

**О. В. Березюк, д-р техн. наук, доц.; Н. С. Семічаснова**

## **ВПЛИВ ТРИВАЛОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОБОЧОЇ РІДИНИ В ОБ'ЄМНИХ ГІДРОПРИВОДАХ НА КОНЦЕНТРАЦІЮ ЗАБРУДНЕНЬ**

*Під час експлуатації гідравлічних приводів здійснюють регулярний контроль таких параметрів робочої рідини: в'язкість, наявність забруднень (механічних домішок) і води. Тому визначення регресійної залежності концентрації забруднень робочої рідини від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів, яка може бути використана під час розробки методики інженерних розрахунків технічного обслуговування об'ємних гідроприводів, є актуальною науково-технічною задачею. Метою дослідження є побудова за допомогою регресійного аналізу регресійної залежності концентрації забруднень робочої рідини від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів, яка може бути використана під час розробки методики інженерних розрахунків технічного обслуговування об'ємних гідроприводів. Під час проведення дослідження використано метод регресійного аналізу результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором найбільш адекватного виду функції із шістнадцяти найпоширеніших варіантів за критерієм максимального значення коефіцієнта кореляції. Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, які дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz". Отримано регресійну залежність концентрації забруднень робочої рідини від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів, яка може бути використана під час розробки методики інженерних розрахунків технічного обслуговування об'ємних гідроприводів. Побудовано графічну залежність концентрації забруднень робочої рідини від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів, яка дозволяє наочно проілюструвати цю залежність та показати достатню збіжність теоретичних результатів з фактичними. Встановлено, що концентрація забруднень робочої рідини при збільшенні тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів зростає за степеневою залежністю.*

**Ключові слова:** об'ємний гідропривід, робоча рідина, тривалість експлуатації, концентрація забруднень, регресійний аналіз, регресійна залежність.

### **Вступ**

Використання гідроприводів в технологічних та мобільних машинах дозволяє спростити їхню кінематику, знизити металоємність, підвищити точність, надійність і рівень автоматизації, забезпечити широкий діапазон безступінчастого регулювання швидкості, можливість роботи в динамічних режимах з необхідною якістю перехідних процесів, захист систем від перевантаження і контроль наявних зусиль [1 – 5].

У гідроприводах робоча рідина виконує важливі та різносторонні функції, головна з яких – передача енергії, а також функції змащування та охолодження, захист деталі від корозії, евакуація продуктів відпрацювання [6 – 11]. Комплекс вимог, які висуваються до робочих рідин значною мірою залежить від функцій, що виконує гідропривід [12]. Причому, зі збільшенням тиску та розширенням діапазону температур та інших параметрів гідроприводу значимість параметрів робочої рідини зростає.

### **Постановка проблеми**

Під час експлуатації гідравлічних приводів здійснюють регулярний контроль таких параметрів робочої рідини: в'язкість, наявність забруднень (механічних домішок) і води. Тому визначення регресійної залежності концентрації забруднень робочої рідини від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів є актуальною науково-технічною задачею.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У матеріалах роботи [13] наведено формули для розрахунку параметрів робочої рідини з урахуванням максимальної кількості факторів.

Забруднення робочої рідини гідроприводу механічними частинками впливає на інтенсивне зношення в з'єднаннях гідроагрегату. На працездатність гідроприводу впливає не стільки маса домішок, скільки розміри і твердість їхніх частинок. Основними видами зносу є гідро-абразивний та втомний, які викликані забрудненням робочої рідини механічними домішками та частими змінами тиску. Головними джерелами забруднення гідроприводу є: технологічні забруднення, які потрапляють в процесі виготовлення й ремонту гідроагрегатів; забруднення, котрі потрапляють під час транспортування, зберігання та заправки робочої рідини; продукти спрацювання деталей гідроагрегатів; частини пилу, які попадають під час експлуатації через зазори ущільнень гідроагрегатів та заливну горловину; продукти окислення деталей гідроагрегатів. Дія абразивних часток на поверхні призводить до зношування деталей і, як наслідок, збільшення зазору в парах тертя та збільшення втрат робочої рідини, також дія часток призводить до пластичного деформування поверхневих шарів металу і втомного руйнування деталей [14].

Шестеренні насоси будучи важко навантаженими агрегатами, що пов'язано з дією таких факторів, як циклічні механічні навантаження, висока запиленість навколишнього середовища, знакозмінні температурні режими тощо, мають обмежений ресурс, який складає 45...50 % від встановленого [15]. Зношування деталей шестеренних насосів є основною причиною зниження його функціональних параметрів і ресурсу, з чим пов'язано 67...75% відмов насосів [16]. Основними причинами підвищення інтенсивності зношування є погіршення умов тертя – проникнення абразивних часток в зону контакту деталей, послаблення захисних властивостей змазки, зміна зазорів спряження, обумовлених зміною температури робочої рідини. Основним видом зношування в шестеренному насосі є абразивне зношування. Частинами, що руйнують поверхні деталей шестеренних насосів, є: нерухомо закріплені тверді зерна в поверхні деталей з невисокою твердістю (шаржування поверхні) і вільні частинки, що втягуються в потоку робочою рідиною. Поверхні деталей насосів також підлягають кавітаційному зношуванню. Але цей вид зношування в шестеренних насосах недостатньо вивчений.

Найбільш істотним забрудненням робочої рідини є продукти зносу. При цьому більша частина цих забруднень утворюються в початковий період роботи агрегатів гідросистем (період припрацювання) [17]. За умови, що абразивні частинки входять в контакт з поверхнею деталі по дотичній, вони пружно деформують метал, залишаючись цілими або руйнуючись; в залежності від структури абразивного матеріалу і середовища зерна можуть втискатися в це середовище, повернутися або навіть вийти з зони контакту. Абразивна частинка втискається в метал деталі, якщо вона має більшу твердість ніж металеве зерно і міцність, достатню для сприйняття навантаження, необхідного для втискання в метал, і якщо її достатньо підтримує основа. Така частинка при русі відносно поверхні може утворити ризику або зрізати мікроскопічну стружку.

В роботі [18] проаналізовано принципи побудови та конструктивні особливості приладів діагностування гідравлічних систем і гідроприводів за параметрами робочої рідини, які випускаються промисловими підприємствами. Встановлено сфери їхнього раціонального використання. Наведено опис конструкції та технічних характеристик агрегату Fluid Control Unit FCU фірми HYDAC International GmbH для миттєвого діагностування якості робочої рідини. Показано, що його застосування при проведенні лабораторних, стендових, заводських та експлуатаційних випробувань забезпечує потрібну точність і оперативність, дозволяє досліднику провести об'єктивний аналіз технічного стану гідросистеми або гідроприводу, завдяки чому підвищує їхню надійність та збільшує міжремонтний період.

В матеріалах робіт [19, 20] запропоновано визначати терміни служби робочої гідроприводів будівельних і дорожніх машин за допомогою коефіцієнта протизношувальних властивостей, що являє собою дріб, у чисельнику якої наведено кількість частинок забруднень розміром  $\leq 5$  мкм з коефіцієнтом 5, а у знаменнику – сума частинок розміром більше 5 мкм (з відповідними коефіцієнтами) у діапазонах розмірів, що передбачені ГОСТ 17216-2001.

За результатами досліджень [21] використання подільника потоку, як джерела гідравлічної енергії, дає змогу вдосконалити гідропривід за рахунок об'єднання в єдиній системі очистку робочої рідини від забруднень та ежекторне підживлення гідронасосу.

В роботі [22] зазначено, що на довговічність гідроприводу сільськогосподарських, будівельних і дорожніх машин істотний вплив мають як конструктивні параметри, що закладаються на етапі проектування, так і властивості робочої рідини, які підтримуються на етапі експлуатації. Тому, враховуючи вищенаведені фактори впливу на роботу гідроприводів мобільних машин, можна зробити такі висновки: щоб уникнути несправностей у цій системі, необхідно забезпечити високу очистку робочої рідини, яка використовується в гідроприводі, що, своєю чергою, забезпечить надійну та ефективну роботу сільськогосподарських, будівельних та дорожніх машин.

Стаття [13] присвячена розгляду переваг і недоліків об'ємного гідроприводу перед електричним приводом та механічними передачами, а також переваг та недоліків шестеренних насосів. Зазначено, що механічні домішки потрапляють в гідросистему в результаті недостатнього очищення і промивки деталей та вузлів під час виготовлення (металева стружка, заусенці, що обірвалися, залишки абразиву, окалина тощо), містяться в робочих рідинах в момент заливки в систему, потрапляють при монтажу і ремонтних роботах, утворюються при зносі і корозії деталей в процесі роботи, проникають у вигляді пилу через повітропроводи і нещільність гідробаків. Визначено, що основним видом зношення деталей шестеренного насосу є абразивне зношення. Наведено, що основна причина виходу з ладу шестеренних насосів є забруднення робочої рідини. Визначено фактичний вміст механічних домішок в робочій рідині гідросистем машин та якісна оцінка забруднень.

Однак конкретних математичних залежностей концентрації забруднень робочої рідини від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів, авторами не виявлено.

#### **Мета і завдання статті**

**Метою цієї статті** є побудова за допомогою регресійного аналізу регресійної залежності концентрації забруднень робочої рідини від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів, яка може бути використана під час розробки методики інженерних розрахунків технічного обслуговування об'ємних гідроприводів.

#### **Методи і матеріали**

Під час визначення регресійної залежності концентрації забруднень робочої рідини від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів використано такі методи: регресійного аналізу результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей, комп'ютерного моделювання.

#### **Результати досліджень**

У таблиці 1 показані значення концентрації забруднень робочої рідини для різної тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів без її заміни [13].

Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, що дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів [23] за допомогою розробленої комп'ютерної програми

"RegAnaliz", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір [24] і детально описана в роботах [25, 26].

Таблиця 1

**Значення концентрації забруднень робочої рідини для різної тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів [13]**

Тривалість експлуатації об'ємних гідроприводів, год	710	725	750	765	950	1050	1100	1150
Концентрація забруднень робочої рідини, %	0,082	0,091	0,119	0,107	0,109	0,138	0,112	0,15

Програма "RegAnaliz" дозволяє проводити регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором кращого виду функції із 16 найпоширеніших варіантів за критерієм максимального коефіцієнту кореляції зі збереженням результатів в форматі MS Excel та Bitmap.

Результати регресійного аналізу наведені в таблиці 2, де сірим кольором позначено комірки з видом регресії з максимальним значенням коефіцієнта кореляції  $R$ .

Отже, за результатами регресійного аналізу на основі даних таблиці 1, як найбільш, адекватну остаточно прийнято таку регресійну залежність

$$C_3 = 0,08252 + 1,003 \cdot 10^{-10} t^{2,86} \quad [\%], \quad (1)$$

де  $C_3$  – концентрація забруднень робочої рідини, %;  $t$  – тривалість експлуатації об'ємних гідроприводів, год.

Таблиця 2

**Результати регресійного аналізу залежності концентрації забруднень робочої рідини від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів**

№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції $R$	№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції $R$
1	$y = a + bx$	0,77304	9	$y = ax^b$	0,77132
2	$y = 1 / (a + bx)$	0,75759	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,77219
3	$y = a + b / x$	0,77135	11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,77219
4	$y = x / (a + bx)$	0,36761	12	$y = a / (b + x)$	0,75759
5	$y = ab^x$	0,76878	13	$y = ax / (b + x)$	0,76930
6	$y = ae^{bx}$	0,76878	14	$y = ae^{b/x}$	0,77387
7	$y = a \cdot 10^{bx}$	0,76878	15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,77387
8	$y = 1 / (a + be^{-x})$	0,75759	16	$y = a + bx^n$	0,77388

На рис. 1 показані фактичну та теоретичну графічну залежності концентрації забруднень робочої рідини від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів.

Порівняння фактичних та теоретичних даних показало, що теоретичні концентрації забруднень робочої рідини залежно від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів, розраховані за допомогою рівняння регресії (1), несуттєво відрізняються від даних, наведених в роботі [13], що підтверджує визначену раніше точність отриманої залежності на рівні 0,77388.

З рис. 1 видно, що концентрація забруднень робочої рідини при збільшенні тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів зростає за степеневою залежністю.

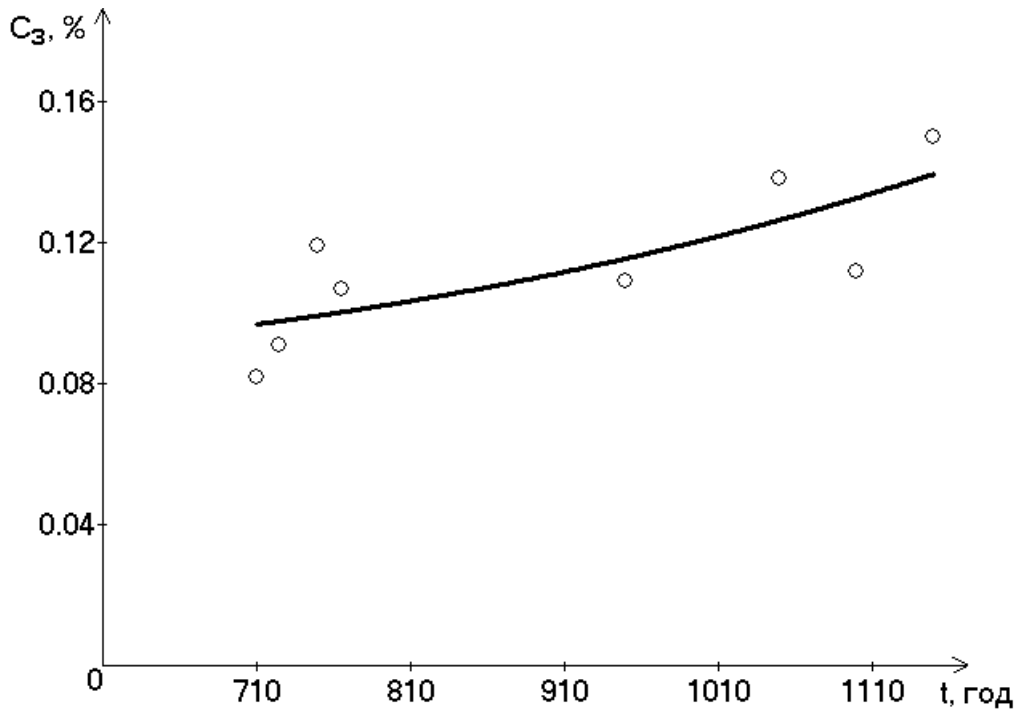


Рис. 1. Зміна концентрації забруднень робочої рідини від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів

### Висновки

1. Визначено регресійну залежність концентрації забруднень робочої рідини від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів, яка може бути використана під час розробки методики інженерних розрахунків технічного обслуговування об'ємних гідроприводів
2. Побудовано графічну інтерпретацію залежності концентрації забруднень робочої рідини від тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів, яка дозволяє наочно проілюструвати цю залежність та показати збіжність теоретичних результатів з фактичними на рівні 0,77388.
3. Встановлено, що концентрація забруднень робочої рідини при збільшенні тривалості експлуатації об'ємних гідроприводів зростає за степеневою залежністю.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андренко П. М., Дмитрієнко О. В., Клітної В. В. Підвищення енергоефективності гідроприводів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019*, 15-17 травня 2019 р. 2019. С. 84.
2. Піонткевич О. В. Математична модель гідроприводу фронтального навантажувача з гальмівним клапаном. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. № 2. С. 83–90.
3. Іскович-Лотоцький Р. Д., Міськов В. П., Слабкий А. В. Динамічна та математична моделі вібропрес-молота з електрогідрравлічним керуванням. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2014. № 48. С. 3–10.
4. Березюк О. В. Аналітичне дослідження математичної моделі гідроприводу вивантаження твердих побутових відходів із сміттєвоза. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2011. № 34 (4). С. 80–83.
5. Піонткевич О. В. Вплив параметрів системи керування гідроприводом мобільної робочої машини на динамічні характеристики. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2016. № 2. С. 68–76.
6. Березюк О. В. Планування багатофакторного експерименту для дослідження вібраційного гідроприводу ущільнення твердих побутових відходів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2009. № 3 (55). С. 92–97.
7. Березюк О. В. Дослідження динаміки гідроприводу робочих органів завантаження твердих побутових відходів у сміттєвози. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2009. № 33. С. 403–406.
8. Поліщук Л. К., Піонткевич О. В., Коваль О. О. Аналіз впливу параметрів системи керування на динамічні процеси гідропривода стрічкового конвеєра. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2016. №2 (52). С. 37–48.
9. Березюк О. В. Дослідження динаміки гідроприводу вивантаження твердих побутових відходів із

сміттєвозів. *Машинознавство*. 2008. № 10 (136). С. 25–28.

10. Березюк О. В. Установка із вібраційним гідроприводом для брикетування відходів деревообробної промисловості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2007. № 4. С. 149–152.

11. Березюк О. В. Аналітичне дослідження математичної моделі гідроприводу повороту важеля маніпулятора на операції завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2010. № 3. С. 93–98.

12. Фінкельштейн З. Л., Андренко П. М., Дмитрієнко О. В. Експлуатація, обслуговування та надійність гідравлічних машин і гідроприводів: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», 2014. 308 с.

13. Русских В. В. Дослідження складу забруднень робочої рідини гідросистем дорожньо-будівельних машин, тракторів та автомобілів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2013. Вип. 43, част. II. С. 246–255.

14. Калганков Є. В. Деякі проблеми гідроабразивно-втомного зносу деталей об'ємного гідроприводу мобільних машин. *Геотехнічна механіка*. 2013. № 108. С. 133–142.

15. Андренко П. М., Лебедев А. Ю. Лабіринтно-гвинтові насоси: монографія. Харків: Видавництво ФОП Панов, 2017. 156 с.

16. Ремонт шестеренних насосів гідросистем дорожніх машин / Є. К. Посвятенко та ін. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету та Північно-Східного наукового центру Транспортної академії України*. Збірник наукових праць. Випуск 38, Харків: ХНАДУ, 2007. С. 113–117.

17. Дубовик В. О. Підвищення працездатності та довговічності корпусних деталей з алюмінієвих сплавів шляхом управління внутрішніми напруженнями. Автореф. дис. канд. техн. наук. Київ, 2005. 20 с.

18. Лебедев А. Ю., Дмитрієнко О. В. Агрегат Fluid Control Unit FCU фірми HYDAC International GmbH для миттєвого діагностування якості робочої рідин. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2017. № 4. С. 3–10.

19. Орел В. О. Визначення строку служби робочої рідини в гідросистемі автогрейдера. *Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Серія: Підійомно-транспортні, будівельні та дорожні машини та обладнання*. 2012. № 66. С. 147–150.

20. Венцель Є. С., Орел О. В., Пономаренко О. Ю. Визначення мінімально припустимого значення коефіцієнта протизношувальних властивостей робочих рідин гідроприводів. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2011. Вип. 53. С. 95–98.

21. Пімонов Г. Г., Щербіна А. М. Вдосконалення гідроприводу будівельних машин на базі об'ємного подільника потоку. *Матеріалознавство. Машинобудування. Серія: Підійомно-транспортні, будівельні та дорожні машини та обладнання*. 2012. № 66. С. 257–266.

22. Шевчук В. В., Кутковецька Т. О. Аналіз досліджень довговічності гідросистем мобільних машин. *Вчені записки*. 2019. № 4, Т. 30 (69), Ч. 2. 2019. С. 146–150.

23. Михалевич В. М., Шевчук О. І., Буга Н. Л. Математичні системи комп'ютерної алгебри як засіб підвищення ефективності і якості освітнього процесу з вищої математики. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми* : зб. наук. прац. Випуск 14. Київ-Вінниця : ДОВ «Вінниця», 2007. С. 357–360.

24. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Регресійний аналіз" ("RegAnaliz"). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49486. Київ : Державна служба інтелектуальної власності України. Дата реєстрації: 03.06.2013.

25. Bereziuk O. V. Determination of the regression of the solid waste compaction factor on the height of the polygon on the base of the computer program "RegAnaliz". *Automation of technologies and productions*. 2015. № 2 (8). P. 43-45.

26. Березюк О. В. Встановлення регресій параметрів захоронення відходів та потреби в ущільнювальних машинах на основі комп'ютерної програми "RegAnaliz". *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2014. № 1. С. 40–45.

Стаття надійшла до редакції 05.03.2025.

Стаття пройшла рецензування 18.03.2025.

**Березюк Олег Володимирович** – д-р техн. наук, професор кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, e-mail: berezyukoleg@i.ua.

**Семічаснова Наталія Степанівна** – старший викладач кафедри технологій та автоматизації машинобудування.

Вінницький національний технічний університет.