



*І. В. Жуковицький, д. т. н., професор кафедри «Електронні обчислювальні машини»,
І. А. Ключник, асистент кафедри «Електронні обчислювальні машини»,
О. Б. Очкасов, к. т. н., доцент кафедри «Локомотиви»,
Р. О. Коренюк, асистент кафедри «Локомотиви»,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*

Удосконалення засобів вимірювання стенду обкатки гідропередач тепловозів шляхом впровадження мікропроцесорних засобів

Для більшості локомотивів з гідравлічною передачею потужності, які використовуються на території України, необхідно здійснити капітальний або капітально-відновлюваний ремонт. При виконанні капітального ремонту одним із складних та відповідальних вузлів тепловоза є гідравлічна передача. Після капітальних ремонтів гідравлічних передач тепловозів проводяться їх випробовування без навантаження з метою припрацювання деталей, а також випробування під навантаженням з метою перевірки основних параметрів.

Ключові слова: тахометричних датчик; Д-2ММУ-2; гідравлічна передача; випробування гідравлічних передач; випробувальний стенд; інформаційно-вимірювальна система

Технічними умовами підприємств, що ремонтують гідравлічні передачі, рекомендується проведення певного обсягу оціночних і регулювальних випробувань з метою контролю їх післяремонтного стану. Згідно

з правилами ремонту в процесі обкатки без навантаження та з навантаженням в основному контролюється рівень шуму, герметичність, температурні режими, тиск у масляних системах, розгін турбінного валу, спрацювання бло-

кувальних пристроїв, включення муфт реверсу і режимів, величина вібрації корпусу, надійність і чіткість роботи системи автоматичного управління [1].

В Україні сьогодні для виконання заводських випробувань

гідравлічних передач тепловозів використовуються типові стенди, які не цілком відповідають сучасним вимогам до випробувань. Звичайно, ці стенди по кількості контрольних параметрів і точності вимірювання (в переважній більшості застосовуються стрілочні аналогові індикатори) не відповідають сучасному рівню розвитку обчислювальної техніки. Стенд не дозволяє фіксувати динаміку процесів. Відсутність автоматичної фіксації вимірних параметрів та протоколу випробувань зменшує можливості для аналізу результатів випробувань і випробувальних стендів у цілому.

Для отримання більш повної інформації про технічний стан гідравлічної передачі під час випробувань необхідно застосовувати нові методи та засоби випробувань. Відповідно до вимог розробленої методики визначення механічних втрат у гідравлічних передачах під час стендових випробувань [6] необхідно забезпечити високу точність вимірювання частоти обертання турбінного колеса гідравлічної передачі.

Удосконалення випробувального стенду виконувалось на базі Дніпропетровського заводу з ремонту тепловозів «Промтепловоз». Для стенду, що існує наразі, автори та фахівці заводу спроектували та впровадили інформаційно-вимірну систему [1]. Структурна схема системи зображена на рис. 1, апаратна реалізація цієї системи — на рис. 2.

На випробувальному стенді у процесі модернізації інформація про частоту обертання приводного електродвигуна, генератора та турбінного валу вимірювалась за допомогою штатних тахометричних датчиків Д-2ММУ-2 [1, 2] (рис. 3), які передають попередньо оброблений аналоговий сигнал на спеціальний перетворювач, а потім на мікроконтролер фірми ATMEEL для його подальшої обробки й передачі по інтерфейсу USB 2.0 до комп'ютера.



Рис. 1. Структурна схема інформаційно-вимірної системи випробування гідравлічних передач тепловозів в умовах тепловозоремонтного заводу ДЗРТ «Промтепловоз»

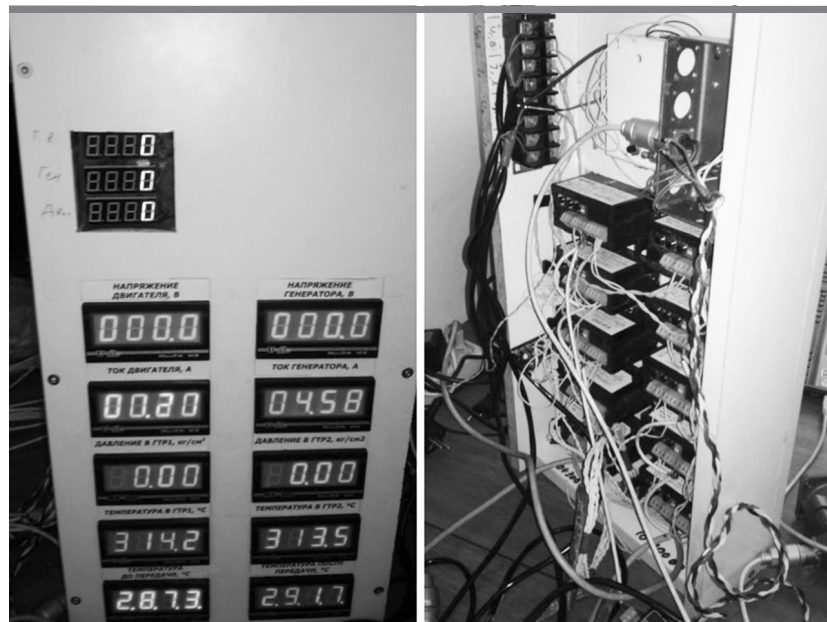


Рис. 2. Апаратна частина засобів вимірювання частоти обертання

Датчик Д-2ММУ-2 є не що іншим як генератор змінного струму, який має критичний недолік — при досить низьких оборотах (експериментально встановлено близько 80 хв-1) амплітуда напруги, вироблена генератором, недостатня для нормального безпомилкового вимірювання (при оборотах близько 60 хв-1 амплітуда становить приблизно 1 В, а при 2000 хв-1 — близько 40 В). Зрозуміло, що на низьких оборотах амплітуда буде складати близько декількох десятків мілівольт. Виміряти таку низьку напругу в умовах заводу практично



Рис. 3. Датчик Д-2ММУ-2

неможливо, так як, по-перше, в довгих лініях зв'язку від стенду до вимірювального устаткування можливо гасіння низької напруги і, по-друге, на заводі є велика кількість джерел різних електромагнітних завад, які можуть наводитися в лініях зв'язку та помилково фіксуватися як початок обертального руху на стенді.

Замість тахометричних генераторів було запропоновано використовувати інкрементальний енкодер [3, 4] ХСС 1506PS (рис. 4) з надлишковою точністю — 2500 імпульсів/оборот. Випробування показали його високу точність і надійність у діапазоні вимірювання як досить низьких обертів (від 0 до 80 хв^{-1}), так і високих (до 2000 хв^{-1}). Однак значним недоліком цього приладу є труднощі його монтажу на стенд та ціна, яка є досить високою.



Рис. 4. Інкрементальний енкодер ХСС 1506PS

Як альтернативне рішення було запропоновано створити на базі корпусу датчика Д-2ММУ-2 власний датчик оптичного типу. Таке рішення має три важливі переваги: низька ціна, можливість вимірювання низьких обертів (від 0 до 80 хв^{-1}), можливість реалізації в корпусі датчика Д-2ММУ-2 (або інших тахогенераторів серії), що не вимагає механічної модернізації стенду (яка мала місце при використанні енкодера ХСС 1506PS). Також важливим є можливість застосування для розробленого пристрою незначної модифікації програми керуючого мікроконтролера, створеної для обробки

сигналів від перетворювача датчика Д-2ММУ-2.

На початковому етапі розробки датчик складався з валу, на якому був виконаний вручну пластиковий диск із зубцями, та інфрачервоної оптичної оптопари ЕЕ-SX1041. Випробування показали, що виконані вручну зубці не дозволяють здійснювати вимірювання з високою точністю. Тому для забезпечення більшої точності було виготовлено на промисловому обладнанні лазерним методом диск на 10 зубів з акрилу. Креслення цього диска зображено на рис. 5.

Схема включення оптопари датчика дозволяє практично повністю виключити вплив часу наростання і спадання фронтів (порядку декількох мікросекунд). Тому їх вплив на роботу системи вимірювання можна опустити при теоретичному розрахунку вимірюваних величин частоти обертання.

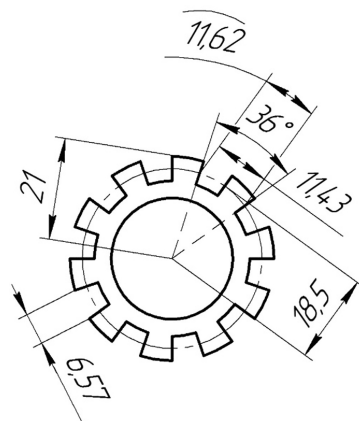


Рис. 5. Креслення диска

Насамперед потрібно враховувати, що технологія виготовлення вимірювального диска є несоконалою і неминучі відхилення

в розмірах зубців. Далі необхідно виконати розрахунок залежності інструментальної похибки (довжини дуги L , рис. 5) від частоти обертання. У першій версії алгоритму вимірювання частоти обертання, закладеної в мікроконтролер, фіксується поява наростаючого фронту кожного нового імпульсу (рис. 6) і як наслідок вимірюється час періоду сигналу.

Було виконано розрахунок впливу затримки, яку вносить алгоритм при виконанні вимірювань. Було встановлено, що виконання всіх асемблерних команд, задіяних у вимірах, становить ~ 6,75 мкс. Похибкою $\epsilon\Delta$ можна знехтувати, так як, наприклад, при частоті обертання 1500 хв^{-1} період вимірюваного сигналу становить 40 мс.

Для спрощення обчислень прийнято, що люфт вала, на якому знаходиться диск, нехтується.

Необхідно виконати такий розрахунок з припущеннями: похибка в довжині дуги L складає ± 2 мм з кроком 0,1 мм. На рис. 7 представлено графік залежності відносної похибки частоти обертання від похибки фактичного розміру зуба при виготовленні.

З графіка видно, що при відхиленні L від теоретичної розміру на ± 2 мм відносна похибка становитиме не більше 17%. Технологія виготовлення диска припускає саме такі розбіжності фактичної й теоретичної довжини L . Виходячи з отриманих даних можна стверджувати, що при використанні алгоритму вимірювань при максимально можливій частоті обертання 1500 хв^{-1} може виникнути абсолютна похибка $\sim \pm 255 \text{ хв}^{-1}$.

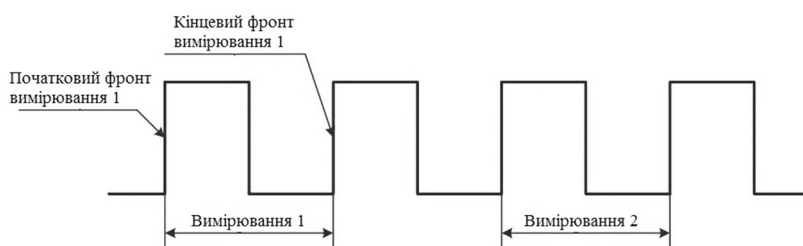


Рис. 6. Принцип обробки сигналу від датчика

Для зменшення впливу розглянутої вище похибки було вирішено модифікувати алгоритм вимірювань шляхом отримання середнього значення 10 вимірів (тобто отримувати приблизне значення частоти обертання за один оборот диска, а не за проходження дуги L).

Подальша модифікація алгоритму зводиться до наступного: при появі першого імпульсу від датчика, таймер/лічильник повинен реагувати за вхід захоплення як раніше, при появі фронту наступного імпульсу він повинен не закінчувати підрахунок часу періоду сигналу, а продовжувати рахувати до тих пір, поки не буде досягнута необхідна кількість імпульсів і лише потім зупинятися й виконувати розрахунок частоти обертання.

Зрозуміло, що оптимальна кількість імпульсів при якому отримана вибірка частоти обертання не спотворюється і не втрачає репрезентативність.

Для визначення необхідної і достатньої кількості імпульсів необхідно враховувати, що отримані дані при рівномірному обертанні не дадуть повної інформації щодо похибки вимірювання. Тому були використані дані рівномірного прискорення, отримані при реальних заводських випробуваннях при роботі алгоритму з підрахунком суми періодів десяти сигналів (хоча в таких даних і є додаткова похибка, але для наступних розрахунків вона не критична).

При аналізі експериментальних даних було розглянуто неповторний відбір даних [5] (передбачається що при рівномірному прискоренні немає однакових результатів у вибірці частот обертання, генеральна сукупність яких і буде розглянута).

Абсолютна похибка використаної генеральної сукупності (без урахування відбору вибірки n^*) дорівнює $27,94 \text{ хв}^{-1}$. Як видно з рис. 8 при цьому $n^* \approx 208$. Виходячи з цього можна стверджувати, що вибірка n^* є репрезентатив-

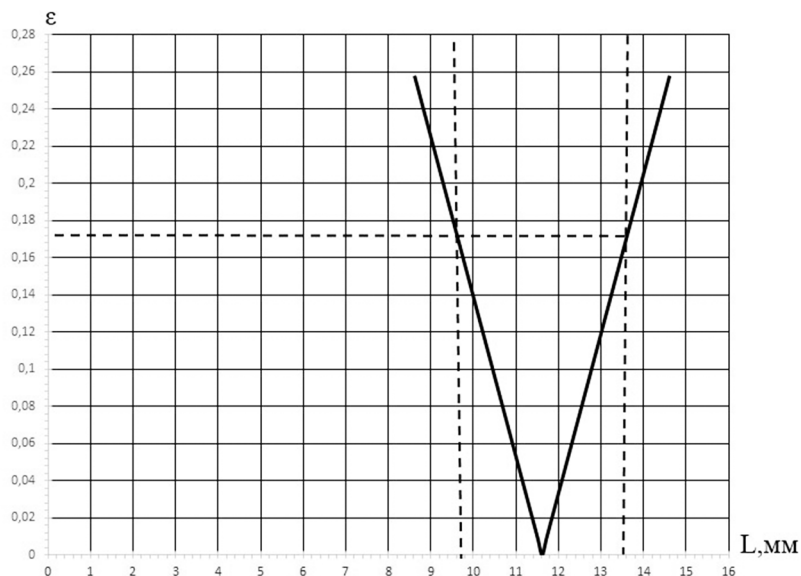


Рис. 7. Графік залежності відносної похибки частоти обертання від похибки фактичного розміру зуба при виготовленні

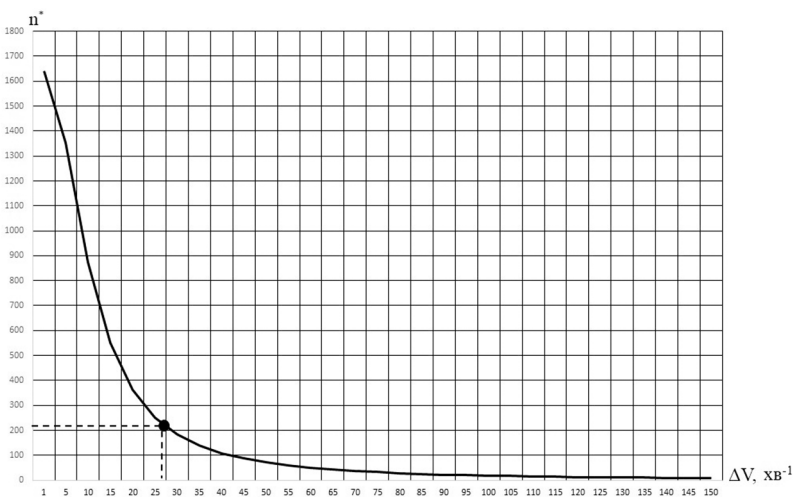


Рис. 8. Графік залежності абсолютної похибки частоти обертання від розміру вибірки n^*

ною і не спотворює генеральну сукупність n при вибірці тільки кожного 8-го відліку з n . Близькі результати були отримані при обробці інших вибірок.

Зміни інструментальної та методичної похибок, які можуть бути наслідком пропуску відліків потребує подальших досліджень.

Для удосконалення спроектованого датчика (з метою вибору оптимальної кількості зубів диска і оптимального алгоритму обчислення частоти обертання) необхідно виконати розрахунок

інструментальної та методичної похибок, що виникають при вимірах.

Очевидно, що інструментальна похибка повинна збільшуватися пропорційно до зростання кількості зубів (внаслідок похибки при їх виготовленні), а методична похибка, навпаки, зі зростанням кількості зубів повинна падати.

Графіки залежності інструментальної та методичної похибок від кількості зубів у диску при різних вхідних параметрах зображено на рис. 9 та рис. 10.



Рис. 9. Графік залежності інструментальної та методичної похибок від кількості зубів у диску при $w_{взм.} = 200 \text{ хв}^{-1}$, $a = 10 \text{ хв}^{-1} / \text{с}$, $\Delta L = 2 \text{ мм}$

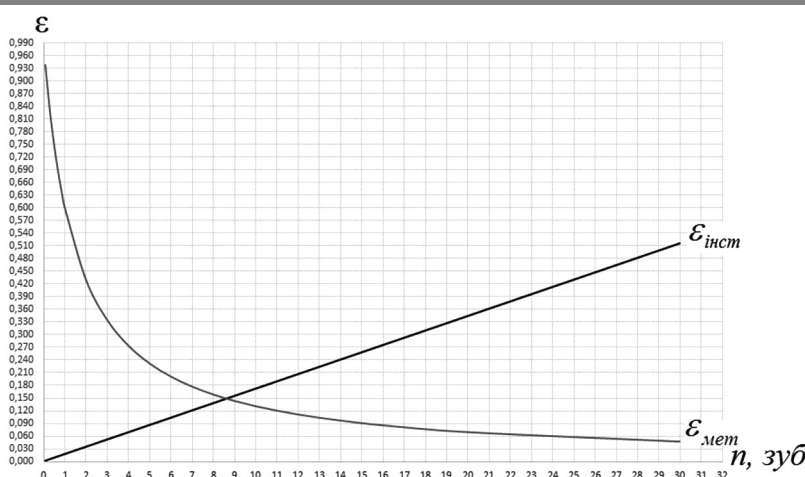


Рис. 10. Графік залежності інструментальної та методичної похибок від кількості зубів у диску при $w_{взм.} = 20 \text{ хв}^{-1}$, $a = 10 \text{ хв}^{-1} / \text{с}$, $\Delta L = 2 \text{ мм}$

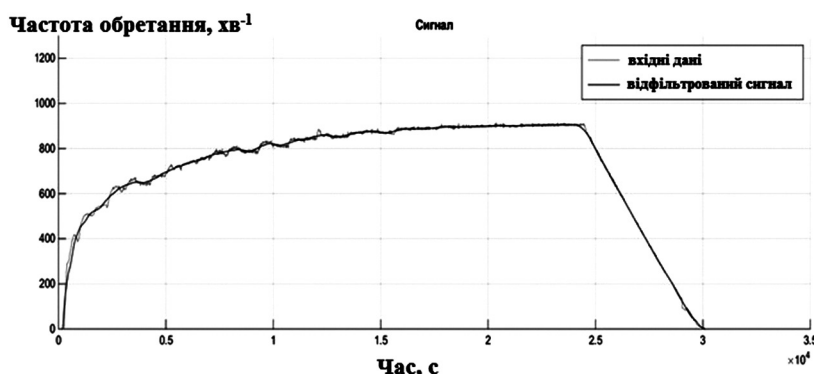


Рис. 11. Завади, отримані при випробуваннях датчика

Як видно з рис. 9, приблизно починаючи з величини частоти обертання рівній 200 хв^{-1} , цілком достатньо використовувати ко-

лесо з одним зубом (перетин методичної та інструментальної похибок — точка оптимуму). Рис. 10 показує, що при $w_{взм.} = 20 \text{ хв}^{-1}$ для

мінімізації похибки досить використовувати близько 9-ти зубів. Прискорення а було вибрано максимально можливе.

З метою спрощення алгоритму розрахунку частоти обертання, було вирішено модифікувати алгоритм розрахунку таким чином: до 50 хв^{-1} (справедливо при середньому прискоренні $a = 1,15 \text{ хв}^{-1} / \text{с}$) виконувати розрахунки як і раніше, враховуючи кожен період сигналу від датчика (для диска на 10 зубів), а починаючи з частоти обертання більшої 50 хв^{-1} , враховувати при розрахунку тривалість десяти періодів сигналу від датчика як один період вимірювання, тобто імітувати диск з одним зубом. Така умова практично не суперечить висновкам, зробленим вище, так як там було обґрунтовано достатність використання кожного 8-го відліку частоти обертання.

У процесі проведення випробувань спроектованого датчика було встановлено наявність електричних завад (рис. 11).

Як видно з рис. 11, у сигналі від датчика є завади, про що вказує спектр сигналу, отриманий за допомогою швидкого перетворення Фур'є.

У результаті досліджень помилок у програмній частині стенду не було виявлено. Однак було знайдено потенційне джерело завад в апаратній (електронній) частині стенду.

Пристрій для формування імпульсів (які надходять на вхід мікроконтролера) є не що іншим, як тригер Шміта CD40106BM виробництва Texas Instruments. Як відомо, такі тригери мають великий розкид порога як спрацьовування, так і відпускання логічної одиниці. Такий ефект зображено на рис. 12, взятий з офіційної документації.

Так як фронти у імпульсів, що надходять з датчика, досить сильно завалені (рис. 13), то при наявності розкиду фронтів спрацьовування сигнал на виході формувача (тригера Шміта CD40106BM) буде

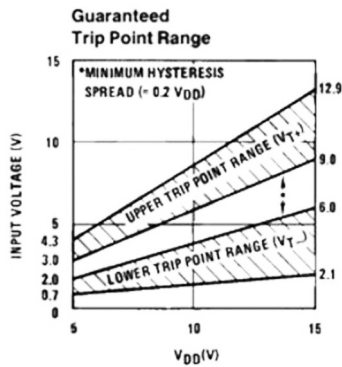


Рис. 12. Розкид порога спрацьовування і відпускання тригера Шміта CD40106BM

мати випадковий характер, що виглядає, як завади.

Аналіз наявних мікросхем одновходових тригерів Шміта показав, що вони мають схожі характеристики, як і у тригера Шміта CD40106BM. Виходом зі сформованої ситуації є використання двовходових тригерів Шміта, де завдяки використанню зворотного зв'язку можливо встановити фіксовану напругу спрацьовування. Було проведено дослідження ринку наявних мікросхем двовходових тригерів Шміта і операційних підсилювачів. У результаті чого було встановлено, що використання мікросхем двовходових тригерів Шміта не є раціональним: операційний підсилювач дозволяє більш гнучко і точно встановити напругу спрацьовування з мінімальними відхиленнями, а його собівартість не перевищує собівартість тригера Шміта. Тому було вирішено виконати власний формувач імпульсів з використанням операційного підсилювача LM124.

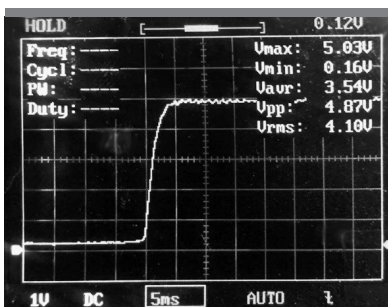


Рис. 13. Осцилограма фронту сигналу, що надходить від датчика

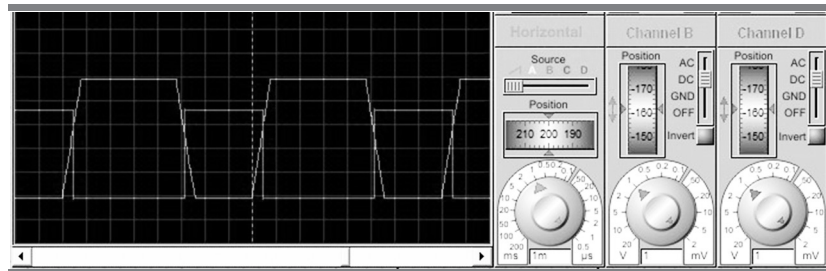


Рис. 14. Осцилограми симуляції роботи формувача

Частота обертання, хв^{-1}

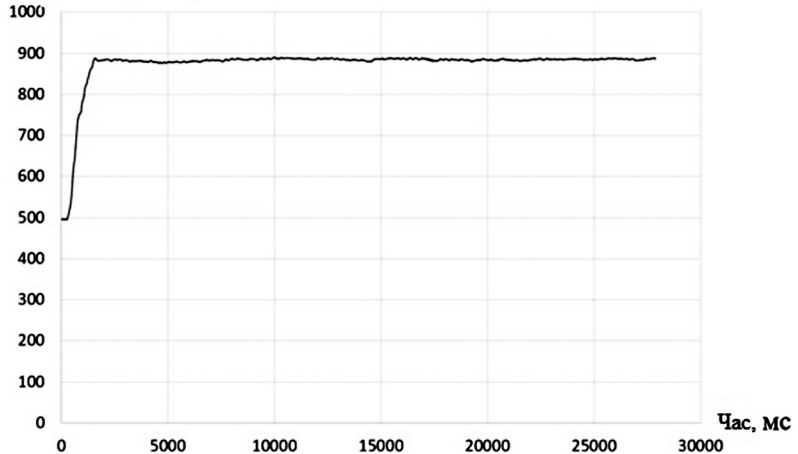


Рис. 15. Графік виконаних вимірювань частоти обертання з використанням формувача імпульсів на базі операційного підсилювача

Симуляція розробленого формувача підтвердила правильність розрахунків. Осцилограми симуляції роботи формувача показано на рис. 14.

Також було проведено реальні випробування нового формувача імпульсів. Як видно з графіка виконаних вимірювань (рис. 15) завади в отриманих результатах практично відсутні. Це дає змогу говорити про виявлення і повне усунення джерела спотворення даних у системі випробувань гідравлічної передачі, що розроблена. При цьому застосування алгоритмів цифрової фільтрації не є необхідним.

Для спроектованого датчика частоти обертання оптичного типу на основі вже наявного датчика Д-2ММУ-2 виконано аналіз залежності методичної та інструментальної похибок і на основі отриманих даних запропоновано більш раціональний варіант алгоритму розрахунку частоти обертання, а також обґрунтова-

но кількість зубів диска датчика. Досліджено природу перешкод, що виникають при зборі даних. У результаті чого встановлено основне джерело спотворень вимірювань і запропоновано спосіб удосконалення апаратної частини стенду випробувань гідравлічних передач тепловозів, який усунув це джерело.

Отже, досліджено залежність інструментальної і методичної похибок розробленого тахометричного датчика оптичного типу. На основі проведених досліджень запропоновано модифікувати алгоритм розрахунку частоти обертання таким чином: до 50 хв^{-1} (при середньому прискоренні $a = 1,15 \text{ хв}^{-1}/\text{с}^2$) виконувати розрахунки, враховуючи кожен другий період сигналу від датчика (для диска на 10 зубів), а починаючи з частоти обертання більшої 50 хв^{-1} , враховувати при розрахунку тривалість десяти періодів сигналу від датчика як один

період, тобто імітувати диск з одним зубом. Було встановлено, що використання диска на 10 зубів є раціональним. З метою усунення спотворень при вимірах був виконаний розрахунок і випробування формувача імпульсів від датчика на базі операційного підсилювача LM124 замість використовуваного тригера Шмітта CD40106BM.

Розроблений датчик значно знижує вартість модернізації стенда випробувань гідравлічних передач тепловозів, а також може застосовуватися при розробці аналогічних стендів випробувань гідравлічних передач та інших видів техніки. Розроблений датчик має більшу точність у порівнянні з Д-2ММУ-2 і значно меншу, в порівнянні з сучасними тахометричними датчиками, ціну виготовлення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Information-measuring Test System of Diesel Locomotive Hydraulic Transmissions* / I. V. Zhukovyt'skyu, I. A. Kliushnyk, O. B. Ochkasov, R. O. Korenyuk // *Наука та прогрес транспорту*. — 2015. — № 5 (59). — С. 53–65.
2. Ключник І. А. Використання інформаційних технологій для вимірювання частоти обертання на стенді випробування гідравлічних передач тепловозів / І. А. Ключник // *Інформ. технології в моделюванні : матер. всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених (24.03–25.03.2016)* / МНУ ім. В. О. Сухомлинського. — Миколаїв, 2016. — С. 82–83.
3. Безгин А. С. Применение инкрементального энкодера как датчика скорости в цифровых системах управления экскаваторного электропривода переменного тока / А. С. Безгин, Э. Л. Греков // *Науч.-техн. вестн. Поволжья*. — 2013. — № 3. — С. 72–76.
4. Improved PSO algorithm for improving the subdivision accuracy of photoelectric rotary encoder / G. Xu, W. Qiu, Y. Shouwang [et al.] // *Infrared and Laser Engineering*. — 2013. — Т. 42, № 6. — С. 320–323.
5. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник. — Москва : Машиностроение, 1985. — 232 с.
6. Використання методу вільного вибігу при визначенні механічних втрат в гідравлічних передачах при стендових випробуваннях. Боднар Б. Є., Очкасов О. Б., Коренюк Р. О. Ключник І. А. // *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 77 Междунар. науч.-практ. конф. (11.05–12.05.2017)* / Дніпро. — 2017. — С. 16–17.