

**К.К. Щербина**, доц., канд. техн. наук, **В.А. Годорожа**, асп., **А.М. Кириченко**, проф.,  
д-р техн. наук, **А. Р. Апаракін**, канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
*e-mail: kir2912s@ukr.net*

## Дослідження параметрів точності виготовлення зубчатого зачеплення гідравлічних шестеренних насосів групи 1

У статті представлено результати дослідження параметрів точності виготовлення зубчатого зачеплення гідравлічних шестеренних насосів групи 1. Актуальність роботи зумовлена високими вимогами до точності геометричних параметрів зубчатого зачеплення, що забезпечує ефективну роботу насосів, мінімізацію витоків і втрат потужності.

У дослідженні розглянуто основні похибки, що виникають під час виготовлення зубчастих коліс, зокрема відхилення профілю, кроку, концентричності та бокового зазору. Проведено аналіз впливу цих похибок на гідромеханічні параметри насосів, включаючи коефіцієнт корисної дії, рівень шуму та зносостійкість. Застосовано сучасні методи контролю точності, такі як оптична та контактна профілометрія, що дозволило отримати кількісну оцінку параметрів точності.

Результати дослідження можуть бути використані для підвищення ефективності та надійності гідравлічних шестеренних насосів, що є важливим для галузей машинобудування та гідравлічної техніки. Одним із шляхів є дослідження взаємовпливу вихідних параметрів функціонування шестеренної гідравлічної машини.

**зубообробка, шевінгування, зубчате зачеплення, шестеренний гідравлічний насос, точність**

**Постановка проблеми.** Точність виготовлення зубчатого зачеплення гідравлічних шестеренних насосів відіграє ключову роль у забезпеченні їхньої ефективної та довговічної роботи. Ці насоси широко застосовуються в різних галузях промисловості, де стабільність і надійність роботи обладнання мають критичне значення. Відхилення у параметрах зачеплення можуть призводити до підвищених рівнів шуму, вібрацій, надмірного зносу деталей, а також до зниження коефіцієнта корисної дії. Особливе значення для забезпечення точності має процес шевінгування зубців, що є важливим етапом фінішної обробки зубчастих коліс. Він дозволяє мінімізувати похибки профілю, підвищити якість поверхонь і забезпечити стабільність зачеплення в умовах експлуатації.

Актуальність детального вивчення шевінгування обумовлена необхідністю оптимізації технологічного процесу, спрямованого на досягнення високої точності виготовлення при мінімальних виробничих витратах. Поглиблений аналіз параметрів точності виготовлення та розробка методів їхнього контролю сприятимуть не лише підвищенню якості гідравлічних насосів, а й удосконаленню наявних технологій обробки. Удосконалення процесів обробки зубчастих зачеплень є важливим кроком для розширення наукових знань у цій галузі, що водночас забезпечує економічну та технологічну конкурентоспроможність виробництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На підставі аналізу публікацій вчених, що шестерня несе на собі основні навантаження в процесі функціонування гідравлічних шестеренних насосів [1,2,3]. При цьому шестерня оснащена функціональними елементами, зокрема комплектом робочих поверхонь і крайок, утворених ними (рис.1):

- торці зубчастого вінця (ТЗВ);
- евольвентна циліндрична поверхня зубчастого вінця (ЕЦПЗВ);
- опорні цапфи (ОЦ);
- зовнішня поверхня зубчастого вінця (НПЗВ);
- евольвентні крайки (ЕК), утворені перетином ЕЦПЗВ і ТЗВ;
- циліндричні крайки (ЦК), утворені перетином ЕЦПЗВ і НПЗВ;
- торцеві крайки (ТК), утворені перетином НПЗВ і ТЗВ.

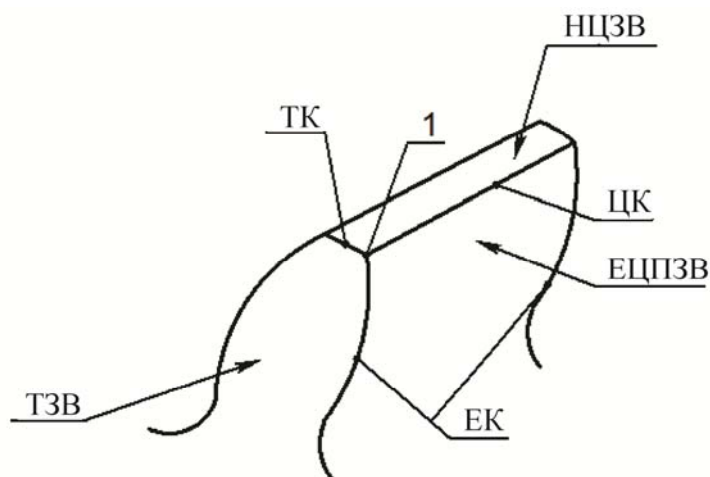


Рисунок 1 – Схема розміщення функціональних елементів на зубі шестерні

*Джерело: розроблено авторами*

Перераховані елементи повинні відповідати вимогам експлуатації, визначеним у конструкторській документації.

Однак низка вимог, не врахованих у конструкторській документації, потребує додаткового узгодження. Це пов'язано з тим, що такі вимоги необхідно забезпечити технологічними прийомами, які є визначальними для оцінки.

Найбільше функціональне навантаження несуть крайки ЕК і ЦК. Це пояснюється тим, що вони розділяють напірну зону насоса від зони всмоктування.

У зв'язку з цим, до них висуваються особливі вимоги щодо формоутворення та динамічної міцності.

Крайки ЕК і ЦК зазнають контактних навантажень під час роботи насоса і за певних умов можуть руйнуватися. Тому при їх формуванні необхідно уникати застосування технологічних прийомів, які можуть спричинити появу напружень на крайках через зазначені технологічні процеси.

Крім того, крайки повинні мати геометричну точність (відсутність просторових відхилень) для забезпечення чіткого контакту із сполученими поверхнями. Відсутність належного контакту може призвести до додаткових витоків і зниження ККД насоса.

Дослідження функціональних показників гідравлічних шестеренних машин є актуальним, що підтверджується значною кількістю наукових праць як вітчизняних дослідників [4, 5], так і зарубіжних [7, 8, 9]. Крім того, варто відзначити активну патентну діяльність, спрямовану на вдосконалення конструкції гідравлічних шестеренних машин [10].

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження процесу чистової обробки зубчатого зачеплення шестерень гідравлічного шестеренного насоса, а саме шевінгування з дотриманням показників закладених в DIN 3962.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження будемо проводити на зубошевінгувальному верстаті мод. ВСН-732NC22-7745 (рис.2) та виконувати замір деталей на координатно-вимірювальній машині Carl-Zeiss Contura G2 (рис.3)



Рисунок 2 – Зубошевінгувальний верстат мод. ВСН-732NC22-7745

*Джерело: на підставі [11]*



Рисунок 3 – Координатно-вимірювальна машина Carl-Zeiss Contura G2

*Джерело: на підставі [12]*

Шевінгування партії в кількості 98 шт. буде відбуватися з наступним режимі обробки, котрі були отримані в процесі на підставі обробки партії, як найоптимальніші та наведені в таблиці 1 з дотриманням наступних показників у відповідності до DIN 3962, а саме:

- $f_{f\alpha}$  – відхилення профілю зуба;
- $f_{N\alpha}$  – відхилення направлення профілю зуба;
- $F_r$  – накопичена похибка кроків зубців;
- $F_r$  – радіальне биття зубчастого вінця.

Таблиця 1 – Режими шевінгування зубчастого зачеплення

№	Параметр	Значення
1	Подача радіальна $S_{рад}$ , мм/хід	0,02
2	Кількість проходів	5
3	Подача повздовжня $S_{пр}$ , мм/хід	90
4	Частота обертів шевера $n_{ш}$ , об/хвл.	63
5	Припуск, мм	0,04...0,05

Джерело: розроблено авторами

Всі контрольовані показники будуть приведені в протоколі, котрий формує координатно-вимірвальна машина Carl-Zeiss Contura G2 з дотриманням вимог відповідності до DIN 3962 (рис.4).

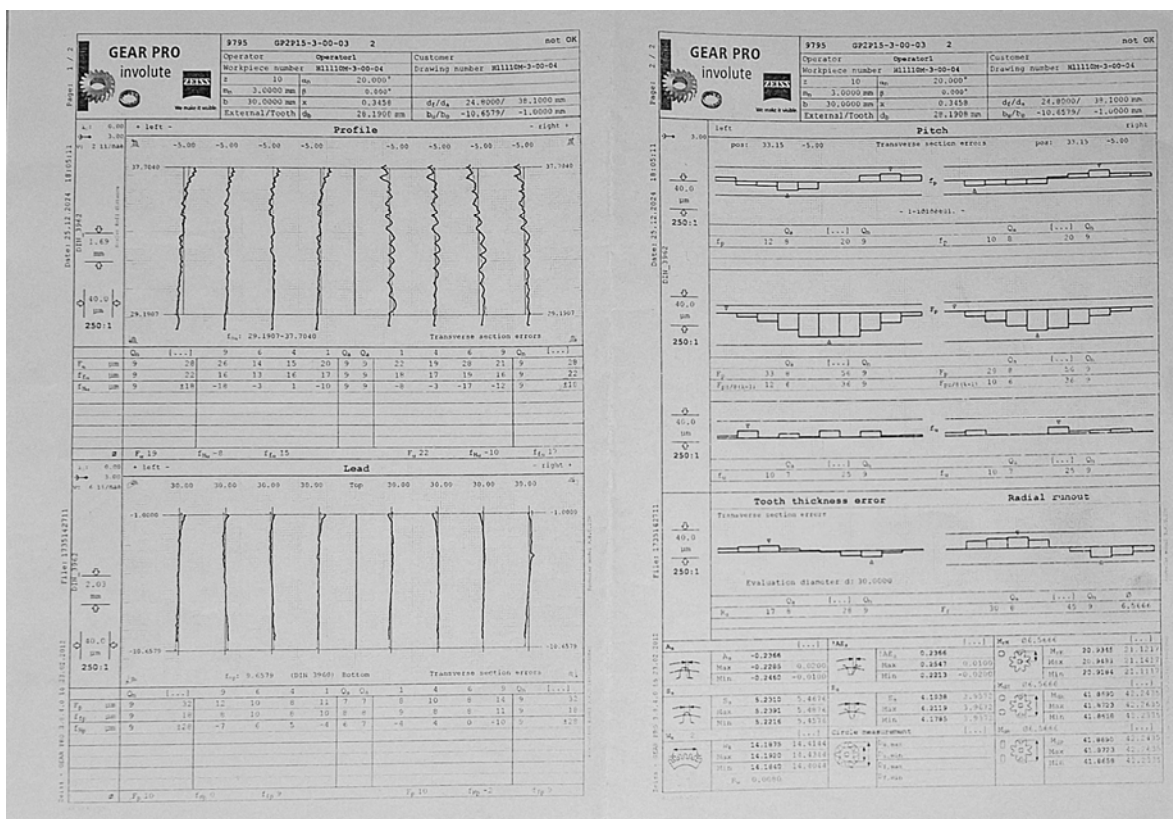


Рисунок 4 – Протокол вимірювання деталі на координатно-вимірвальній машині Carl-Zeiss Contura G2

Джерело: [12]

Отже під час шевінгування шестерень з малою кількістю зубців спостерігається порушення мікрорельєфу оброблюваної поверхні у вигляді періодично повторюваних виривів на профілі (рис. 5, а). Основною причиною його утворення є підвищення швидкості ковзання між ріжучими крайками інструмента та оброблюваною поверхнею зубців. Це явище зумовлене використанням кута схрещування осей інструмента і деталі, що впливає на характер контакту між ними. При збільшенні кута схрещування понад оптимальне значення до  $15^\circ$  відбувається нерівномірний розподіл контактних навантажень уздовж робочої поверхні зуба. Це призводить до перемінної глибини врізання ріжучих крайок, локального перегріву та мікроривів матеріалу, що формує характерний розірваний мікрорельєф. Дослідження показують, що зменшення кута схрещування з  $15^\circ$  до  $10^\circ$  дає змогу усунути цей ефект (рис. 5, б). При меншому куті схрещування покращується стабільність контакту між інструментом і деталлю, зменшується швидкість ковзання, а також рівномірно розподіляється навантаження уздовж поверхні зуба. Це сприяє формуванню однорідного мікрорельєфу, зменшенню шорсткості та покращенню якості обробленої поверхні.

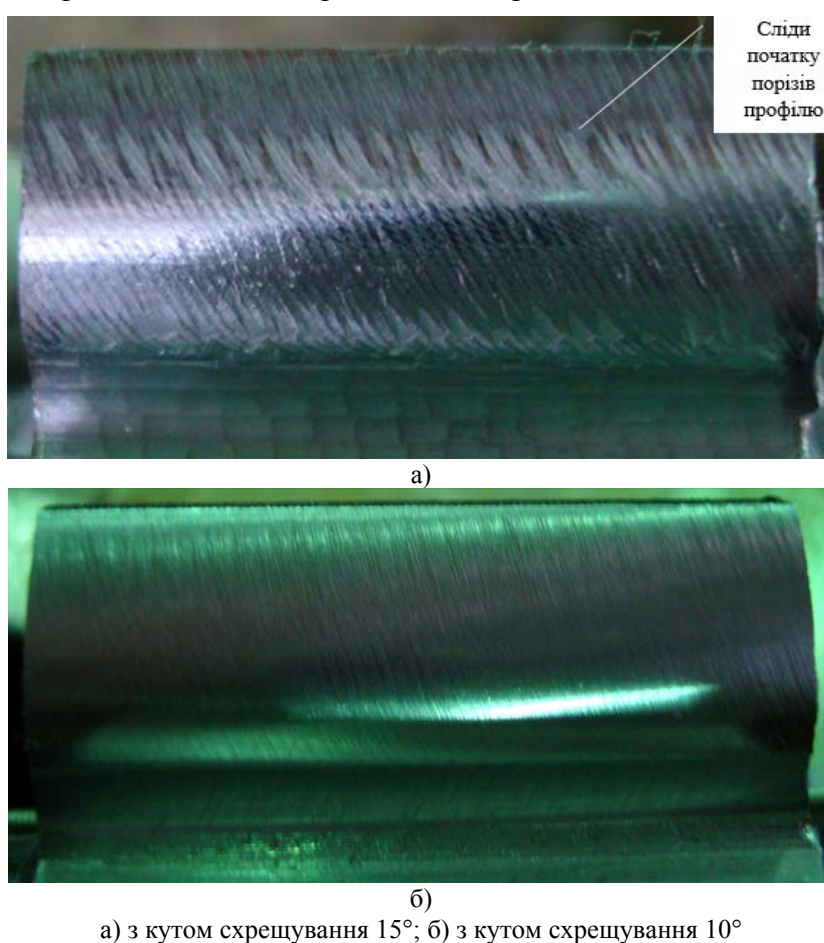


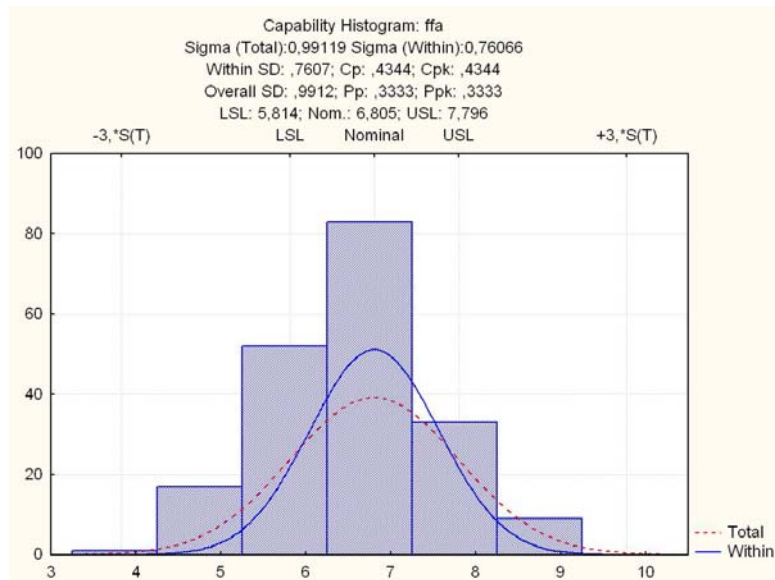
Рисунок 5 – Мікрорельєф евольвентного профілю деталі після шевінгування

*Джерело: розроблено авторами*

Результати обробки обумовленої партії представлено у вигляді гістограм на рисунку 6-9 на підставі вимог DIN 3962. Гістограма на рис.6 показує відхилення параметра профілю  $f_{f\alpha}$ , відображаючи частотний розподіл вимірних значень. З коефіцієнтом групування 6.805, але присутній значне розсіювання значень. Верхня та нижня межі коефіцієнту групування на рівні 7.796 та 5.814 відповідно. Видно, що



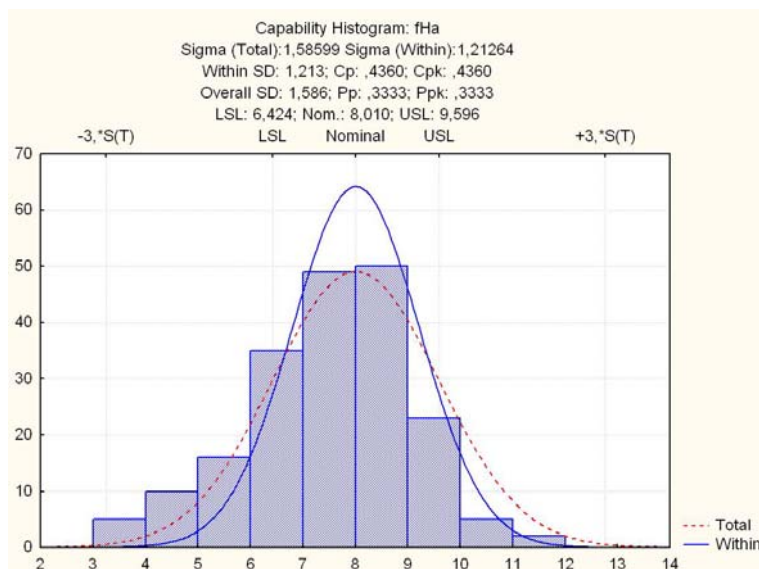
частина значень виходить за ці межі, що може призводити до браку продукції. Загалом гістограма на рис.6 відображає процес, який має нормальний розподіл, але широка дисперсія значень призводить до виходу за межі допустимих значень відхилень. Це свідчить про необхідність оптимізації – або шляхом зменшення розкиду значень, або шляхом коригування центру розподілу, щоб забезпечити стабільність і відповідність встановленим межам.



total – загальний розподіл відхилення параметру ffa ; within – внутрішню варіабельність процесу відхилення параметру ffa

Рисунок 6 – Гістограма та закон нормального розподілу відхилення параметру профілю зуба ffa

Джерело: розроблено авторами

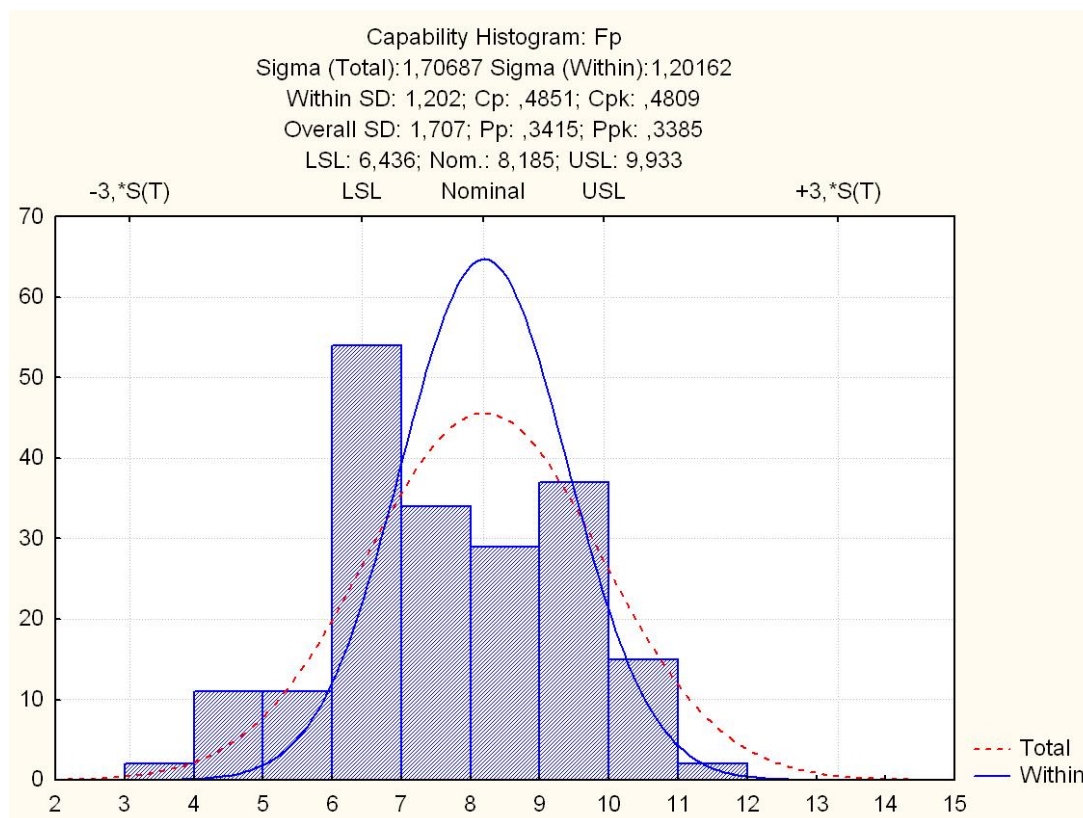


total – загальний розподіл відхилення параметру fHa ; within – внутрішню варіабельність процесу відхилення параметру fHa

Рисунок 7 – Гістограма закон нормального розподілу відхилення у параметру направлення профілю зуба fHa

Джерело: розроблено авторами

Гістограма демонструє відхилення параметра направлення профілю fHa, показуючи розподіл значень відносно коефіцієнту групування 8.010 та контрольних меж, встановлених на рівні 6.424 і 9.596. Розподіл даних має форму, близьку до нормального, але спостерігається значний розкид. Більшість значень концентрується поблизу центру, проте частина даних може виходити за допустимі межі, що впливає на якість готової продукції.



total – загальний розподіл відхилення параметру Fp; within – внутрішню варіабельність процесу відхилення параметру Fp

Рисунок 8 – Гістограма та закон нормального розподілу відхилення параметру накопиченої похибки кроків зубців Fp

*Джерело: розроблено авторами*

Гістограма на рис. 8 ілюструє відхилення параметра накопичена похибка кроків Fp, відображаючи частотний розподіл вимірних значень. Коефіцієнт групування становить 8,185, проте спостерігається значне розсіювання даних. Встановлені межі коефіцієнта групування визначені на рівні 9,933 та 6,436. Аналіз гістограми показує, що частина значень виходить за ці границі, що може спричинити збільшення відсотка браку та негативно вплинути на стабільність технологічного процесу. Гістограма на рис. 9 відображає відхилення параметра накопичене радіальне биття зубчастого вінця Fg, демонструючи частотний розподіл вимірних значень. Коефіцієнт групування становить 8,184, проте спостерігається значне розсіювання результатів. Встановлені межі коефіцієнта групування визначені на рівні 10,12 та 6,245. Аналіз розподілу показує, що частина значень виходить за встановлені границі, що може призводити до підвищеної кількості браку та негативного впливу на точність і надійність роботи зубчастого вінця.

Загалом гістограма на рис.7-9 відображає процес, який має нормальний розподіл, але широка дисперсія значень призводить до виходу за межі допустимих значень відхилень. Це свідчить про необхідність оптимізації – або шляхом зменшення розкиду значень, або шляхом коригування центру розподілу, щоб забезпечити стабільність і відповідність встановленим межам.

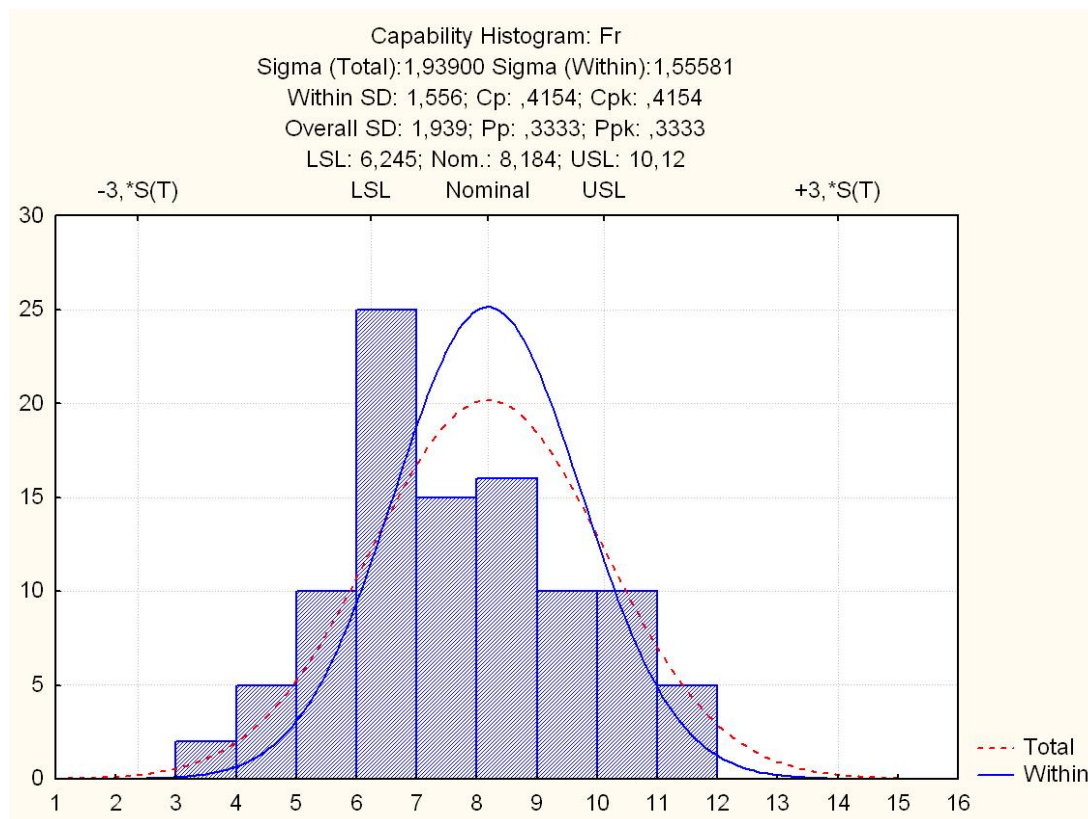


Рисунок 9 – Гістограма та закон нормального розподілу відхилення параметру радіального биття зубчатого вінця Fr

Джерело: розроблено авторами

**Висновки.** 1. Аналіз обробки шевінгуванням зубчатого зачеплення шестеренних насосів групи 1 показав, що цей метод дозволяє суттєво підвищити точність геометричних параметрів зубців та забезпечити якість їх поверхні. Завдяки цьому зменшується шорсткість профілю, що позитивно впливає на контактну витривалість та експлуатаційні характеристики деталей.

2. За результатами проведеного дослідження в процесі шевінгування визначено, що фактична точність шестерень відповідає 7-8 квалітету точності за DIN 3962.

3. Найбільше розходження показників мають накопичена похибка кроків зубців та радіальне биття зубчатого вінця, що зумовлені рядом невирішених проблем, серед яких варто виокремити наступні. Так, причиною низького рівня якості за параметром  $f_{Na}$  є необхідність підбору форми припуску під шевінгування, а також потреба усунення похибок вимірювання. В той же час періодично повторювана похибка базування деталей на зубофрезерній операції спричиняє отримання значних обсягів деталей з відхиленнями Fr. Також не менш важливою причиною впливу на параметр Fr можна назвати відсутність жорсткої фіксації столу зубофрезерного верстата.



## Список літератури

1. Функціональний портрет шестеренної гідравлічної машини / М. М. Підгаєцький, К.К. Щербина та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. № 8 (39) . С. 3–10.
2. Апаракін А. Р. Модульно-параметричний принцип розробки проектів шестеренних гідравлічних машин. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. Кропивницький : ЦНТУ*, 2023. Вип. 7(38). Ч. 2. С. 51-58.
3. Матвієнко О.О. Математична модель втрат робочої рідини через радіальний зазор шестеренного насоса типу НШ. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ*. 2005. Вип. 16. С. 235-240.
4. Підвищення подачі шестеренних насосів засобів транспорту та сільськогосподарської техніки / Кулешков Ю. В. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 4 (36). Ч. 1. С. 197–203. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.197-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.197-203)
5. Кулешков Ю. В. Підвищення технічного рівня шестеренного насоса на основі нових фізичних і математичних моделей робочого процесу подачі : дис. д-ра техн. наук : 05.05.17. Харків, 2013. 442 с.
6. Кириченко А.М. Функціональний портрет шестеренного гідравлічного насосу / А.М. Кириченко, К.К. Щербина, В.А. Годорожа // *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2023): Матер. XIII міжнар. наук.-практ. конф. (25-26 травн., 2023р., м. Чернігів)*. – Чернігів: НУ "Чернігівська політехніка", 2023. Т. 1. С. 288-289.
7. Yang Zhou, Bowen Che, Ci Yuan. The design and analysis of a high-speed circular arc gear pump *journal bearing*. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10(12) P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018819288>.
8. Zardin B, Natali E, Borghi M. Evaluation of the Hydro-Mechanical Efficiency of External Gear Pumps. *Energies*. 2019. Vol. 12(2468). DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132468>.
9. Fang Guo, Zongde Fang, Experimental and theoretical study of gear dynamical transmission characteristic considering measured manufacturing errors. *Hindawi. Shock and Vibration*. 2018. P. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9645453>.
10. Gear pump cavitation reduction : пат. 7878781 B2 United States : МПК FOIC 2L/00. № 12/001,279 ; заявл. 11.12.2007 ; опубл. 01.02.2011.
11. Expert tools: веб-сайт. URL: <https://www.etum.in.ua/product-category/zuboobrobni-verstaty/page/1/> дата звернення 20.01.2025
12. Carl-zeiss: веб-сайт. URL <https://www.zeiss.co.in/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/bridge-type-cmms/contura-g2.html> дата звернення 20.01.2025

## References

1. Funktsionalnyi portret shesterennoi hidravlichnoi mashyny/ M. M. Pidhaietskyi, K.K. Shcherbyna et al. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*. 2023. № 8 (39) . P. 3–10. [in Ukrainian].
2. Aparakin, A. R. Modulno-parametrychnyi pryntsyyp rozrobky proektiv shesterennykh hidravlichnykh mashyn / A. R. Aparakin // *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky : zb. nauk. pr. - Kropyvnytskyi : TsNTU*, 2023. Vyp. 7(38). Ch. 2. P. 51-58. [in Ukrainian].
3. Matvienko, O.O. (2005). Matematichna model' vtrata robochoi ridini cherez radial'nij zazor shesterennogo nasosa tipu NSH [Mathematical model of losses of the working fluid due to the radial clearance of the gear pump type NSH]. *Zbirnik naukovih prac' KNTU. Tekhnika v sil'skogospodars'komu virobnytvi, galuzeve mashinobuduvannya, avtomatizaciya* – Collected Works of Kirovohrad National Technical University. Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation, Issue 16, 235-240 [in Ukrainian].
4. Kuleshkov, Y.V., Krasota, M.V., Rudenko, T.V., et al. (2022). Pidvishhennja podachi shesterennykh nasosiv zasobiv transportu ta sil'skogospodars'koyi tehniky [Increasing the Supply of Gear Pumps for Vehicles and Agricultural Machinery]. *Central'noukrayins'kij naukovij visnyk. Tehnichni nauki - CentralUkrainian National Technical University*. Technical sciences, Issue 4(36), Part. 1, 197–203 [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.197-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.197-203) [in English].
5. Yu.V. Kulieshkov (2013) Pidvyshchennia tekhnichnoho ravnia shesterennogo nasosa na osnovi novykh fizychnykh i matematychnykh modelei robochoho protsesu podachy [Increasing the technical level of the gear pump on the basis of new physical and mathematical models of the working process of feeding]. *Dysertatsiia na zdobuttia naukovooho stupenia doktora tekhnichnykh nauk*, Kharkiv, 2013 442 p [in Ukrainian].
6. Kyrychenko A.M. (2023) Funktsionalnyi portret shesterennogo hidravlichnoho nasosu [Functional portrait of a gear hydraulic pump] / A.M. Kyrychenko, K.K. Shcherbyna, V.A. Hodorozha // *Комплексне забезпечення*

- yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZiATPS - 2023): Mater. KhIII mizhnar. nauk.-prakt. konf. (25-26 travn., 2023r., m. Chernihiv). Chernihiv: NU "Chernihivska politekhnika", 2023. T. 1. P. 288-289.
7. Yang Zhou, Bowen Che & Ci Yuan. (2018). The design and analysis of a high-speed circular arc gear pump journal bearing. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(12), P.1–11. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018819288> [in English].
  8. Zardin, B., Natali, E. & Borghi, M. (2019). Evaluation of the Hydro-Mechanical Efficiency of External Gear Pumps. *Energies*, 12(2468). DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132468> [in English].
  9. Fang Guo & Zongde Fang. (2018). Experimental and theoretical study of gear dynamical transmission characteristic considering measured manufacturing errors. *Hindawi. Shock and Vibration*. P. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9645453> [in English].
  10. Gear pump cavitation reduction (United States Patent № 7878781 B2). (2011) [in English].
  11. Expert tools: veb-sait. URL: <https://www.etum.in.ua/product-category/zuboobrobni-verstaty/page/1/> data zvernennia 20.01.2025
  12. Carl-zeiss: veb-sait. URL <https://www.zeiss.co.in/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/bridge-type-cmms/contura-g2.html> data zvernennia 20.01.2025

**Kyryl Shcherbyna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Kyrychenko**, Prof., DSc., **Anton Aparakin**, PhD tech. sci., **Viktor Hodorodozha**, post-graduate

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Study of the Accuracy Parameters of the Production of Gear Wheels for Hydraulic Gear Pumps Size 1**

The article presents the results of the study of the accuracy parameters of the manufacturing of gears for hydraulic gear pumps of group 1. The relevance of the work is due to the high requirements for the accuracy of the geometric parameters of the gears, which ensure the efficient operation of the pumps, minimising leakage and power losses.

The study considers the main errors that occur in the manufacture of gears, in particular deviations in profile, pitch, concentricity and side clearances. The influence of these errors on the hydromechanical parameters of the pumps, including efficiency, noise level and wear resistance, is analysed. Modern methods of accuracy control, such as optical and contact profilometry, have been used to provide a quantitative assessment of the accuracy parameters.

On the basis of the results obtained, recommendations for improving the technological processes of gear machining, including the optimisation of shaving and finishing, are proposed. The article also discusses the influence of heat treatment modes on the accuracy and stability of geometric parameters of gears. The analysis of the gear teeth of Group 1 gear pumps by chamfering shows that this method can significantly improve the accuracy of the geometric parameters of the teeth and the quality of their surface. This reduces the roughness of the profile, which has a positive effect on the contact life and performance characteristics of the parts. Shaving also helps to reduce the level of residual stress in the surface layer of the teeth, which increases their resistance to fracture during metal fatigue, especially under variable loads. As a result of the study, the following results were obtained: in fact, the 7th to 8th degree of accuracy according to DIN 3962 is achieved after chamfering. The greatest difference in the indicators is in the accumulated error of the steps and the radial runout of the gear ring.

The results of the study can be used to improve the efficiency and reliability of hydraulic gear pumps, which is important for the fields of mechanical engineering and hydraulic engineering. One of the important issues in the development of mechanical engineering is to improve the efficiency of the functional performance of various mechanisms, including hydraulic gear pumps and motors. Special attention should be paid to the following indicators.

**shovel, gearbox, gear, gear hydraulic pump, precision**

*Одержано (Received) 08.11.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 12.12.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024*