kahraman (Ohio State University, USA) [33], показує, що втрати потужності умовно можна розділити на втрати, які залежать від навантаження, що передаються, (механічне тертя в зачепленні і підшипниках), і втрати, які не залежать від навантаження (аеродинамічний опір, періодичне стиснення і розширення між зубцями).

Оцінки питомої ваги того чи іншого виду дисипації в загальних втратах потужності, наявні в літературі дуже суперечливі.

Наприклад, в дослідженні N.E. Anderson [34] відзначається, що втрати на тертя в зубчастому зачепленні складають 40%; в підшипниках - 20%; втрати аеродинамічного опору - 10%. У роботах [35], [36] на підставі широкої експериментальної бази відзначається, що втрати потужності аеродинамічного опору при часткових навантаженнях практично дорівнюють втратам на тертя в зубчастому зачепленні.

Суперечливість висновків може бути пояснена різними умовами проведення експериментальних досліджень. Найбільш ретельне дослідження розподілу втрат потужності за їх видами проведено в Малайзійському університеті [37]. Heingartner і Mba запропонували математичну модель розрахунку втрат потужності різних джерел дисипації, засновану на наявних в літературі емпіричних рівняннях, і перевірили результати експериментально. Експерименти проводилися при повному (8,95 МВт) і частковому навантаженнях (табл.1) при частоті 1460 об/хв протягом чотирьох годин.

Випробовувалася зубчаста передача з наступними параметрами: число зубців шестерні і колеса відповідно – 21 і 115; міжосьова відстань - 609,6 мм; модуль зачеплення – 8 мм; кут верстатного зачеплення - 20; кут нахилу лінії зубців – 25°; ширина зубчастого вінця – 285,75 мм; коефіцієнти зміщення ріжучого інструменту 0,181 і 0,989. При таких розмірах і частоті обертання вхідного вала окружна швидкість склала 78,811 м/с.

Висновки.

1. Показана доцільність застосовування узагальненого критерію, який поєднує енергетичні втрати, показники міцності, геометричні та конструктивні параметри режими і умови експлуатації зубчастих передач.

Таблиця 1

Відносний розподіл видів втрат в зубчастій передачі

Потужність на вхідному валу, МВт	8,952	6,714	4,476	2,238
Відносне навантаження, %	100%	75%	50%	25%
Сумарні втрати (експеримент), кВт	125,33	116,82	112,35	106,75
Відносні втрати (експеримент), %	1,4	1,74	2,51	4,77
Втрати зубчастої пари (експеримент), кВт	55,08	50,15	50,16	49,42
Втрати зубчастої пари (розрахунок), кВт	57,41	53,3	49,86	47,42
Складові втрат (кВт):				
Втрати тертя ковзання, кВт	10,88	6,672	3,05	0,34
Відносні втрати ковзання, %	19	12,5	6	0,7
Втрати тертя кочення, кВт	5,71	5,821	5,98	6,27
Відносні втрати кочення, кВт	10	11	12	13,3
Втрати аеро- опору, кВт	40,82	40,82	40,82	40,82
Відносний аеро- опір, кВт	71	76,5	82	86

2. Показана доцільність застосовування узагальненого критерію, який поєднує енергетичні втрати, показники міцності, геометричні та конструктивні параметри режими і умови експлуатації зубчастих передач.

3. В якості узагальненого критерію ефективності високошвидкісних зубчастих передач доцільно розглядати ККД передачі з урахуванням умов і режимів її експлуатації, матеріалів і технології виготовлення, навантаження що передається і окружної швидкості.

Список літератури

1. Гохман Х.И. Теория зацеплений, обобщенная и развитая путем анализа / Х.И. Гохман. - Одесса. - 1886.
2. Колчин Н.И. Механика машин / Н.И. Колчин - Л.: Машиностроение - 1971.
3. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений / Ф.Л. Литвин - М.: Наука, 1968 - 584с.
4. Гавриленко В.А. Зубчатые передачи в машиностроении / В.А. Гавриленко - М.: Машгиз. 1962. - 531 с.
5. Гавриленко В.А. Основы теории эвольвентной зубчатой передачи / В.А. Гавриленко - Л.: Машиностроение. - 1969. - 432 с.
6. Новиков М. Л. Зубчатые передачи с новым зацеплением / М.Л. Новиков. - М. - 1958. - 186 с.
7. Болотовский И.А. Цилиндрические эвольвентные зубчатые передачи внешнего зацепления. Справочное пособие / И.А. Болотовский, Б.И. Гурьев, В.Э. Смирнов, Б.И. Шендере́й - М.: Машиностроение, 1974. -160 с.
8. Шишов В.П. Теоретические основы синтеза передач зацеплением / В.П. Шишов. П.Л. Носко, П.В. Филь: Монография. - Луганск; Изд-во СЛУ им. В. Даля, 2006. - 408 с.
9. Шишов В.П. Дифференциальные уравнения для синтеза полуобкатных цилиндрических прямозубых передач по геометро-кинематическим критериям / В.П. Шишов, Ткач П.Н., О.А. Ревякина, И.Г. Ткач // Научный вестник Луганского национального аграрного университета. Серия: Технические науки. - Луганск: Издательски ЛНАУ. - 2009. №3. -С. 195-200.
10. Шишов В.П. Критерии оценки работоспособности передач зацеплением / В.П. Шишов, Д.А. Панкратов, О.А. Муховатый // Вісник НТУ «ХП». - Харків: НТУ «ХП». 2001. - №12, с 27-33.
11. Шишов В.П. Синтез цилиндрических зубчатых передач с высокой нагрузочной способностью / В.П. Шишов, П.Н. Ткач, О.А. Ревякина О.А. Муховатый // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. - Луганск: Вид-во ВЛУ ім. В. Даля. - 2002.- №10 (56). - с. 247-254.
12. Шишов В.П. Высоконагруженные глобоидные и спироидные червячные передачи /

Шишов В.П., Муховатий А.А., Носко П.Л., Башта О.В., Філь П.В., Бойко Г.А. // Монографія – К.: НАУ, 2017. -240с.

13. Носко П.Л. Оптимальное проектирование машиностроительных конструкций / П.Л. Носко. - Луганск: Изд-во ВУГУ, 1999. - 392 с.

14. Носко П.Л. Основи синтезу вихідного контуру циліндричних зубчастих передач із зменшенням питомої роботи сил тертя в зацепленні / П.Л. Носко, В.П. Шишов, П.М. Ткач, О.А. Муховатий // Вісник НТУ «ХПІ». - Харків: НТУ «ХПІ». - 2010. - №27. ~ С. 128-133.

15. P.Nosko, S.Kashkarov, O.Bashta, Yu.Tsibriy, A.Bashta. Improved and extreme geometrokinematic parameters of high-loaded hyperboloid gears // Проблеми тертя та зношування, 3 (84).- 2019. – pp.63-68.

16. Ставицкий В.В. Метод синтеза эффективных высокоскоростных зубчатых передач / Ставицкий В.В., Носко П.Л. // Праці Одеського політехнічного університету: Наук, та наук-вироб. зб. - Одеса. -2012 -Вип. 1 (38).-С. 51-57.

17. P.Tkach, P.Nosko, O.Bashta, A.Lysenko, A.Bashta. Arched transmissions teeth geometry within offset of initial profile // Проблеми тертя та зношування, 4 (85).- 2019.

18. O.Karpov, P.Nosko, P.Fil, G.Boyko, O.Bashta, D.Marchenko, A. Golovin. Noncircular-screw gears // Проблеми тертя та зношування, 4 (73).- 2016. – pp.80-89.

19. Кудрявцев В.Н. Зубчатые передачи / В.Н. Кудрявцев. -М.: Машгиз, Ленинградское отделение, 1957. - 263 с.

20. Кудрявцев В.Н. Расчет и проектирование зубчатых редукторов: Справочник / В.Н. Кудрявцев, И.С. Кузьмин, А.Л. Флипенков; Под общ. ред. В.Н. Кудрявцева. - СПб.: Политехника, 1993. - 448 с.

21. Решетов Д.Н. Детали машин / Д.Н. Решетов. Машиностроение, 1989. - 497 с.

22. Генкин М.Д. Вопросы заедания зубчатых колес / М.Д. Генкин, Н.Ф. Кузьмин, Ю.А. Мишарин. - М: Изд-во АН СССР, 1959. - С. 1-147.

23. Заблонский К.И. Совершенствование и стандартизация расчетов нагрузочной способности зубчатых передач / К.И. Заблонский, Филипович С.И. // Тр. Одес. политех. ун-та. - Одесса, 1999. -Вып. 1(7). - с. 33 - 37.

24. Гутьяря С.С. Моделирование динамического нагружения зубьев передач зацеплением / С.С. Гутьяря, Б.В. Мотулько, Д.Д. Трошинский // Тр. Одес. политехн. ун-та. - Одесса, 2005. Вып.1(23). -С. 25 -28.

25. Редукторы энергетических машин; Справочник / Б.А. Балашов, Р.Р. Гальперин, Л.М. Гаркави и др. Под ред. Ю.А. Державца. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1985. - 232 с.

26. Гинзбург Е.Г. Коэффициент полезного действия волновых зубчатых передач / Е.Г. Гинзбург // Зубчатые и червячные передачи.-Л.: Машиностроение, 1968.-С. 192-208.

27. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин / Д.С. Коднир. - М.: Машиностроение, 1976. - 304 с.

28. Муховатий А.А. Критерии оценки работоспособности передач зацеплением / А.А. Муховатий // Вестник НТУ «ХПІ» - Харків: ХПІ. 2001. - №12. - С. 33-40.

29. Changenet C., Oviedo-Marlot X., Vexel P. (2006) Power loss predictions in geared transmissions using thermal networks-applications to a six-speed manual gearbox, ASME Journal of Mechanical Design, 128, 618-625.

30. Changenet C., Vexel P. (2007) A model for the prediction of churning losses in geared transmissions – preliminary results, ASME Journal of Mechanical Design, 129, 128-133.

31. Changenet C., Vexel P. (2008) Housing influence on churning losses in geared transmissions, ASME Journal of Mechanical Design, 130(6).

32. Diab Y. Windage losses in high speed gears - Preliminary experimental and theoretical results. / Y. Diab, F. Ville, C. Changenet. P. Vexel // ASME Journal of mechanical design. - 2004. - № 126(5). - P. 903-908.

33. Seetharaman S., Kahraman A., Moorhead M.D., Petry-Johnson T.T. (2009) Oil churning power losses of a gear pair: experiments and model, Journal of Tribology, Vol. 131, 1-9.

34. Anderson N. E. Efficiency of non-standard and high contact ratio involute spur gears. / N.E. Anderson, S.H. Loewenthal // Journal of mechanisms, transmissions and automation in design.

- 1986. - Vol. 108. P-119-126.

35. Handschuh R.F. Preliminary comparison of experimental and analytical efficiency results of high-speed helical gear trains / R.F Handschuh, C.J. Kilmain // DETC'03: ASME 2003 Design engineering technical conference and computers and information in engineering conference. -2003. - Vol. 4B. - P. 949-955.

36. Handschuh R.F. Preliminary investigation of the thermal behavior of high-speed helical gear trains / R.F. Handschuh, C.J. Kilmain // International federation for the theory of machines and mechanisms; International conference on gears. Munich, Germany, March 2002. -NASA/TM-2002-211336 ARL-TR-2661.

37. Heingartner P., Mba D. (2005) Determination power losses in the helical gear mesh, Gear technology, 32-37.

Стаття надійшла до редакції 30.11.2020.

Носко Павло Леонідович – д.т.н., професор, професор кафедри машинознавства, стандартизації та сертифікації Національного авіаційного університету, м. Київ, Україна, тел. 406-78-42.

Башта Олександр Васильович– к.т.н., доц., доцент кафедри машинознавства, стандартизації та сертифікації Національного авіаційного університету, м. Київ, Україна, nau12@ukr.net.

Радько Олег Віталійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри авіації Національний університет оборони України імені І. Черняховського, м. Київ, Україна.

Бойко Григорій Олексійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля.

Герасимова Ольга Вячеславівна – м.н.с. кафедри машинознавства, стандартизації та сертифікації Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна, тел. 406-78-42, nau12@ukr.net.

P. NOSKO, O. BASHTA, O. RADKO, G. BOYKO, O. GERASIMOVA

SELECTION OF GENERAL CRITERIA FOR THE EFFECTIVENESS OF HIGH-SPEED GEARS

The analysis of the current state of application, modes of operation of high-speed gears in power engineering is carried out. The expediency of using transmission efficiency as a generalized criterion of high-speed gear transmission efficiency, which combines energy losses, strength indicators, geometric and structural parameters, modes and conditions of operation, materials and manufacturing technologies, loads and gear speeds. Efficiency can be considered as a generalized criterion of effectiveness of high-speed gears, taking into account the conditions and modes of their operation, materials and manufacturing technology, the transmitted load and gear speed. Power losses can be divided into those that depend on the transmitted load - mechanical friction in the gears and bearings, and those that do not depend on the load - aerohydrodynamic resistance, periodic compression and expansion between the teeth. The main methods of oil supply to parts and gear units are lubrication by immersion in an oil bath, spraying from the main oil bath and circulating oil supply, they are used depending on the operating conditions. The ratio of aerodynamic and hydromechanical drag forces is determined by the oil level in the oil bath. For each gear, partially or completely immersed in the oil bath, the power expended to overcome the hydromechanical resistance can be represented as the sum of the moment of viscous friction forces at the ends of the gear in the oil bath, the moment of viscous friction forces on the periphery of the gear heads in the oil bath and the moment of Coriolis force, which occurs due to the radial movement of the oil, in the cavity of the gear. There is currently no generalized analytical model that combines all types of losses. The conducted theoretical researches allowed to establish existence of two modes of movement of oil in hollows of gear wheels. The calculation allows to take into account not only the influence of the geometric parameters of the gears immersed in the oil bath, but also the design characteristics.

Key words: power losses, gearing, generalized criterion, geometrical parameters.

References

1. Hokhman X.Y. *Teoriya zatseplenyi, obobshchennaia y razvytaia putem analiza* / X.Y. Hokhman. - Odessa. - 1886.
2. Kolchyn H.Y. *Mekhanyka mashyn* / N.Y. Kolchyn - L.: Mashynostroenye - 1971.
3. Lytvyn F.L. *Teoriya zubchatykh zatseplenyi* / F.L. Lytvyn - M.: Nauka, 1968 - 584s.
4. Havrylenko V.A. *Zubchatye peredachy v mashynostroenyy* / V.A. Havrylenko - M.: Mashyz. 1962. - 531 s.
5. Havrylenko V.A. *Osnovy teoryy evolventoi zubchatoi peredachy* / V.A. Havrylenko - L.: Mashynostroenye. - 1969. - 432 s.
6. Novykov M. L. *Zubchatye peredachy s novym zatseplenyem* / M.L. Novykov. - M. - 1958. - 186 s.
7. Bolotovskiy Y.A. *Tsylyndrycheskiye evolventnye zubchatye peredachy vneshneho zatsepleniya. Spravochnoe posobyie* / Y.A. Bolotovskiy, B.Y. Hurev, V.Э. Smyrnov, B.Y. Shenderei - M.: Mashynostroenye, 1974. -160 s.
8. Shyshov V.P. *Teoretycheskiye osnovy synteza peredach zatseplenyem* / V.P. Shyshov. P.L. Nosko, P.V. Fyl: *Monohrafiya*. - Luhansk; Yzd-vo SNU ym. V. Dalia, 2006. - 408 s.
9. Shyshov V.P. *Dyfferentsyalnye uravneniya dlia synteza poluobkatnykh tsylyndrycheskykh priamozubnykh peredach po heometro-kinematycheskym kryteriyam* / V.P. Shyshov, Tkach P.N., O.A. Reviakyna, Y.H. Tkach // *Nauchnyi vestnyk Luhanskoho natsyonalnoho ahrarnoho unyversyteta. Seryia: Tekhnicheskiye nauky*. - Luhansk: Yzdatelsky LNAU. - 2009. №3. -S. 195-200.
10. Shyshov V.P. *Kryteryu otsenky rabotosposobnosti peredach zatseplenyem* / V.P. Shyshov, D.A. Pankratov, O.A. Mukhovatyi // *Visnyk NTU «KhPI»*. - Kharkiv: NTU «KhPI».

2001. - №12, . s 27-33.

11. Shyshov V.P. Syntez tsylindrycheskykh zubchatelykh peredach s vysokoi nahruzochnoi sposobnostiu / V.P. Shyshov, P.N. Tkach, O.A. Reviakyna O.A. Mukhovatyi // Visnyk Skhidnoukr. nats. un-tu im. V. Dalia. - Luhansk: Vyd-vo VNU im. V. Dalia. - 2002.- №10 (56). - S. 247-254.

12. Shyshov V.P. Vysokonahruzhenные hloboydные y spyroydные chervyachные peredachy / Shyshov V.P., Mukhovaty A.A., Nosko P.L., Bashta O.V., Fil P.V., Boiko H.A. // Monohrafiia – K.: NAU, 2017. -240s.

13. Nosko P.L. Optymalnoe proektyrovanye mashynostroitelnykh konstruksiy / P.L. Nosko. - Luhansk: Yzd-vo VUHU, 1999. - 392 s.

14. Nosko P.L. Osnovy syntezu vykhidnoho konturu tsylindrychnykh zubchastykh peredach iz zmnshenniam pytomoi roboty syl tertia v zacheplenni / P.L. Nosko, V.P. Shyshov, P.M. Tkach, O.A. Mukhovaty // Visnyk NTU «KhPI». - Kharkiv: NTU «KhPI». - 2010. - №27. ~ S. 128-133.

15. P.Nosko, S.Kashkarov, O.Bashta, Yu.Tsibriy, A.Bashta. Improved and extreme geometro-kinematic parameters of high-loaded hyperboloid gears // Problemy tertia ta znoshuvannia, 3 (84).- 2019. – pp.63-68.

16. Stavyt'skyi V.V. Metod synteza efektyvnykh vysokoskorostnykh zubchatelykh peredach / Stavyt'skyi V.V., Nosko P.L. // Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu: Nauk, ta nauk-vyrob. zb. - Odesa. -2012 -Vyp. 1 (38).-S. 51-57.

17. P.Tkach, P.Nosko, O.Bashta, A.Lysenko, A.Bashta. Arched transmissions teeth geometry within offset of initial profile // Problemy tertia ta znoshuvannia, 4 (85).- 2019.

18. O.Karpov, P.Nosko, P.Fil, G.Boyko, O.Bashta, D.Marchenko, A. Golovin. Noncircular-screw gears // Problemy tertia ta znoshuvannia, 4 (73).- 2016. – pp.80-89.

19. Kudriavtsev V.N. Zubchatye peredachy / V.N. Kudriavtsev. -M.: Mashhyz, Lenynhradskoe otdelenye, 1957. - 263 s.

20. Kudriavtsev V.N. Raschet y proektyrovanye zubchatelykh reduktorov: Spravochnyk / V.N. Kudriavtsev, Y.S. Kuzmyn, A.L. Fnlypenkov; Pod obshch. red. V.N. Kudriavtseva. - SPb.: Polytekhnika, 1993. - 448 s.

21. Reshetov D.N. Detaly mashyn / D.N. Reshetov. Mashynostroenye, 1989. - 497 s.

22. Henkn M.D. Voprosy zaedaniya zubchatelykh koles / M.D. Henkyn, N.F. Kuzmyn, Yu.A. Mysharyn. - M: Yzd-vo AN SSSR, 1959. - S. 1-147.

23. Zablonskyu K.Y. Sovershenstvovanye y standartyzatsiya raschetov nahruzochnoi sposobnosti zubchatelykh peredach / K.Y. Zablonskyu, Fylypovych S.Y. // Tr. Odes. polytekh. un-ta. - Odessa, 1999. -Vyp. 1(7). - s. 33 - 37.

24. Hut'ryia S.S. Modelyrovanye dynamycheskoho nahruzheniya zubev peredach zatseplenem / S.S. Hut'ryia, B.V. Motulko, D.D. Troshchynskiy // Tr. Odes. polytekh. un-ta. - Odessa, 2005. Vyp.1(23). -S. 25 -28.

25. Reduktory enerhetycheskykh mashyn; Spravochnyk / B.A. Balashov, R.R. Halperyn, L.M. Harkavy y dr. Pod red. Yu.A. Derzhavtsa. - L.: Mashynostroenye. Lenynhr. otd-nye, 1985. - 232 s.

26. Hynzburh E.H. Koэфfyt'syent poleznoho deistviya volnovykh zubchatelykh peredach / E.H. Hynzburh // Zubchatye y chervyachные peredachy.-L.: Mashynostroenye, 1968.-S. 192-208.

27. Kodnyr D.S. Kontaknaia hydrodynamyka smazky detalei mashyn / D.S. Kodnyr. - M.: Mashynostroenye, 1976. - 304 s.

28. Mukhovatyi A.A. Krytery otsenky rabotosposobnosti peredach zatseplenem / A.A. Mukhovaty // Vestnyk NTU «KhPY» - Kharkov: KhPY. 2001. - №12. - S. 33-40.

29. Changenet C., Oviedo-Marlot X., Vexel P. (2006) Power loss predictions in geared transmissions using thermal networks-applications to a six-speed manual gearbox, ASME Journal of Mechanical Design, 128, 618-625.

30. Changenet C., Vexel P. (2007) A model for the prediction of churning losses in geared transmissions – preliminary results, ASME Journal of Mechanical Design, 129, 128-133.

31. Changenet C., Vexel P. (2008) Housing influence on churning losses in geared

transmissions, ASME Journal of Mechanical Design, 130(6).

32. Diab Y. Windage losses in high speed gears - Preliminary experimental and theoretical results. / Y. Diab, F. Ville, C. Changenet. P. Vexlex // ASME Journal of mechanical design. - 2004. - № 126(5). - P. 903-908.

33. Seetharaman S., Kahraman A., Moorhead M.D., Petry-Johnson T.T. (2009) Oil churning power losses of a gear pair: experiments and model, Journal of Tribology, Vol. 131, 1-9.

34. Anderson N. E. Efficiency of non-standard and high contact ratio involute spur gears. / N.E. Anderson, S.H. Loewenthal // Journal of mechanisms, transmissions and automation in design. - 1986. - Vol. 108. P-119-126.

35. Handschuh R.F. Preliminary comparison of experimental and analytical efficiency results of high-speed helical gear trains / R.F Handschuh, C.J. Kilmain // DETC03: ASME 2003 Design engineering technical conference and computers and information in engineering conference. -2003. - Vol. 4B. - P. 949-955.

36. Handschuh R.F. Preliminary investigation of the thermal behavior of high-speed helical gear trains / R.F. Handschuh, C.J. Kilmain // International federation for the theory of machines and mechanisms; International conference on gears. Munich, Germany, March 2002. -NASA/TM-2002-211336 ARL-TR-2661.

37. Heingartner P., Mba D. (2005) Determination power losses in the helical gear mesh, Gear technology, 32-37.