Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2021. Вип. № 3(9)
ISSN 2706-7386
УДК 629.735.45 DOI: 10.37701/dndivsovt.9.2021.13

Пилипенко О.І., Колесник Д.М., Березняк А.М., Кохан В.В. *Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*
Панкул О.М. *Війьскова частина А4465*

ЗАСОБИ, СТЕНДИ ТА МАШИНИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС І ПЕРЕДАЧ ВЕРТОЛЬОТНИХ РЕДУКТОРІВ

Представлені різні засоби для випробувань зубчастих коліс і передач редукторів вертольотів, які знайшли застосування у випробувальній техніці. Розглянуті прилади, тестери, стенди та машини для різних випробувань з метою контролю характеристик зубчастих передач редукторів авіаційного призначення після певних періодів їх роботи та ремонту, направлених на досягнення кращих показників під час подальшої експлуатації.

Ключові слова: *засоби для випробувань зубчастих коліс і передач редукторів вертольотів.*

Постановка проблеми. Парк вертольотів експлуатується в даний час згідно ресурсу, зумовленого їхнім технічним станом. Неповна відповідність умов випробувань і експлуатації не виключає ймовірності появи дефектів, які можуть призвести до відмов у польоті. Тому вага діагностики і прогнозування технічного стану цієї авіаційної техніки з бігом часу невпинно зростає.

Вертольоти Мі-8МТ(МТВ) складають основу вертольотної військово-транспортної авіації багатьох країн світу та відзначаються своєю потужністю та надійністю, а також мають значний запас міцності. Надійність вертольотів та їх обладнання визначається конструкцією і якістю виготовлення. Проте, в ході експлуатації з причини старіння матеріалів і зовнішніх впливів надійність вертольотів та їх обладнання знижується з часом. Для повного використання ресурсу і терміну служби, в умовах експлуатації необхідно забезпечувати як мінімум працездатний стан цієї авіаційної техніки.

Надійність і якість роботи авіваційних двигунів значною мірою залежати від роботи зубчастих передач. У газотурбінних двигунах зубчасті передачі застосовуються для відбору потужності у газової турбіни і розподілу енергії за місцем призначення для приводу гвинтів, допоміжних агрегатів та пристроїв. Порушення роботи зубчастих передач може призвести як до відмови окремих агрегатів, так і до припинення роботи авіаційного двигуна.

Наразі актуальною проблемою є повне використання ресурсів і термінів служби наявного парку вертольотів. Ефективне використання цього парку визначається не тільки рівнем льотно-технічних характеристик, але і суттєво залежить від технічного обслуговування та ремонту.

Отже, необхідність і доцільність розробки та застосування методів і засобів для випробувань авіаційних приводів, зокрема, вертольотних, підтверджується досвідом їх експлуатації.

Аналіз досліджень і публікацій. Надійність вертольотів значною мірою визначаєься надійністю його роторних динамічних систем, до яких відносяться агрегати несучої системи – несучий гвинт і трансмісія, основою якої є головний редуктор, елементи силової установки – двигуни, проміжний і хвостовий редуктори, приводи агрегатів. Зубчасті передачі основного кінематичного ланцюга головних і проміжних редукторів, приводів двигунів та агрегатів вертольотів, а також інші передачі, у тому числі кінематичні, є високонапруженими, а частина з них – також і високошвидкісними [1]. Роторні агрегати є уразливими з точки зору безпеки польотів, оскільки вони відносяться,як правило, до нерезервованих і не мають дублюючих систем [2].

Якість конкретного екземпляру вертольотного редуктора не тільки впливає на льотні характеристики окремо взятого вертольоту, але і визначає небезпеку для життя екіпажу, оточуючих, будівель в процесі експлуатації. Редуктор є ключовим вузлом вертольоту з точки

© Пилипенко О.І., Колесник Д.М., Березняк А.М., Кохан В.В., Панкул О.М., 2021

зору надійності. Якщо редуктор заклинить, то екіпаж не зможе здійснити безпечну посадку [3].

В [4] розглянуті загальні питання випробувань деталей машин – вимірювання окремих параметрів, дослідження за основними критеріями, неруйнівний контроль та випробування деяких деталей машин. По кожній групі деталей машин приведені методи випробувань, конструкції випробувальних машин та вимірювальні засоби. Даються рекомендації щодо вибору конструкцій машин, вимірвальних пристроїв і методів випробувань.

Випробування зубчастих передач здійснюються з метою визначення їх якісних і кількісних характеристик: показників за критнріями працездатності та надійності, параметрів міцності, стійкості, довговічності та надійності матеріалів зубчастих коліс з врахуванням технологій виготовлення і умов експлуатації. Метою випробувань може бути також порівняльна оцінка і оптимізація зубчастих передач за зазначеними показниками, виявлення факторів впливу на ці показники, перевірка і удосконалення теоретичних залежностей, за якими відбувався розрахунок передач.

Види випробувань залежать від обраного критерію, що диктується їх метою: це може бути згинальна і контактна міцність зубців коліс, опір заїданню між ними, їх зносостійкість, віброактивність, кінематична точність, жорсткість, втрати на тертя. Ще випробування розподіляють за видами застосовуваного обладнання та зразків, режимами і характером навантаження, умовами роботи і показниками надійності [1].

Що стосується стану нормування точності зубчастих коліс і передач, то ГОСТи в цій галузі не переглядалися з 80-х років минулого століття. В 1991 році було запропоновано [5] перейти на міжнародний стандарт ISO 1628 в редакції 2006 року. Ця пропозиція була реалізована філіалом НТЦ “Редуктор” в м. Києві, який відтоді діє за цим міжнародним стандартом.

Зараз чітко прослідковуються декілька тенденцій у зміні технологічних і точністних вимог до зубчастих коліс. В основу покладено посилення вимог до зубчастих передач, зумовлене підвищеними вимогами до кінцевого виробу, куди входять деталі з зубчастим вінцем, – редукторів: збільшення ресурсу та ремонтоздатності; підвищення коефіцієнта корисної дії; збільшення потужності, що передається; підвищення надійності; покращення динамічних характеристик; зниження габаритних розмірів і ваги; зниження рівня шуму; зниження вартості.

В [6, 7] коротко розглянуті деякі засоби діагностування зубчастих передач вертольотних редукторів і стенди для їх випробувань.

Одним з перспективних напрямків є метод аналізу кінематичних погрішностей [1], проте його застосування в експлуатаційному режимі обмежено конструктивно-технологічними складнощами.

Кінематичні погрішності зачеплення працюючої зубчастої передачі можуть визначатися як прямим вимірюванням – тензометрируванням або кінематометрируванням зубців, так і побічним вимірюванням – вібрографіруванням.

Пряме тензометрування дає найбільш точну картину навантажень зуба, але до недоліків цього засобу діагностування слід віднести суттєву трудомісткість підготовчих робіт, шо не дає можливості провести експрес-аналіз роботи довільної зубчастої передачі, тим паче в експлуатаційному режимі. А це суттєво обмежує застосування цього методу.

Найбільш поширеним методом контролю і діагностики зубчастих передач до останнього часу є вібрографірування, проте існуючі методики не дають достовірної картини стану передачі, особливо контактної взаємодії зубців. Під час роботи передачі в складі вертольотного редуктора на створюваний зубчастою передачею вібросигнал накладаються сигнали від інших джерел: роторів, лопатей, валів, підшипників, що значно ускладнює виділення і обробку потрібного вібросигналу.

В якості альтернативи вібрографіруванню було запропоновано кінематометрирування зубчастих передач під час експлуатації. А оскільки при цьому виникають експлуатаційні навантаження, то всі параметри зачеплення визначаються з врахуванням деформацій всіх

елементів передачі. Кінематометрія є одним з найбільш ефективних методів контролю і діагностування технічного стану кінематичних ланцюгів різної складності, куди входять зубчасті передачі, підшипники кочення і ковзання, муфтові з'єднання і т.п. ланки механізмів. За результатами цього контролю можуть бути визначені основні складові кінематичної погрішності механізму [8], аналіз яких дозволяє діагностувати його технічний стан з глибиною до окремої кінематичної ланки.

В процесі роботи механізму його ланки взаємодіють одна з іншою по твірним контактних поверхонь. Наявність тих чи інших дефектів цих поверхонь призводить до відхилення положення веденої ланки реального механізму від заданого ідеального закону руху. Це відхилення, функціонально пов'язане з циклом руху механізму, називають кінематичною погрішністю. На відміну від геометричної погрішності, яка характеризує відхилення размірів і форми реальних ланок від ідеальних, кінематична погрішність виникає лише в процесі руху і взаємодії ланок механізму. Як показано в [9], під кінематичною погрішністю розуміють різницю між дійсним (виміряним) і номінальним (розрахунковим) переміщеннями вихідної ланки механізму, яке визначається по відношенню до його вхідної ланки за повний цикл зміни відносного положення цих ланок.

Недоліком традиційної кінематометрії є необхідність застосування високоточних генераторів частоти і фази обертання ротора [10], що в умовах експлуатації не завжди можливо. У зв'язку з цим кінематометрирування використовується поки що тільки під час доводчих робіт (доопрацювання зубчастих передач), звичайно паралельно з тензометрируванням.

Впродовж одного циклу перезачеплення жорсткість пари зубців, що беруть участь у передачі крутного моменту, змінюється декілька разів, водночас відбувається згинальна деформація зубців у пружній зоні з відповідною зміною кроків зачеплення. Це, у свою чергу, може призвести до пластичної деформації в зоні двопарного зачеплення.

Одночасно з зубцями деформуються: вали, шліцеві з'єднання валів і деталі підшипників. В процесі деформації впродовж часу наростання її фронту відбувається зміна миттєвої частоти, що призводить до зміни кінетичної енергії деталей вузла зубчастого колеса і його приводу (шліцевий вал і підшипники його опор). Сигнал, пропорційний енергії переспряження, разом з сигналами деталей вузла зубчастого колеса розповсюджується по корпусних деталях до чутливого елементу генератора вібрацій. У випадку експлуатаційного дефекту зуба (тріщина), його викришування (маса) або зміни геометрії поверхні (зношування) будуть змінюватися в функції лінійної деформації зуба і швидкості в часовому просторі, впливаючи на енергію вібрацій [11].

Одними з ефективних засобів технічного діагностування зубчастих передач вертольотних редукторів показали себе вібродіагностичні методи. Вібраційна діагностика редукторів працює переважно в певному частотному діапазоні і базується на спектральному розкладанні сигналів з подальшим аналізом амплітудного спектру [11]. Недолік цього методу полягає в недостатній чутливості спектральних моделей до сигналів зароджування дефектів зубців, які мають замалі амплітуди, що перешкоджає ідентифікації експлуатаційних дефектів зубчастих передач.

Статистичні методи обробки, що застосовуються для аналізу в часовому просторі дефектів зубчастих коліс головних редукторів вертольотів [12], у незначній мірі притаманні вказаному недоліку.

Аналіз динаміки процесу передачі крутного моменту парою зубців дає можливість зробити висновок про негармонічний характер сигналу зубцової частоти, який має, як мінімум, два максимума – на вході і виході з зачеплення.

Основним методом експериментального дослідження зубчастих передач є стендові випробування як на рухомих зубчастих колесах, так і на роликових машинах.

Питання згинальної міцності зубців вирішуються за допомогою пульсаторних випробувань. Дослідження контактної міцності зубців коліс можуть проводитися як на стендах, так і на роликових машинах [1].

Головною задачею для здійснення переходу до об'єктивного і нетрудомісткого суцільного контролю редукторів є розповсюдження вібраційного контролю на ряди однотипних редукторів, які мають набори передаточних відношень і різні допустимі навантажувальні моменти [13]. Основою такого висновку є те, що вібраційний контроль з початку 1990-х років і до цього часу є найбільш досконалим контролем, засоби і методи якого добре відпрацьовані в авіапромисловості.

В останні роки XX ст. стали развиватися методи акустичного контролю [14] і продовжується використання комплексного контролю [15].

Мета статті. Розгляд основних засобів, стендів і машин та їх застосування для випробувань зубчастих коліс і передач вертольотних редукторів.

Виклад основного матеріалу. Основні характеристики зубчастих коліс, які повинні бути забезпечені конструктивними та технологічними методами: точність та плавність роботи, довговічність, надійність, передача великих моментів в умовах тертя, високих та знакозмінних навантажень, додаткові функції (синхронізація і т.п.), мінімальна вартість.

Ці вимоги забезпечуються відповідним контролем у процесі виготовлення зубчастих вінців коліс. Що стосується їх точності, то, на цей час, у світі основну масу складають колеса 5–7 ступеней точності. Іншою тенденцією є різні модифікації профілів зубців.

Точність виготовлення циліндричних зубчастих коліс регламентується ГОСТ 1643–81 [16], де передбачено 12 ступенів точності: більш точні колеса мають менший ступінь точності. Кожна ступінь точності регламентує три норми: кінематичної точності, плавності роботи і контакту зубців у передачі, а також 6 видів спряжень і 8 видів допусків на боковий зазор, причому можливі комбінації з цих норм. Наприклад, 8-7-6-*Ba* (8 – ступінь кінематичної точності, 7 – плавності роботи, 6 – по нормах контакту, з видом спряження *B* та видом допуску на боковий зазор *a*) [17].

Норми точності можуть призначатися в залежності від області застосування зубчастого колеса. При цьому змінюється характер допустимих відхилень і їх величина. Наприклад, для планетарних передач важливою є кінематична точність, для високошвидкісних передач головною є плавність їх роботи. Для кожної норми точності ГОСТ 1643–81 визначає основні відхилення зубчастого колеса, які впливають на дану норму.

Всього стандартом визначено 24 погрішності, що підлягають контролю [16, 8]. 7 погрішностей визначають кінематичну точність (кінематична точність зубчастого вінця *F'ir*, накопичена погрішність кроку зачеплення колеса *Fpr*, накопичена погрішність *k* кроків *Fpkr*, погрішність обкочування *Fcr*, коливання довжини загальної нормалі *FvWr*, радіальне биття зубчастого вінця *Frr*, коливання вимірювальної міжосьової відстані за один оберт колеса *F''ir*).

Плавність роботи залежить також від 7 погрішностей (локальна кінематична погрішність колеса *f'ir*, циклічна погрішність частоти зубців колеса *fzzr*, циклічна погрішність зубчастого колеса *fzkr*, погрішність профіля зуба *ffr*, відхилення кроку зачеплення *fpbr*, відхилення кроку зубців *fptr*, коливання вимірювальної міжосьової відстані на одному зубі *f''ir*).

Точність контакту зубців визначається 4 параметрами (погрішність напрямку зуба $F\beta r$, погрішність контактної лінії *Fkr*, відхилення осьових кроків по нормалі *Fpknr*, сумарна пляма контакту).

Боковий зазор зубчастої передачі визначається 6 параметрами (додаткове зміщення початкового контуру *Ehr*, відхилення довжини загальної нормалі *Ewr*, відхилення середньої довжини загальної нормалі *Ewmr*, відхилення товщини зуба *Ecr*, граничні відхилення вимірювальної міжосьової відстані *Ear*, відхилення розміру по роликах *Emr*).

Традиційні метрологічні засоби контролю зубчастих вінців. Вимірювання майже кожного з вищезазначених параметрів вимагає спеціалізованих метрологічних засобів з метою контролю зубчастих вінців. На рисунку 1 представлені параметри вимірювання та

ISSN 2706-7386

контролю зубчастих вінців і деякі традиційні прилади з цих засобів [17]. В таблиці 1 перелічені основні прилади для контролю зубчастих коліс [18, 19].

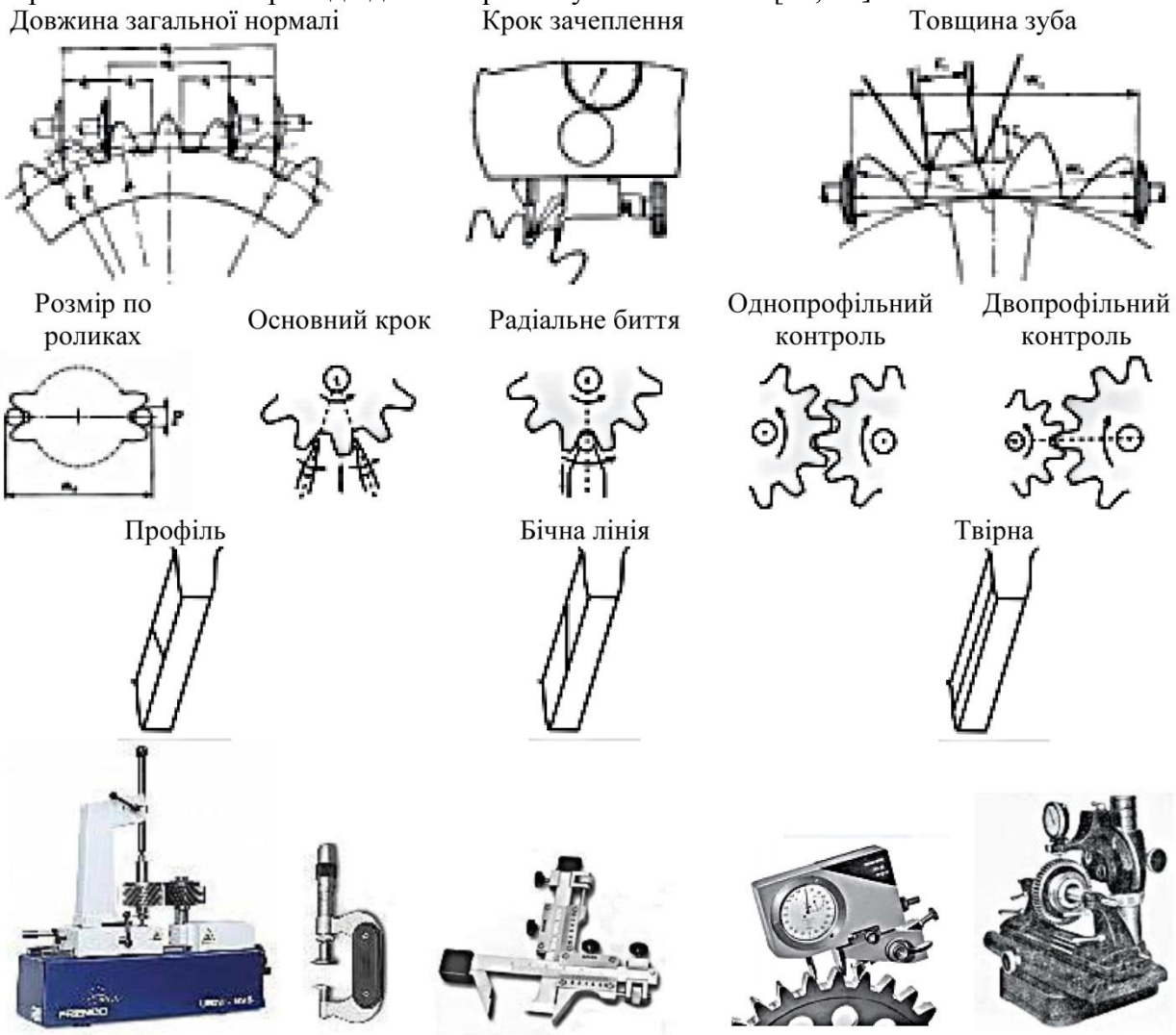


Рис.1. Параметри вимірювання та контролю зубчастих вінців і деякі традиційні спеціалізовані метрологічні засоби їх контролю [17]

Таблиця 1

Прилади контролю зубчастих коліс

Прилади	Модель	Параметри контрольованого зубчастого колеса, мм		
		модуль	діаметр ділильного кола	довжина зали
Прилад контролю кінематичної погрішності зубчастих коліс	БВ-5058	1-8	20-320	100-320
Прилади контролю вимірювальної міжосьової відстані (міжосеміри)	МЦ-160М, МЦ-400У	0,15-1, 1-10	5-200, 20-320	25-100 100-320
Прилади контролю профіля зуба зубчастих коліс – евольвентоміри:				
дрібномодульний	БВ-5057	0,2-1	5-120	До 100
універсальний	КЭУ-М	1-10	20-320	100-350
універсальний з пристроєм контролю гвинтової лінії (з ходоміром)	БВ-5062	4-12	20-340	100-400
Прилади контролю накопиченої погрішності кроку, відхилення кроку, різності кроків, довжини загальної нормалі та ін.:				

ISSN 2706-7386

Закінчення таблиці 1

універсальний автоматичний для поелементного контролю зубчастих коліс (ТУ 2-034-362-81)	27501	0,2-18	20-400	60-400
для вимірювання елементів дрібномодульних зубчастих коліс (ТУ 2-034-329-82)	БВ-5035, модель 27400	0,15-1,25	5-160	120
для втоматичного контролю кроку дрібномодульних зубчастих коліс	БВ-5079, модель 27600	0,2-2	5-120	До 100
для контролю великогабаритних зубчастих коліс	БВ-5077	2-16	320-1250	200-800
для контролю зубчастих коліс	ЗИП-1	1-8	20-320	100-320
Прилади контролю радіального биття зубчастого вінця:				
биттямір	Б-10М	1-10	20-400	До 380
биттямір напівавтоматичний	25004	0,2-2	5-200	-
Прилади для контролю кроку зачеплення:				
крокомір (ТУ 2-034-340-77)	БВ-5070	2-28	-	-
крокомір (ТУ 2-034-203-83)	21704	10-50	-	-
крокомір (ТУ 2-034-296-84)	21802	2-10	-	-
Прилади для контролю положення початкового контуру:				
зубоміри зміщення для коліс зовнішнього зачеплення (ГОСТ 4446–81)	23700 23800	10-28 22-50		
зубомір зміщення для коліс внутрішнього зачеплення	23900	2-16		
штангензубоміри з ноніусом (ТУ 2-034-773-84)	ШЗ-18 ШЗ-36	1-18 5-36	- -	
Прилади для контролю довжини загальної нормалі:	МЗ-25	-	Діапазон вимірювання загальної нормалі 0-25	
мікрометри з ціною поділки 0,01 мм тип МЗ (ГОСТ 6507–78) нормалєміри тип М (ГОСТ 7760–81)	МЗ-50 МЗ-75 МЗ-100 БВ-5045 БВ-5046 22202	- - - от 1 от 2 от 2,5	25-50 50-75 75-100 0-120 50-300 150-700	
нормалєміри (ТУ 2-034-3216–83)	22002 22102	0,3-1 0,3-1	0-25 25-50	
нормалєміри для коліс внутрішньоо зачеплення (ТУ 2-034-361–81)	БВ-5081 БВ-5082	от 3 от 3	20-120 50-300	

Водночас з наведеними вимірювальними інструментами застосовуть універсальні зубомірні прилади типу МИЗ, які дають можливість контролювати показник кінематичної точності зубчастого колеса, тобто накопичену погрішність колового кроку, радіальне биття зубчастого вінця, коливання довжини кроку загальної нормалі, а також параметри, які характеризують плавність роботи колеса (граничні відхилення основного кроку, точність колових кроків) і контакт зубців у передачі (кут нахилу зуба). Для вимірювання всіх

перелічених параметрів до універсального зубоміра додаються різні вимірювальні пристрої, які кріпляться до каретки приладу в залежності від вимірюваного параметру колеса.

Частіше всього в зубчастому колесі контролюють наступні параметри: товщину зуба по ділильному колу, основний і ділильний кроки зубчастого колеса, профіль зуба. При виборі засобів і методів вимірювання орієнтуються на граничну погрішність, яка може бути допущена під час вимірювання, і яка не повинна перевищувати 20% допуску. Рекомендації із застосування зубомірних приладів наведено в таблиці 2 [20].

Таблиця 2

Вибір зубомірних приладів в залежності від ступеня точності зубчастих коліс і параметрів, що перевіряються

Найменування приладів	Параметр, що перевіряється	Ступінь точності зубчастих коліс
Крайковий зубомір	Товщина зуба по постійній хорді	9…11
Тангенціальний зубомір	Зміщення початкового контуру	5…10
Нормалемір до 150 мм	Довжина загальної нормалі	7…11
Нормалемір до 300 мм	Довжина загальної нормалі	8…11
Зубомірний мікрометр	Те ж саме	8…11
Крокомір для колового кроку	Коловий крок	7…11
Крокомір для основного кроку коліс з m = 2…10 мм	Основний крок	7…11
Биттямір	Биття зубчастого вінця	8…11
Міжосемір (при установці по кінцевим мірам)	Відхилення вимірювальної міжосьової відстані	7…11
Те ж саме при установці по шкалах	Те ж саме	9…11
Універсальний евольвентомір з постійним диском	Профіль на дільницях евольвенти	3…6
Універсальний зубомірний прилад	Основний крок Рівномірність основного кроку Довжина загальної нормалі Рівномірність колового кроку Биття зубчастого вінця	3…6

Слід зазначити, що ГОСТ 1643–81 дозволяє перевірку не всіх параметрів, а їх комплексів з декількома параметрами у кожній групі. У цьому випадку потрібні різні метрологічні засоби, а отже, в метрологічній лабораторії, що перевіряє зубчасті колеса, повинно знаходитися від одного до двох десятків приладів. Тільки в цьому випадку можна бути впевненим, що зубчасті колеса перевірені у відповідності з ГОСТ 1643–81.

Зубовимірювальні машини та комплекси є сучасним метрологічним засобом дуже високої точності аналітичного контролю відхилень зубчастих вінців (Рис.2) [17, 21].

Принцип роботи електронних зубовимірювальних комплексів полягає в інтеграції комп’ютерної обробки даних та вимірювань за координатами. До складу комплексу входять: гранітна станина, одно- або трьохкоординатна вимірювальна голівка із захистом від зіткнень, прецизійні напрямні та ходові гвинти. Завдяки застосуванню замкненого циклу контролю переміщень, прецизійній вимірювальній системі та ЧПУ результати вимірювань мають дуже високу ступінь точності [21].

ISSN 2706-7386

Зубовимірювальна машина фірми Mahr

Вимірювальна голівка

Зубовимірювальний комплекс фірми ОСТТ

Рис.2. Зубовимірювальні машини

У процесі вимірювання щуп вимірювальної машини сканує бокову поверхню зуба по профілю (Рис.3.1), по лінії зуба (Рис.3.2) і послідовно дотикається всіх бокових сторін зубців (Рис.3.3) [17]. Отримані результати дають повну інформацію про причини виникнення погрішностей і можливість використати цю інформацію для відповідного коректування технології виготовлення зубчастих коліс. Застосування цього засобу контролю забезпечує оптимальну його якість і представлення реультатів перевірки параметрів зубчастого вінця.

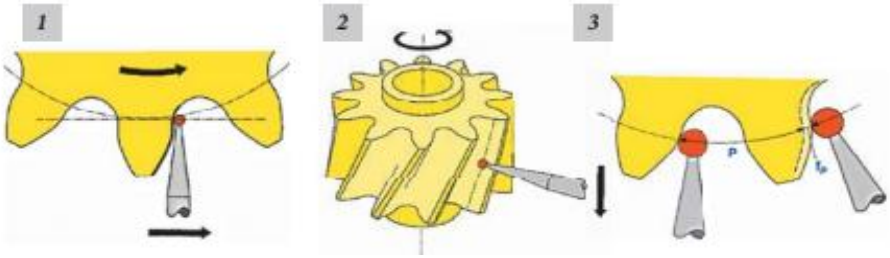


Рис.3. Вимірювання профіля, лінії зуба і кроку [17]

В процесі сканування поверхні зуба відхилення щуба реєструються і обробляються системою управління машини. Отримуваний результат є аналогом вимірювання на евольвентомірі. Якщо профіль зуба являє собою правильну евольвенту з заданими параметрами, то результатом вимірювання в графічному вигляді буде пряма. За наявності погрішності профілю вийде крива (Рис.4). Аналіз цієї кривої дозволяє визначити основні складові погрішності (Рис.5) – погрішність кута профілю $F_{H\alpha'}$, погрішність форми профілю $f_{f\alpha}$ і повну погрішність профілю $F_{\alpha'}$. Аналогічним чином перевіряються відхилення інших параметрів, виконується типовий протокол вимірювання і аналізу відхилень профілю зубчастого колеса [17].

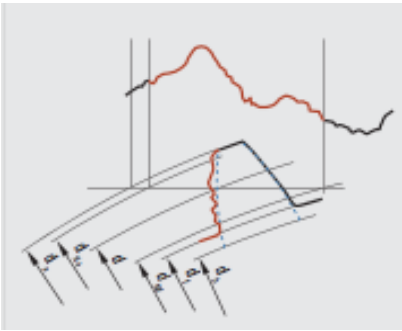


Рис.4. Результат вимірювання профілю [17]

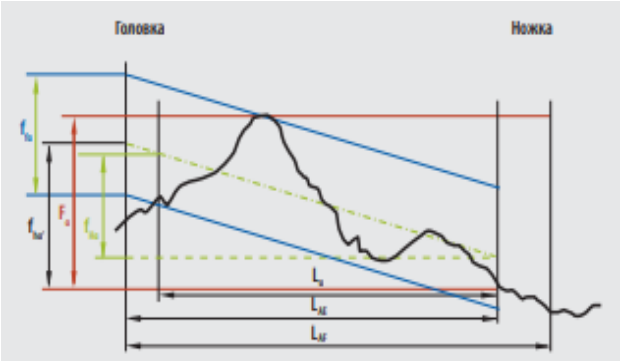


Рис.5. Оцінка погрішності профілю [17]

Якщо задана потрібна точність вимірюваного вінця, то програмне забезпечення порівнює задані для даного ступеня точності допуски на вимірювані параметри і відображає ті відхилення, які виходять за поле допуску. Одночасно аналізується і показується істинна ступінь точності виміряного колеса. Аналогічні протоколи виводяться за результатами аналізу інших праметрів зубчастого вінця.

Вимірвальний центр контролю зубчастих коліс 3903T (Рис.6) [22], 3906T в стандартній комплектації призначений для вимірювання параметрів зуба на прямозубих і косозубих циліндричних зубчастих колесах будь-якого типу. Додаткова комплектація дозволяє контролювати черв'яки і черв'ячні колеса, прямозубі, косозубі конічні зубчасті колеса, конічні передачі зі спіральним зубом, а також шевери, черв'ячні та прорізні фрези. Центр обладнаний 4-осьовою вимірювальною системою, оптичними лінійками Heidenhein, володіє високою точністю і стабільністю вимірів, повним циклом автоматичного вимірювання, що дозволяє контролювати всі необхідні параметри зуба за один установ. Має потужний функціонал програмного забезпечення: контроль відхилень профілю зуба ($F\alpha$, $ff\alpha$, $fH\alpha$), гвинтової лінії ($F\beta$, $ff\beta$, $fH\beta$), кроку (Fp, fpk, fpt), радіального биття (F).

Рис.6. Вимірвальний центр контролю зубчастих коліс
фірми Links Harbin Measuring & Cutting Tool Group [22]

На рисунку 7 показано вимірювання прямозубого колеса і погрішності профілю зуба.

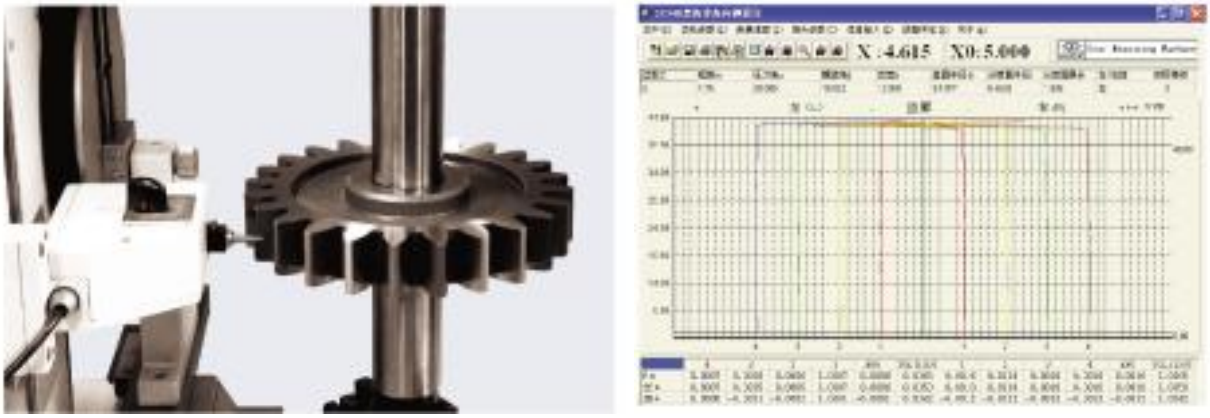


Рис.7. Вимірювання прямозубого колеса і погрішності профілю зуба [22]

Для двохпрофільного контролю повного радіального комбінованого відхилення Fi'', радіального комбінованого відхилення між зубцями fi'' та радіального ексцентриситету Fr'' циліндричних зубчастих коліс фірмою Links Harbin Measuring & Cutting Tool Group розроблені прилади 31008, 3100C (Рис.8) та 3100L серій. Наявні дефекти обробки зубців

коліс визначаються автоматично і вибраковуються. Перевагами таких приладів є: автоматичний контроль вимірювань і якісна обробка даних; режим вимірювань і параметри вводяться на клавіатурі, а процес вимірювання відображається на моніторі; Протокол вимірювань можна роздрукувати; компактна конструкція, нескладне управління, висока надійність вимірювань з функцією контролю.

Рис.8. Прилад для двохпрофільного контролю зубчастих коліс 3100C [22]

Стенди і машини для випробувань редукторів моделюють умови роботи досліджуваних зубчастих передач і діляться на три основних види: стенди для випробувань зубчастих передач, які не завжди забезпечують бажану геометричну подібність; пульсатори, які моделюють навантаження зачеплення або окремих зубців в нерухомій/обмежено рухомій передачі; роликові машини моделюють умови контакту робочих поверхонь зубців у певних фазах зачеплення на взаємно навантажених роликах, що обертаються [1].

Стенди відрізняються від інших випробувальних машин тим, що в них зубчаста передача знаходиться в робочому стані, тобто відбувається передача крутного моменту від ведучого зубчастого колеса веденому. Перевагою випробувань на стенді перед випробуваннями в реальних умовах є можливість оцінки реакції зубчастих передач редуктора на певний тип і величину навантаження при інших фіксованих параметрах, що дозволяє виявити приховані конструктивні недоліки.

Стенди бувають трьох видів: гальмівні, замкнені та повторно-періодичного навантаження і відрізняються за енергетичною схемою навантаження зубчастої передачі (Рис.9). В залежності від методу створення навантажень на зубчасті передачі стенди, призначені для випробувань редукторів, поділяються на два види: з розімкненим і замкненим силовими потоками. В стендах першого виду для навантаження деталей редуктора використовується процес гальмування вихідного (веденого) валу редуктора. Для цього застосовуються механічні, гідравлічні, ферропорошкові магнітні та інші види гальм або електрогенератори, підключені до реостатів. Найбільш прийнятними для режимів випробувань шляхом гальмування є ферропорошкові магнітні гальма з водяним охолодженням. Недоліками стендів з розімкненим силовим потоком є значні втрати електроенергії під час навантаження деталей і перегрів навантажувачів. Крім того, для обладнання стенду потрібні двигуни потужністю, що дорівнює потужності редуктора, громіздкі навантажувальні пристрої зі спеціальними охолоджувачами. До того ж виявляється, що дуже складно забезпечити необхідну точність визначення основного показника якості редуктора – його коефіцієнт корисної дії (ККД).

Відкриті стенди складні, коштовні і енерговитратні. Тому, важливою задачею редукторобудування є створення енергоощадних випробувальних стендів, що працюють за замкненим методом. Справа в тому, що остаточним доказом надійності редуктора є ресурсні

випробування. Прискорені випробування мають як позитивні, так і негативні сторони. Тому, необхідно мати стенди, що відтворюють реальні умови навантажень [13].

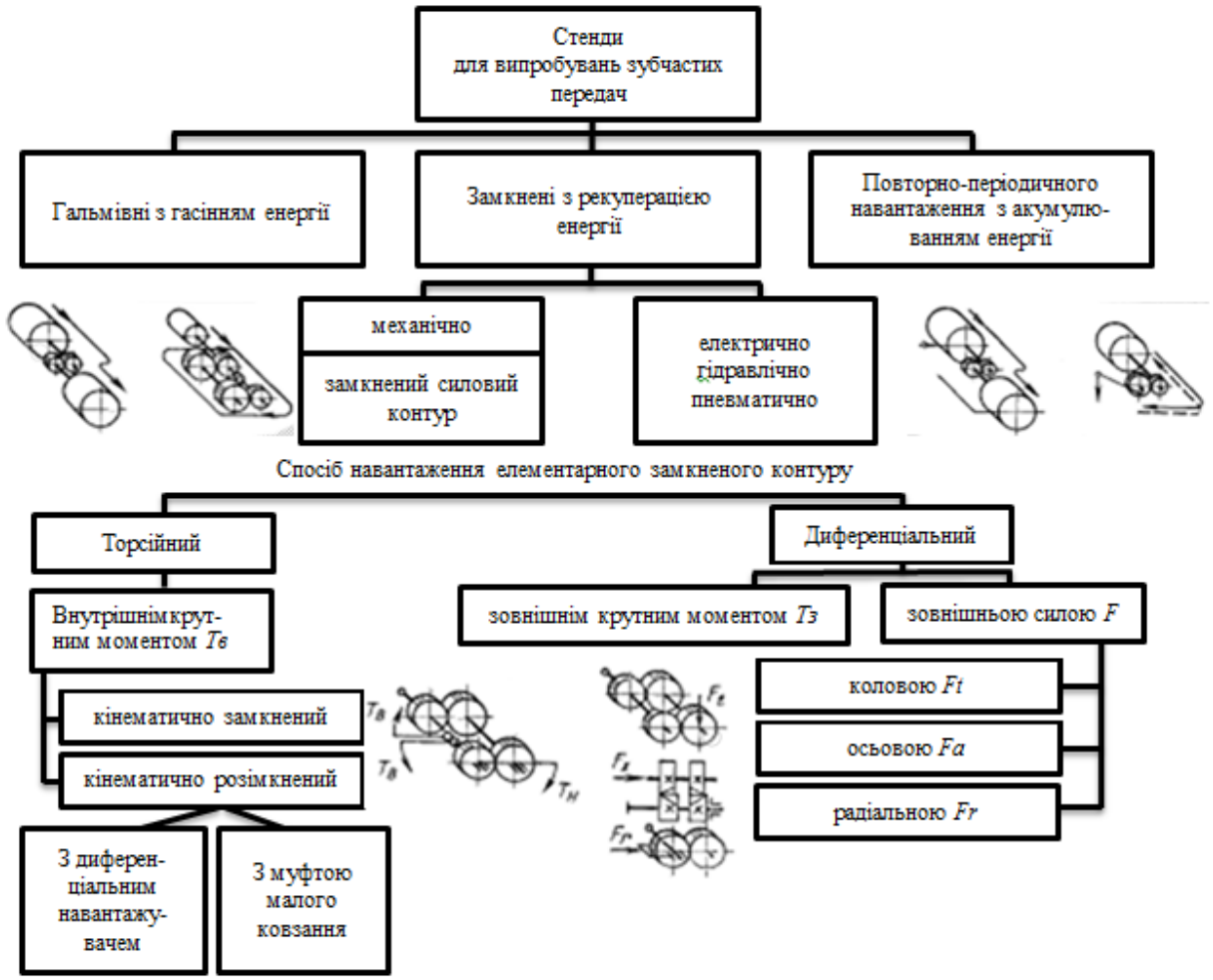


Рис.9. Класифікація стендів за основними ознаками

У стендів з замкненим силовим потоком деталі навантажуються за рахунок навантажувачів (звичайно торсіонів кручення), які включені в систему двох однакових редукторів, які випробовуються, внаслідок чого втрати електроенергії зводяться до мінімуму. Вали редукторів з’єднують один з одним спеціальними проміжними валами [7]. Один зі спеціальних валів виконується тонким або з вбудованим торсійним елементом. Перед з’єднанням муфт цього валу до нього прикладають певний крутний момент, який створює пружні деформації кручення і навантажує всі вали і зубчасті передачі редукторів. Після з’єднання цього вала в навантаженому стані залишаються і всі деталі, включені в замкнений силовий контур. Під час обертання редукторів двигуном електроенергія витрачається тільки на подолання сил тертя.

Стенди, призначені для випробувань зубчастих передач (Рис.9), дають можливість найбільш повно моделювати умови роботи досліджуваної передачі. Пульсатори такого ж призначення моделюють навантаження в зачепленні або окремих зубців в нерухомій або частково рухомій зубчастій передачі. Роликові машини моделюють умови контакту робочих поверхонь зубців в певних фазах зачеплення на взаємно навантажених роликах, що обертаються.

Випробувальне обладнання класифікується також за видами досліджуваних передач і зачеплень, критеріями працездатності, умовами випробувань і ознаками, характерними для конструкцій випробувальних машин щодо їх універсальності, продуктивності і т. ін.

ISSN 2706-7386

В гальмівних стендах основний потік потужності від приводного двигуна передається через зубчасту передачу і гаситься в гальмівному пристрої. Замкнені стенди створюють потік потужності, що циркулює через зубчасту передачу і систему рекуперації енергії. В стендах повторно-періодичного навантаження утворюється перемінний потік потужності між двигуном і акумулятором енергії, що проходить через зубчасту передачу як у прямому, так і в зворотньому напрямку. В залежності від подальшого шляху використання поверненої енергії стенди повторно-періодичного навантаження набувають ознаки гальмівних або замкнених стендів. На відміну від пульсаторів з коливальним характером контакту зубців у стенді повторно-періодичного навантаження не порушуються кінематичні умови роботи зубчастої передачі. Проте, специфічні умови роботи зубчастих коліс в ролі поперемінно то ведучих, то ведених, а також низька продуктивність стенду такого типу обмежують сферу його застосування для дослідження передач, що працюють у подібних умовах.

Особливо виділяються стенди замкненого типу з механічним пристроєм, який разом з зубчастою передачею утворює замкнений силовий контур. Вали досліджуваної зубчастої передачі при цьому додатково замикаються другою передачею з подібними кінематичними параметрами. Крутний момент в замкненому контурі створюється спеціальним пристроєм (навантажувачем), який взаємно навантажує обидві передачі. На рисунку 9 представлені різні способи навантаження елементарного замкненого контуру, тобто контуру з мінімальним числом ланок, необхідних для даного способу навантаження. Використовують два основних способи створення навантаження в замкненому контурі: торсійний (внутрішнім крутним моментом) і диференціальний (зовнішнім крутним моментом або силою).

На рисунку 10 показано кінематичну схему випробувального стенду з замкненим силовим потоком [23], а на рисунку 11 – його загальний вигляд. При конструюванні цього випробувального стенду за основу були прийняті стенд для дослідження зубчастих передач на втому при статичних навантаженнях, який було розроблено Експериментальним науково-дослідним інститутом машинознавства [24] та динамічний підхід, представлений в [25].

Основними вузлами стенду (Рис.10) є редуктори 1 і 2, в яких встановлені випробувальні зубчасті колеса z_1 і z_2, які створюють дослідний редуктор, а колеса z_3 і z_4 утворюють замикаючий редуктор. Зубчасті колеса z_1 і z_3 з'єднані між собою валом 6 за допомогою глухих фланцевих муфт 5, а колеса z_2 і z_4 – валом 7 з карданними шарнірами. Редуктори мають привід від електродвигуна *Д* за допомогою пружної втулково-пальцевої муфти. Редуктор 1 закріплено жорстко на фундаментній плиті, а редуктор 2 – на підшипниках і двох опорах 8. Опори 8 також закріплено на фундаментній плиті. Навантаження зубчастих коліс редуктора 2 здійснюється за принципом замкненого силового потоку моментом $M = FL$ важелем 4 з вагою 3.

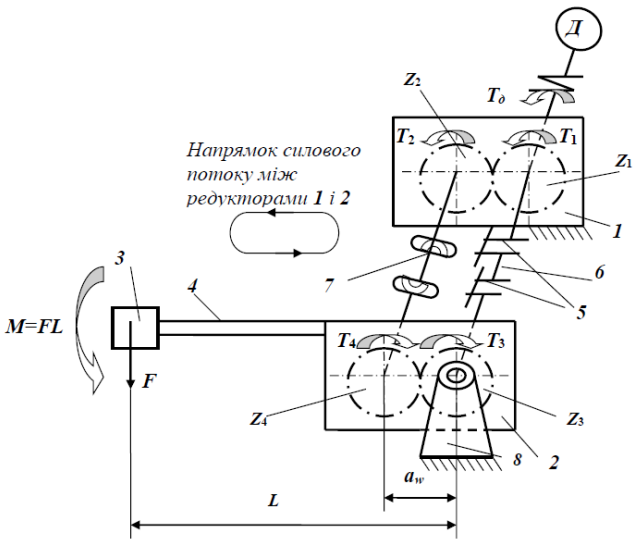


Рис.10. Кінематична схема випробувального стенду з замкненим силовим потоком [23]

Рис.11. Випробувальний стенд і прилади для реєстрації коливань системи [23]

Для підтвердженини біфуркацій та розвитку методу розрахунку динамічних коливальних процесів на випробувальному стенді для зубчастих передач і редукторів У-394 ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова" (Рис.12) [26] були проведені випробування зубчастих коліс. У процесі випробувань здійснювався запис рівнів вібрацій у вертикальному, горизонтальному та осьовому напрямках.

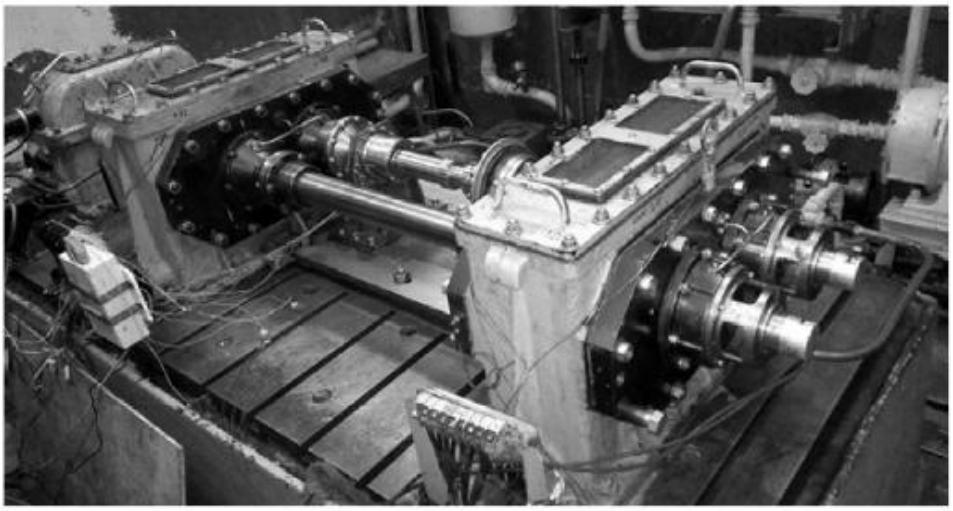


Рис.12. Випробувальний стенд для зубчастих передач і редукторів У-394 [26]

Застосування спеціальних навантажувачів дає можливість створювати раптові значні по величині перевантаження або викликати в системі редуктор-стенд вимушені пружні коливання, що супроводжуються періодичними динамічними навантаженнями, або створювати навантажувальний режим, близький до експлуатаційного, що змінюється за заданою програмою.

З метою прискорення процесу припрацювання зубців коліс застосовується обкочування редукторів на спеціальних стендах, до того ж бажано застосовувати спеціальні прилади – стукоміри. Це дає можливість перевірити якість виготовлення або ремонту редукторів та їх роботу в умовах, близьких до експлуатаційних.

Перспективним напрямком є широке впровадження в практику заводських контрольних випробувань сучасних високопродуктивних стендів, які суміщують в часі

обкочування редукторів з контрольними випробуваннями і забезпечують необхідну точність під час визначення ККД редукторів.

Враховуючи складність виробу і його високу вартість ($(100…200) тис.), перед здачею замовнику кожен редуктор підлягає комплексному тестуванню. Воно полягає у вимірюванні основних характеристик на всіх можливих режимах наступної експлуатації. Така повірка здійснюється на спеціалізованих випробувальних стендах вертольотних редукторів (ВСВР). Такі стенди, як правило, є складними електромеханічними системами високої вартості, укомплектованими інформаційно-вимірювальними системами (ІВС). Наприклад, вартість стенду ВР-14 становить близько $1 млн., а вартість ВР-252 – біля $2 млн. На таких стендах число аналогових вимірювальних сигналів може перевищувати 50, а цифрових дискретних команд і сигналів може бути більше 150 [3]. Оскільки за останні 30 років нові моделі ВР практично не розроблялися у зв’язку зі спадом виробництва перехідного періоду, а нові стенди практично не будувалися, більшість використовуваних у даний час ВСВР оснащено застарілими ІВС.

Випробування здійснюються як на зразках, так і на натуральних об’єктах в ході експлуатації, їх в першу чергу використовують для вибору материалів зубчастих коліс, геометрії зачепления і системи змащування для забезпечення відсутності заїдания передач та їх мінімального зношування (стенди серії IAE у Великобританії та Японії, типу FZG у Німеччині, типу Ryder у США) [27].

В [27] розроблено спеціальну установку і запропонований інший спосіб прискорених випробувань евольвентних циліндричних зубчастих коліс на заїдання на простих зразках в лабораторних умовах, який дозволяє використовувати роликову аналогію і прогнозувати протизадирну стійкість зубчастої передачі на стадії проєктування.

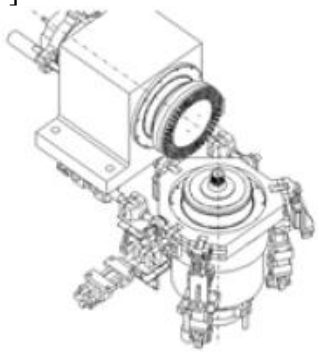
Випробування довговічності основних компонентів у лабораторних умовах здійснюється з метою гарантування надійності зубчастих передач у різних довготривалих застосуваннях, що потім підтверджується результатами функціональних випробувань всього транспортного засобу в різних польових умовах.

Лабораторні умови і тип випробувань, рівень навантаження і т.д. можна легко змінити на визначення граничної міцності компонентів. Це ефективний підхід до оцінки належних границь навантаження для конкретного компонента і конструкції в цілому.

При порівнянні методів випробувань на натурних зубчастих колесах (оцінка працездатності на стендах) і лабораторних випробувань на зразках можна зазначити, що випробування коліс дають більш достовірні результати, але при цьому вони є більш складними, коштовними, не позбавленими суттєвих погрішностей, які виникають під час виготовлення і складання спряжень [27].

Ілюстрацією нових тенденцій у застосуванні тестування зубчастих передач може служити тестер GT40 (Рис.13), який, разом з традиційними підходами до випробувань власне зубчастих пар в зачепленні, має можливість імітації впливу супутніх деталей, таких як вали, підшипники і корпус редуктора [28].

Панель управління



Схема

Загальний вигляд

Рис.13. Тестер GT-40 [28].

У випробування може бути інтегроване програмне забезпечення Tooth Contact Analysis в реальному часі з пакетом збору даних. Ця система оцінки буде здатна створювати реальні польові умови в лабораторії за допомогою належного обладнання і шарнірної підвіски одного з складових по відношенню до іншого. Інтеграція лабораторних технологій оцінки зубчастої передачі в усі системи тестування кінцевої продукції (вертольоту) підвищить надійність і продуктивність виробу, скорочуючи час, необхідний для розробки, за рахунок скорочення витрат часу на виготовлення прототипу і випробувань в реальних умовах. Цей порівняно новий метод тестування надасть ще більш багатообіцяючу інформацію для конструкторів, замкнувши цикл оцінки через експертну систему, яка буде включати підтримку пакету оптимізації із застосуванням зібраної інформації з бази даних під час польових випробувань. Водночас слід зазначити, що експлуатаційні спостереження є найбільш точними, але виявляються статистично достовірними тільки через довготривалі терміни експлуатації вертольотних редукторів.

Пульсатори. Для випробувань зубчастих передач вони повинні дозволяти моделювати умови навантаження взаємодіючих зубців досліджуваної передачі. Тому, головними ознаками класифікації пульсаторів є: об’єкт випробування, умови контактування і навантаження зубців коліс (Рис.14) [1].

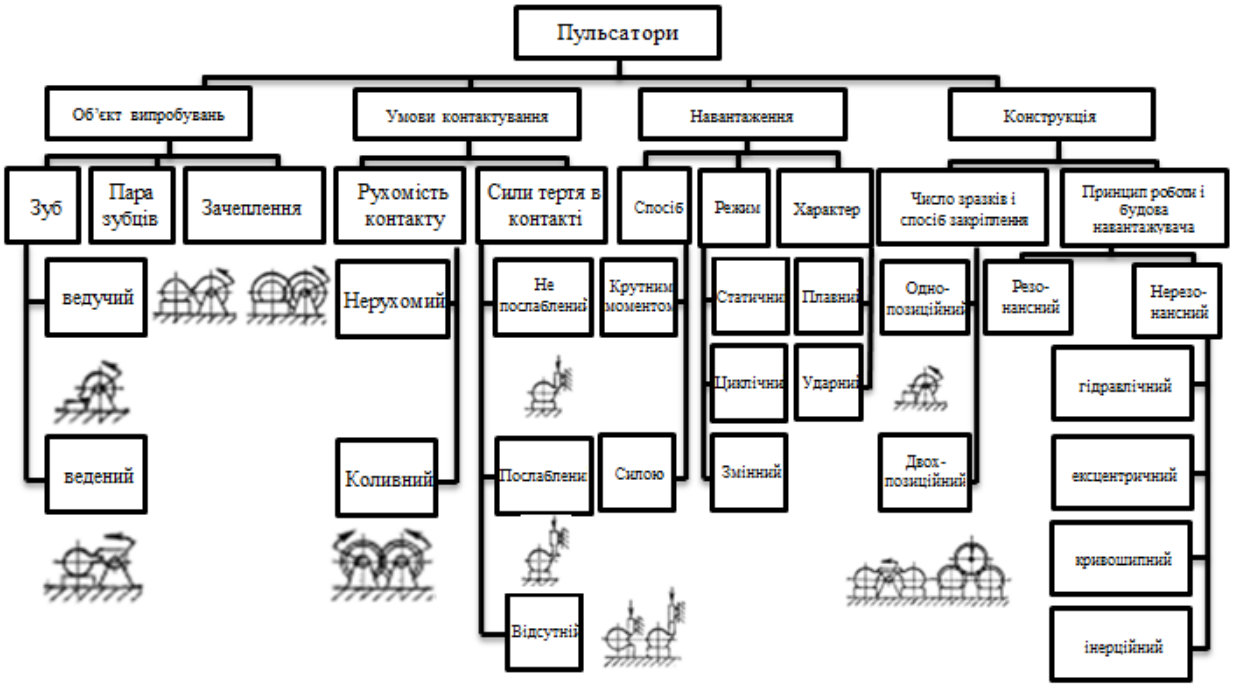


Рис.14. Класифікація пульсаторів за основними ознаками

Найбільш простий об’єкт випробування – зуб нерухомого зубчастого колеса або сектора. Застосування зубчастого зачеплення, а тим більше такого, який супроводжується коливальними явищами, може, замість наближення об’єкта випробувань до досліджуваної передачі, внести деяку невизначеність до схеми навантаження зубців. Технологічні фактори (погрішність основних кроків, шорсткість робочих поверхонь і т. ін.), а також сили тертя будуть проявлятися в цьому випадку не так, як це має місце в реальній передачі. Наприклад, відсутня або занижена динамічна складова навантаження зубців, ростуть сили тертя, зубчасті колеса поперемінно є то ведучими, то веденими. Ці явища пов’язані з низькою коловою швидкістю, несприятливими умовами змащування і коливальним рухом передачі. Крім того, різко знижується продуктивність машини, обмежена низькою частотою власних коливань маложорсткої системи. Високу продуктивність забезпечують резонансні пульсатори, проте, процес росту втомної тріщини і долом зуба викликає ускладнення, пов’язані з розузгодженням частоти навантаження.

ISSN 2706-7386

Сила тертя на боковій поверхні зуба створює невизначеність схеми наантаження і напруженого стану зуба, а також викликає зміну геометрії внаслідок зношування, фретингу в точці контакту. Цим пояснюються специфічні поломки голівок зубців у вигляді косого сколу, що починається на лінії контакту. Усунення або зменшення сили тертя досягається вибором схеми пульсатора, який допускає рухомість зубчастого колеса, опорного або навантажувального елементу в площині, дотичної до поверхні зуба в точці контакту. За необхідності можна ввести додаткову кінематичну ланку, яка б мала свободу переміщення в цьому напрямку.

Роликові машини. Основною ознакою класифікації роликових машин є умови контактування робочих поверхонь роликів (Рис.15) [1].

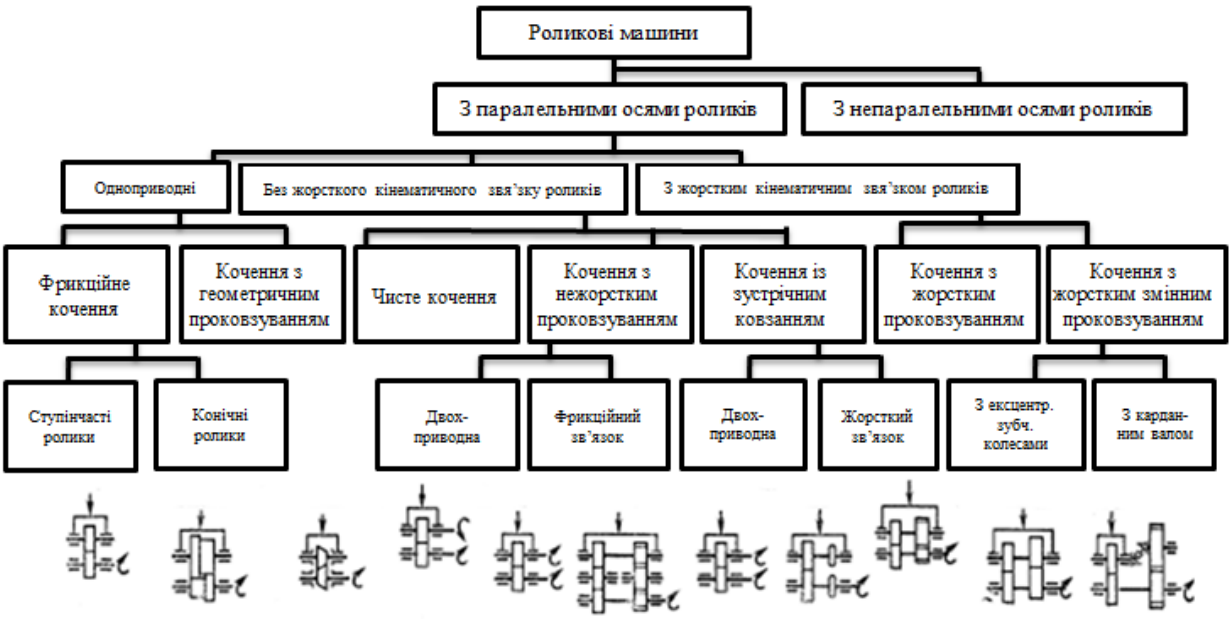


Рис.15. Класифікація роликових машин за кінематичними умовами контактування роликів

Кінематика контакту визначається передусім просторовим розташуванням осей роликів, яке залежить від виду модельованої зубчастої передачі. Роликові машини з паралельними осями, відрізняючись простотою конструкції, дають можливість з достатнім ступенем подібності моделювати умови контакту як у циліндричних, так і в конічних передачах.

Величина питомого ковзання на профілі зуба змінюється в широкому діапазоні. Найбільший інтерес викликають зони робочої поверхні на ніжці зуба поблизу полюсної лінії, що володіють мінімальною контактною витривалістю і найбільш віддалені від початкової поверхні на голівці та ніжці зуба, схильні до заїдання. Детальні дослідження цих зон можна проводити на роликових машинах при дотриманні вимог "роликової аналогії". За конструктивними особливостями і умовами роботи роликові машини можуть мати різні модифікації, які детально описані у відповідних джерелах.

Роликова аналогія являє собою метод фізичного моделювання, який базується на спільності фізико-механічних процесів, що відбуваються в зоні контакту зубців і експериментальних зразків: два циліндричних зразка, виконаних з тих же матеріалів, що і зубці реальної зубчастої передачі, моделюють геометричні і кінематичні умови контактування зубців в евольвентній фазі [27].

Частіше всього застосовують роликові машини з постійним ковзанням, а для кращої імітації умов контакту зубців передач – на роликах з перемінним ковзанням при нерівномірному їх обертанні або застосуванні конічних роликів (Рис.16) [27].

Рис.16. Классифікація роликових машин для дослідження зубчастих коліс

Проте, і при цьому повна аналогія зубчастого зачеплення недосяжна по причині постійності кривини досліджуваних поверхонь роликів (на відміну від перемінної кривини поверхонь зубців передач), внаслідок чого імітуються умови ковзання зубців тільки лише на частині поверхонь роликів (тільки евольвентна зона зачеплення).

Роликові машини особливо зручні під час проведення порівнювальних випробувань і оцінки ролі окремих факторів на контактні напруження передачі: швидкості ковзання і кочення, шорсткості контактуючих поверхонь, матеріалу зубчастих коліс, температури в зоні контакту, фізико-хімічних характеристик змащувального матеріалу, числа і якості присадок до основного масла, способу змащування і т.ін. [27].

Недоліком такого способу випробувань є те, що він дозволяє моделювати контакт зубців зубчастої передачі тільки в евольвентній зоні контактування, в той час як заїдання відбувається, в більшості випадків, в крайковій зоні [27].

Одне з фізичних підтверджень крайкової (а не роликової) природи заїдання в контакті зубців полягає в тому, що випробування мастильних матеріалів на роликових і зубчастих стендах дають якісно різні результати. Експериментальні дослідження на випробувальній машині МИЗ виявили невідповідність критеріїв, отриманих в ході теоретичних досліджень, результатам випробувань і показали, що заїдання в більшості випадків виникало в початковій фазі зачепленян, якщо шестерня була ведучою [27].

У 2012 році в Запорожжі створено вертольотне КБ “Мотор Січ”. В одному з виступів президент АТ “Мотор Січ” Вячеслав Богуслаєв сказав: “Всі моторобудівні компанії у світі оцінюються за кількістю випробувальних стендів. Це свідчення потужності підприємства, того, що воно системно працює над ресурсними показниками. Наше авіадвигунобудівне підприємство разом з ДП “Івченко-Прогрес” сьогодні займає перше місце в Європі за кількістю випробувальних стендів”. Особливість цього обладнання полягає в його багатофункціональності, тобто на ньому можна проводити не тільки серійні випробування, але і різні дослідні роботи. Всі параметри в процесі випробувань безперервно фіксуються в електронному вигляді та можуть бути виведені на друк. Важливо зауважити, що якщо більшість підприємств РФ і Європи замовляють стенди на спеціалізованих заводах з виготовлення стендового обладнання, а майже всі стенди АТ “Мотор Січ” – власного

виробництва".

У червні 2016 року Запорізький машинобудівний завод ім. В.І. Омельченка започаткував випробування вертольотних редукторів. Це новий, але дуже перспективний і необхідний для України напрямок в роботі не тільки заводу, але і всього об'єднання "Мотор Січ". Тоді ж планувалося ввести в експлуатацію стенд для випробувань вертольотних редукторів ВР-17 – це власна розробка і виготовлення "Мотор Січ".

Серійне виробництво, обслуговування та ремонт редукторів і трансмісій для вертольотів типу "Ми" здійснює також Пермський складально-випробувальний комплекс "Редуктор-ПМ". Зараз на заводі "Редуктор-ПМ" працюють механічно замкнені стенди, обладнані сучасними вимірювальними та керуючими компонентами зі спеціалізованою автоматизованою системою управління, для трансмісії 8М вертольотів Ми-8/17, хвостової трансмісії. Встановлено стенди для випробувань редукторів ВР-14 для Ми-8/17, ВР-26 для Ми-26(Т).

Висновки. Виробництво і ремонт такої високотехнологічної та важливої продукції, як вертольотні редуктори, неможливі без всебічного тестування цих виробів, починаючи з виготовлення їх окремих деталей та вузлів і закінчуючи поставкою редукторів замовнику.

Розглянуті різні традиційні метрологічні засоби контролю вінців зубчастих коліс, зубовимірювальні машини та комплекси, деякі стенди і машини для випробувань редукторів, пульсатори і роликові машини дають уяву про різноманітні методи і засоби контролю зубчастих коліс і передач вертольотних редукторів.

Основним методом експериментального дослідження зубчастих передач редукторів є стендові випробування як на рухомих зубчастих колесах, так і на роликових машинах.

Найбільш поширеним методом контролю і діагностики зубчастих передач донині є вібрографірування, проте існуючі методики не дають достовірної картини стану передачі, особливо контактної взаємодії зубців. Під час роботи передачі, в складі вертольотного редуктора, на створюваний зубчастою передачею вібросигнал накладаються сигнали від інших джерел: роторів, лопатей, валів, підшипників, що значно ускладнює виділення і обробку потрібного вібросигналу.

Одним з найбільш ефективних методів контролю і діагностування технічного стану кінематичних ланцюгів різної складності, куди входять зубчасті передачі вертольотних редукторів, є кінематометрія. Недоліком традиційної кінематометрії є необхідність застосування високоточних давачів частоти і фази обертання ротора.

Вібраційний контроль з початку 1990-х років і до цього часу є найбільш досконалим контролем, засоби і методи якого добре відпрацьовані в авіапромисловості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: справочник; под ред. Э.Б. Вулгакова. – М.: Машиностроение, 1982. – 375 с.
2. Баринов Ю.Г. Методы, модели и алгоритмы вибродиагностики авиационных зубчатых приводов: автореф. дисс. к.т.н. – Рига, 1992.
3. Андреев С.В. Информационно-измерительные системы испытательных стендов вертолетных редукторов: автореф. дисс. д.т.н. – Санкт-Петербург, 2002.
4. Машины и стенды для испытания деталей машин; под. ред. Д.Н. Решетова. – М.: Машиностроение, 1979. – 343 с.
5. Тимофеев Б.П. Состояние и перспективы развития нормирования точности зубчатых колес и передач / Б.П. Тимофеев, Е.В. Шалобаев // Вестник машиностроения. – 1991. – Вып. № 12. – С. 34–39.

6. Пилипенко О. Засоби технічного діагностування зубчастих передач вертольотних редукторів / О. Пилипенко, Д. Колесник, А. Березняк // Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем". – Чернігів: НУ "Чернігівська політехніка", 2021. – Том 1. – С. 67–68.

7. Пилипенко О. Стенди для випробувань вертольотних редукторів / О. Пилипенко, Д. Колесник, А. Березняк // Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції "Авіація, промисловість, суспільство". Частина 1. – Кременчук, 2021. – С. 142–145.

8. Пилипенко О. Точність та погрішності зубчастих передач вертольотних редукторів / О. Пилипенко, Д. Колесник, А. Березняк // Науковий журнал "Технічні науки та технології". – Вип. №1(19). – Чернігів, 2020. – С. 18–31.

9. Ионак В.Ф. Приборы кинематического контроля. – М.:Машиностроение, 1981. – 129 с.

10. Ионак В.Ф. Первичные преобразователи для диагностики высокоскоростных зубчатых передач / В.Ф. Ионак, А.И. Жабин // Вестник машиностроения. – 1991. – Вып. № 2. – С. 31–32.

11. Журавлёв В.Н. Методическая адекватность спектральной модели в задаче технического диагностирования роторных деталей редукторов ГТД / В.Н. Журавлёв, А.В. Папчёнков, С.А. Борзов // Вестник двигателестроения. – Запорожье: АО "Мотор Сич", 2014. – Вип. № 2. – С. 221–228.

12. Harry J. Decker. Crack Detection for Aerospace Quality Spur Gears /Harry J. Decker U.S. Army Research Laboratory Glenn Research Center, Cleveland, Ohio/National Aeronautics and Space Administration. NASA/TM–2002-211492. Prepared for the International 58th Annual Forum and Technology Display sponsored by the American Helicopter Society. – Montreal, Quebec, Canada, June 11–13, 2002.

13. Снесарев Г.А. Генеральные задачи редукторостроения // Передачи и трансмиссии. – 1991. – Вып. № 1. – С. 5–7.

14. Буденков Г.А. Использование методов акустической эмиссии для диагностики зубчатых передач / Г.А. Буденков, О.В. Недзвецкая // Передачи и трансмиссии. – 1997. – Вып. № 1. – С. 40–52.

15. Вулгаков Э.Б. Информационно-измерительная система контроля состояния авиационных и общемашиностроительных редукторов, приводов и коробок передач / Э.Б. Вулгаков, В.В. Голованов, А.В. Климов. – М.: изд-во ЦИАМ им. П.И. Баранова, 1990. – 64 с.

16. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски: ГОСТ 1643–81. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 45 с.

17. Локтев Д.А. Современные методы контроля качества цилиндрических зубчатых колес / Д.А. Локтев // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2009. – Вып. № 4. – С. 6–11.

18. Приборы для измерения зубчатых колёс: ГОСТ 25513–82 (СТ СЭВ 3004–81). – [Переиздание – январь 1987].

19. Измерительные средства для контроля зубчатых колес [Електронний ресурс]. – Режим доступу: delta-grup.ru/bibliot.

20. Измерение зубчатых колёс [Електронний ресурс]. – Режим доступу: tehnar.net.ua/ izmerenie-zubchatyih-koles/.

21. Измерение параметров зубчатых колёс [Електронний ресурс]. – Режим доступу: weber.ru/device/izmerenie-parametrov-zubchatyh-koles/678/.

22. Фірма Harbin Measuring & Cutting Tool Group [Електронний ресурс]. – Режим доступу: links-russia.ru.

23. Васильєва О.Е. Багатопараметричний синтез конструктивних елементів циліндричних редукторів з урахуванням особливостей їх виготовлення та надійності: дис. …д-р техн. наук. – Львів, 2018.

24. Определение показателей надёжности цилиндрических зубчатых передач методом ускоренных испытаний. – М.: ЭНИМАШ, 1989. – 96 с.

25. Кузьо І.В. Автоматизація динамічного навантаження зубчастих передач під час їх випробування на міцність. / І.В. Кузьо, О.Е. Васильєва. // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2000. – Вип. № 35. – С. 16–18.

26. Дорофеев В.Л. Экспериментальное и теоретическое исследование бифуркаций вибраций в авиационных трансмиссиях / В.Л. Дорофеев, В.В. Голованов, С.Г. Гукасян, Д.В. Дорофеев, В.Г. Сторчак, И.А. Афанасьев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – Самара: СГАУ, 2015. – Том 14. – Вып. № 3. – Ч.1. – С. 183–191.

27. Жукова С.И. Разработка метода технологического обеспечения противозадирной стойкости в кромочной зоне контактирования эвольвентных цилиндрических зубчатых колёс редукторов газотурбинных двигателей: дисс…. к.т.н. – Рыбинск, 2018.

28. E.I Gutman. Modern trends in gear testing / E.I Gutman / Proceedings of International Symposium “Theory and practice of gearing”. – Izhevsk, 2014. – P. 123–128.

Пилипенко Олег Іванович
доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
http//orcid.org/ 0000-0003-0590-0107
E-mail: opilip@ukr.net

Колесник Денис Миколайович
начальник науково-дослідної лабораторії Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
http//orcid.org/ 0000-0001-8833-570X
E-mail: denis1971@ukr.net

Березняк Анатолій Миколайович
начальник науково-дослідного відділу Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
http//orcid.org/ 0000-0003-4081-9152
E-mail: berezniak80@ukr.net

Кохан Вячеслав Володимирович
науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
https://orcid.org/0000-0003-3372-7612
E-mail: khnvcslv@gmail.com
+38063-944-20-27

Oleg Pilipenko
Doctor of Technical Sciences, Professor, Lead Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine.
http//orcid.org/ 0000-0003-0590-0107
E-mail: opilip@ukr.net

Denis Kolesnyk
Chief of Laboratory of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
http//orcid.org/ 0000-0001-8833-570X
E-mail: denis1971@ukr.net

Anatoli Berezniak
Chief of Section of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
http//orcid.org/ 0000-0003-4081-9152
E-mail: berezniak80@ukr.net

Vjacheslav Kohan
Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-3372-7612
E-mail: khnvcslv@gmail.com
+38063-944-20-27

ISSN 2706-7386

Панкул Олександр Миколайович
заступник командира з інженерно-авіаційної служби – начальник інженерно-авіаційної служби військової частини А4465, Миколаїв, Україна
https://orcid.org/0000-0003-3005-0730
E-mail: o.m.pankul@gmail.com
+38093-700-52-96

Oleksandr Pankul
Deputy Commander of the Aviation Engineering Service – Chief of the Aviation Engineering Service of the A4465 military unit, Mykolayiv, Ukraine.
https://orcid.org/0000-0003-3005-0730
E-mail: o.m.pankul@gmail.com
+38093-700-52-96

MEANS, STANDS AND MACHINES FOR TESTING GEAR WHEELS AND GEAR TRAINS OF HELICOPTER REDUCTION TRAINS

O Pilipenko, D Kolesnik, A Berezniak, V Kohan and O Pankul

The production and repair of such high-tech and important products as helicopters' reduction trains is impossible without comprehensive testing of these products, starting with the manufacture of their individual parts and assemblies and ending with the delivery of reduction trains to the customer.

Various means for testing of gear wheels' rims and gear trains of helicopter's reduction trains, which have found application in testing equipment, are presented. Devices, testers, stands and machines for various tests are considered in order to control the characteristics of gear trains of aviation reduction trains after certain periods of their operation and repair, aimed at achieving better performance during further operation.

The considered traditional metrological means of control of gear rims, gear measuring machines and complexes, some stands and machines for testing of reduction trains, pulse controllers and roll machines give an idea of various methods and means of control of gear wheels and gear trains of helicopters' reduction trains.

The main method of experimental research of gear trains of reducers is stand tests both on movable gear wheels and on roll machines.

Until recently, the most common method for monitoring and diagnosing gear trains has been vibrography, however, existing techniques do not give an accurate picture of the train condition, especially the contact surface of the teeth. During the operation of the gear train as a part of the helicopter's reduction train, signals from other sources (rotors, blades, shafts, bearings) are superimposed on the vibration signal generated by the gear train which significantly complicates the extraction and processing of the desired vibration signal.

One of the most effective methods for monitoring and diagnosing the technical condition of kinematic chains of different complexity, which includes gear trains of helicopters' reducers is kinematometry. The disadvantage of traditional kinematometry is the need to use high-precision sensors for the frequency and phase of the rotor rotation.

Control of vibration from the early 1990s to the present time is the most advanced control, the means and methods of which are well developed in the aviation industry.

Keywords: *means for testing of gear wheels and gear trains of helicopters' reduction trains.*