

УДК 621.83.062.1

© А.І. Бондаренко, к.т.н.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ОБРОБКА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГІДРООБ'ЄМНО-МЕХАНІЧНИХ ТРАНСМІСІЙ

В статті наведено процес обробки результатів, отриманих при експериментальних дослідженнях гідрооб'ємно-механічних трансмісій, виконаних за схемами з диференціалом на вході та з диференціалом на виході, при гальмуванні. Розглянуто процес знаходження дійсних значень перепаду робочого тиску в гідрооб'ємній передачі, крутних моментів на валах трансмісії та кутових швидкостей валів. Проаналізовано результати експериментальних досліджень.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ, ГІДРООБ'ЄМНО-МЕХАНІЧНА ТРАНСМІСІЯ, ГІДРООБ'ЄМНА ПЕРЕДАЧА, ГАЛЬМУВАННЯ.

Постановка проблеми. З постійним поширенням кількості самохідних машин (СМ) з гідрооб'ємно-механічними трансмісіями (ГОМТ), підвищенням їх швидкостей руху, особливо загострилась проблема збереження безпеки в режимі гальмування. Теоретичне дослідження процесу гальмування СМ з ГОМТ різноманітного схемного виконання не допустиме без попередньої перевірки адекватності існуючих математичних моделей, які описують динаміку ГОМТ [1], зокрема і в гальмівному режимі, що не можливо без проведення експериментальних досліджень та коректної обробки отриманих результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Із літератури [2 – 5] відомо, що на кафедрі автомобіле- і тракторобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» розроблено лабораторний стенд, за допомогою якого може виконуватися комплексне експериментальне дослідження робочих процесів у ГОМТ на різноманітних режимах роботи. Стенд швидко переналаштовується як на роботу за схемою «диференціал на виході», так і схемою «диференціал на вході». Поте, опису процесу обробки отриманих кінематичних та силових параметрів ГОМТ, аналізу результатів експериментальних досліджень ГОМТ в процесі гальмування увага практично не приділяється.

Мета дослідження. Розробка методики обробки отриманих в процесі експериментальних досліджень кінематичних та силових параметрів ГОМТ, аналіз результатів експериментальних досліджень ГОМТ в процесі гальмування.

Для досягнення поставленої мети необхідно: навести методику обробки результатів, отриманих при експериментальних дослідженнях (вольтових сигналів), ГОМТ, виконаних за схемами з диференціалом на вході та з диференціалом на виході, та описати процес знаходження дійсних значень перепаду робочого тиску в гідрооб'ємній передачі (ГОП), крутних моментів на валах трансмісій та кутових швидкостей валів; проаналізувати результати експериментальних досліджень ГОМТ в процесі гальмування; сформулювати висновки.

Результати дослідження. Основна мета випробувань полягає у визначенні впливу законів зміни параметра регулювання гідронасосу ГОП $e_1(t)$ та законів зміни гальмівного моменту $M_g(t)$ на основні параметри ГОМТ різних структур (розглядалися дві схеми: одна з диференціалом на вході, друга – з диференціалом на виході) при реалізації процесу гальмування, а також перевірі адекватності математичної моделі ГОМТ (підходу до складання моделей [1]).

Завдання випробувань полягають у визначенні кутових швидкостей валів гідромотора ω_{e2*} , асинхронного електродвигуна ω_0 (виходячи зі значення ω_0 встановлюється і кутова швидкість вала гідронасоса ω_{e1*}), порошкового навантажувального електромагнітного гальма (порошкового гальмівного механізму) ω_g ; тиску в нагнітаючій магістралі ГОП P , тиску усмоктування P_p , рівного за значенням тиску, що створюється насосом підпитки (у всіх розрахунках фігурує значення перепаду робочого тиску в ГОП – $\Delta P = P - P_p$, так як саме ΔP визначається в процесі теоретичних досліджень); крутного моменту на валу асинхронного електродвигуна M_0 та на валу порошкового гальмівного механізму M_g при здійсненні гальмування вала порошкового гальмівного механізму лише за рахунок зміни параметра регулювання гідронасосу e_1 , а також гальмування одночасно за рахунок зміни гальмівного моменту M_g та параметра регулювання гідронасосу e_1 при збереженні в усіх випадках кінематичного зв'язку з електродвигуном.

Випробування виконуються на стендах у два етапи:

– на першому етапі збирається схема ГОМТ з диференціалом на виході та виконується гальмування вала порошкового гальмівного механізму спочатку лише за рахунок зміни параметра регулювання гідронасосу e_1 (при різних законах $e_1(t)$), а потім одночасно за рахунок зміни гальмівного моменту M_g та параметра регулювання гідронасосу e_1 (при різних законах $M_g(t)$ та $e_1(t)$) зі збереженням в усіх випадках кінематичного зв'язку з електродвигуном;

– на другому етапі відбувається перенаштування стенду з метою отримання схеми ГОМТ з диференціалом на виході і вже для нової схеми реалізуються ті ж самі варіанти гальмування, що і для схеми ГОМТ з диференціалом на виході.

Кожен вимір проводиться 3 рази. Фіксація даних припинялася в момент повної зупинки валу порошкового гальмівного механізму.

Для коректної обробки вольтових сигналів, що надходять з приборів для виміру крутного моменту, необхідно визначити тарувальну характеристику для мостових схем кожного досліджуваного валу (вал № 1 – короткий вал, вал № 2 – довгий (рис. 1) [4]):

– вал № 1 з'єднується з асинхронним електродвигуном через допоміжний редуктор в стенді з ГОМТ з диференціалом на виході, а в стенді з ГОМТ з диференціалом на вході – з порошковим гальмівним механізмом;

– вал № 2 з'єднується з порошковим гальмівним механізмом у стенді з ГОМТ з диференціалом на виході, а в стенді з ГОМТ з диференціалом на вході – з асинхронним електродвигуном через допоміжний редуктор.

Стенд для тарування мостових схем валів наведено на рис. 2. Даний стенд забезпечує жорстку фіксацію одного з кінців валу та штучне навантаження другого кінця. Важіль, який з одного боку з'єднаний з валом, а з іншого сприймає навантаження від гирь, має довжину 0,5 м. Для кожного значення навантаження, а з урахуванням довжини важеля, – для кожного значення штучно утвореного крутного моменту на валу, за допомогою прибору для виміру крутного моменту [2], аналого-цифрового перетворювача та ноутбука визначається відповідне значення напруги (рис. 3 – 4) та будується тарувальна характеристика. Отримані тарувальні характеристики наведені на рис. 5 – 6.

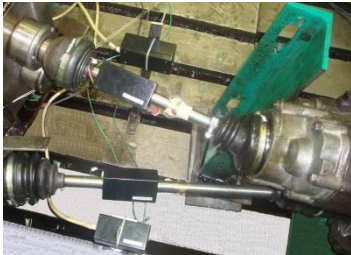


Рис. 1 – Схема розміщення приборів для виміру крутного



Рис. 2 – Стенд для тарування мостових схем валів

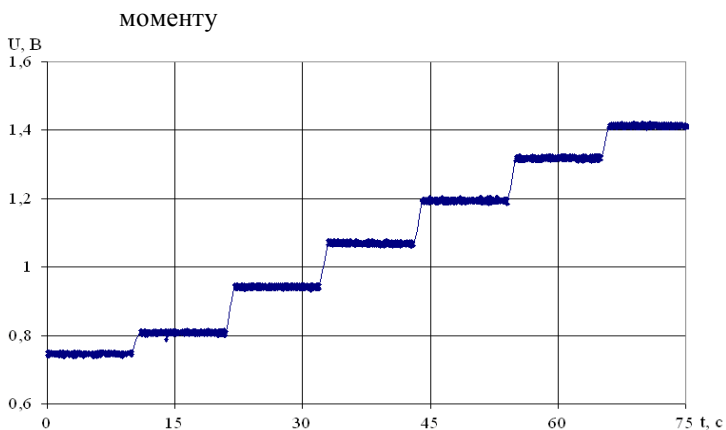


Рис. 3 – Зміна вихідного сигналу з мостової схеми валу № 1 U протягом часу t в залежності від прикладеного навантаження на важіль (початкова маса вантажу 0 кг, крок 2,5 кг, максимальна – 15 кг)

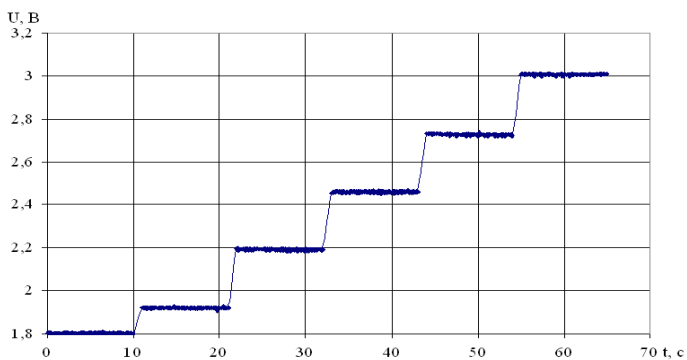


Рис. 4 – Зміна вихідного сигналу з мостової схеми валу № 2 U протягом часу t в залежності від прикладеного навантаження на важіль (початкова маса вантажу 2,5 кг, крок 2,5 кг, максимальна – 15 кг)

Як видно з рис. 5 – 6, лінії тренду практично повністю співпадають з результатами, що отримані в процесі експериментальних досліджень, максимальна похибка не перевищує 5,1% [6]. Тому рівняння, які описують залежність U від M_1 та M_2 (лінію тренду) і будуть використовуватися при обробці вольтових сигналів.

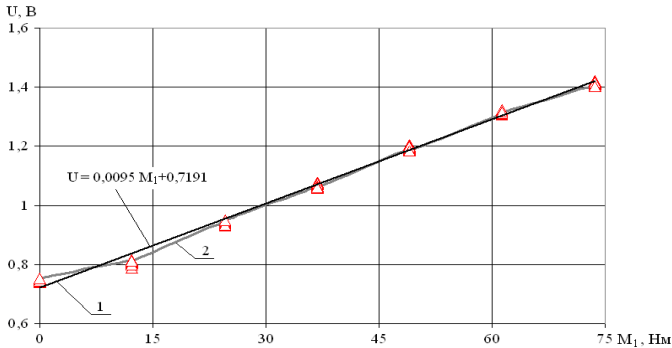


Рис. 5 – Тарувальна характеристика мостової схеми валу № 1 (залежність вихідного сигналу U від крутного моменту M_1): 1 – лінія тренда; 2 – залежність, що отримана в процесі досліджень

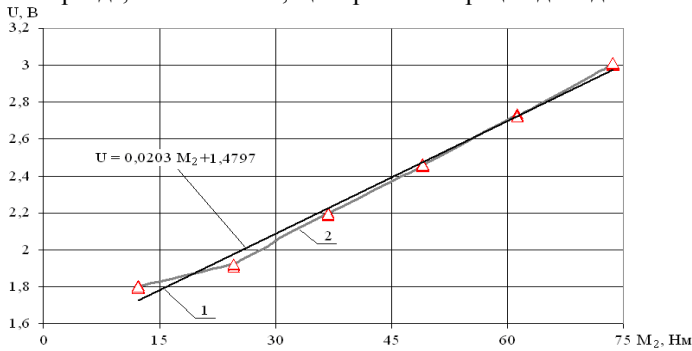


Рис. 6 – Тарувальна характеристика мостової схеми валу № 2 (залежність вихідного сигналу U від крутного моменту M_2): 1 – лінія тренда; 2 – залежність, що отримана в процесі досліджень

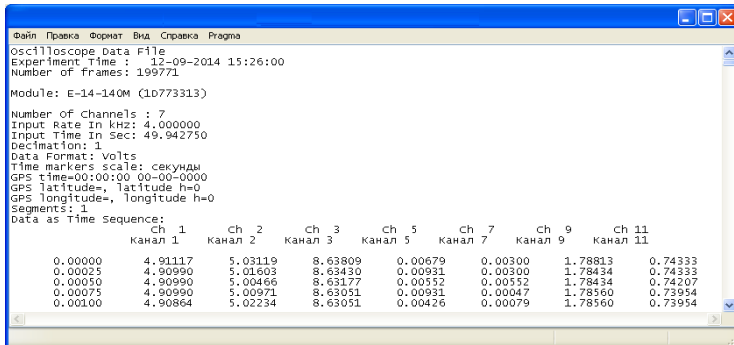
Основним етапом обробки надлишкового тиску та крутного моменту, а точніше вольтових сигналів, що отримані в результаті експериментальних досліджень, є вибір методу фільтрації [7 – 9].

Фільтром називають частотно-вибірчий пристрій, який пропускає сигнали певних частот і затримує або ослаблює сигнали інших частот. За виглядом амплітудно-частотних характеристик вони підрозділяються на фільтри нижніх частот, верхніх частот, смугові, режекторні та фазові. На практиці широко застосовуються методи фільтрації Чебишева, Баттерворта, Бесселя і критичного загасання [7]. У роботі [8] рекомендується наступний протокол фільтрації для всіх каналів (за винятком кута повороту рульового колеса і кутової швидкості рульового колеса) – використання фільтрів нижніх частот

Баттерворта. Для автоматизації обробки одержуваних даних зручно використовувати вільно розповсюджене програмне забезпечення «Фільтр Баттерворта» [9].

Розглянемо більш детально процес обробки експериментальних даних із датчиків надлишкового тиску та приборів для виміру крутного моменту – знаходження тиску в нагнітаючій магістралі ГОП P , тиску, що створюється насосом підпитки P_p , крутного моменту на валу асинхронного електродвигуна M_0 та на валу порошкового гальмівного механізму M_g .

У процесі досліджень на комп'ютері відбувається візуальна фіксація, а потім збереження результатів у вигляді текстових файлів зі значеннями вольтових сигналів. Текстовий файл представляє собою набір стовбців з даними, де кожен стовбець відповідає певному каналу, пов'язаному з датчиком стенду. Перший стовбець відображає час в секундах, наступні – результати дослідження. Скільки стовбців у файлі, перший стовбець не враховується, стільки параметрів і вимірювалось в процесі дослідження (при роботі зі стендом з диференціалом на виході вимірювали 7 параметрів, задіяно, відповідно, 7 каналів (рис. 7), при роботі зі стендом з диференціалом на вході вимірювали 6 параметрів, задіяно 6 каналів).



```

Oscilloscope Data File
Experiment Time : 12-09-2014 15:26:00
Number of Frames: 199771

Module: E-14-140M (10773313)

Number of Channels : 7
Input Rate In KHz: 4.000000
Input Time In Sec: 49.942750
Decimation: 1
Data Format: volts
Time markers scale: секунды
GPS time=00:00:00 00-00-0000
GPS latitude=, latitude h=0
GPS longitude=, longitude h=0
Segments: 1
Data as Time Sequence:

```

	Ch 1 Канал 1	Ch 2 Канал 2	Ch 3 Канал 3	Ch 5 Канал 5	Ch 7 Канал 7	Ch 9 Канал 9	Ch 11 Канал 11
0.00000	4.91117	5.03119	8.63809	0.00679	0.00300	1.78813	0.74333
0.00025	4.90990	5.01603	8.63430	0.00931	0.00300	1.78434	0.74333
0.00050	4.90990	5.00466	8.63177	0.00932	0.00312	1.78434	0.74207
0.00075	4.90990	5.00971	8.63051	0.00931	0.00047	1.78560	0.73954
0.00100	4.90864	5.02234	8.63051	0.00426	0.00079	1.78560	0.73954

Рис. 7 – Візуалізація фіксації та збереження результатів експериментальних досліджень ГОМТ з диференціалом на виході

На рис. 7 канал № 1 пов'язаний з індуктивним датчиком частоти обертання валу порошкового гальмівного механізму; канал № 2 – з індуктивним датчиком частоти обертання валу асинхронного електродвигуна; канал № 3 – з індуктивним датчиком частоти обертання валу гідромотора; канал № 5 – з датчиком надлишкового тиску в нагнітаючій магістралі ГОП; канал № 7 – з датчиком надлишкового

тиску, що створюється насосом підпитки; канал № 9 – з прибором для виміру крутного моменту на валу порошкового гальмівного механізму; канал № 11 – з прибором для виміру крутного моменту на валу асинхронного електродвигуна.

У зв'язку з тим, що робота з даними в текстовому файлі з форматом розширення «*.txt» не можлива, всі дані перезберігались в файл з розширенням «CSV (MS-DOS) (*.csv)». Особливість перезберігання полягає в тому, що в утвореному файлі повинно залишитися лише два стовбця: перший – «час», другий – параметр, що підлягає фільтрації. Все це необхідно для подальшої роботи з програмним забезпеченням «Фільтр Баттерворта» [9].

Наступним кроком є відкриття за допомогою програмного забезпечення «Фільтр Баттерворта» файлів, створених в форматі «CSV (MS-DOS) (*.csv)».

На рис. 8 наведений зовнішній вигляд діалогових вікон програмного забезпечення «Фільтр Баттерворта» при обробці даних, а на рис. 9 – 10 початкові значення та результати фільтрації вольтових сигналів (лише фрагменти для прикладу, так як одній секунді досліджень відповідає 4000 значень параметру), що відображають зміну тиску в нагнітаючій магістралі ГОП та моменту на валу порошкового гальмівного механізму (стенд з ГОМТ з диференціалом на виході). Слід звернути увагу, що в настройках параметрів фільтрації необхідно обрати такі значення частоти та порядку (рис. 8, б) при яких відфільтровані значення максимально б згладжували початкові при збереженні загального виду зміни параметра, проте трапляються випадки, коли фільтрація взагалі не потрібна (рис. 10), але це бува в край рідко.

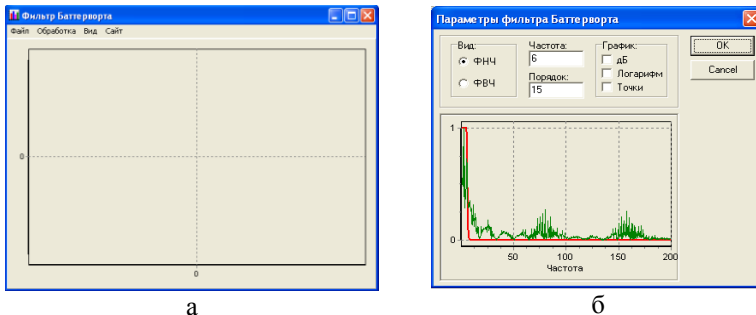


Рис. 8 – Зовнішній вигляд діалогових вікон програмного забезпечення «Фільтр Баттерворта»: а – діалогове вікно для імпорту вихідних даних; б – настройка параметрів фільтра

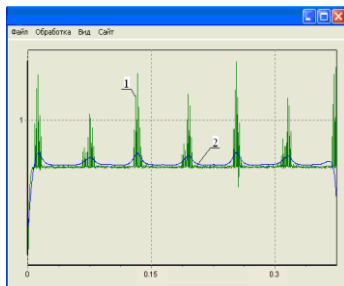


Рис. 9 – Результати фільтрації вольтових сигналів, що відображають зміну тиску в нагнітаючій магістралі ГОП:
1 – початкові значення;
2 – відфільтровані значення

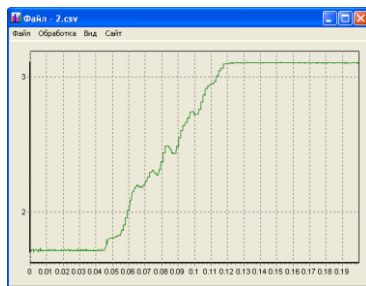


Рис. 10 – Результати експериментальних досліджень, потреба в фільтрації яких повністю відсутня (початкові значення вольтових сигналів, що відображають зміну моменту на валу порошкового гальмівного механізму)

Наступним і останнім кроком обробки експериментальних даних є збереження результатів, коректування, у разі потреби, початкового та кінцевого значення, часу дослідження (рис. 11) і, використовуючі тарувальні характеристики, знаходження реальних значень тиску та моментів (рис. 12 – 13).

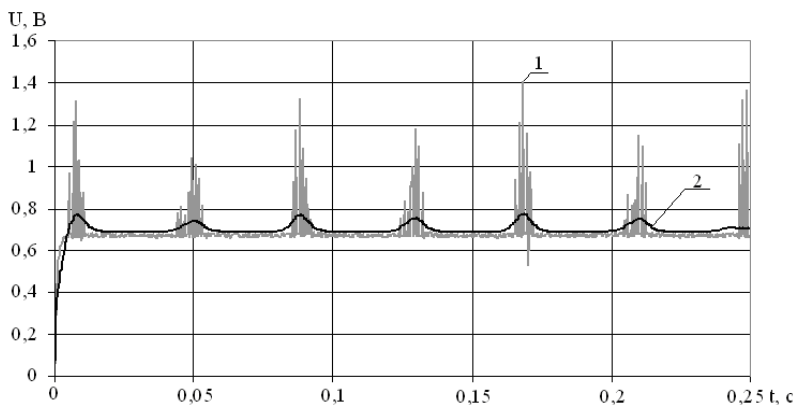


Рис. 11 – Скоректовані результати фільтрації вольтових сигналів, що відображають зміну тиску в нагнітаючій магістралі ГОП: 1 – початкові значення; 2 – відфільтровані значення

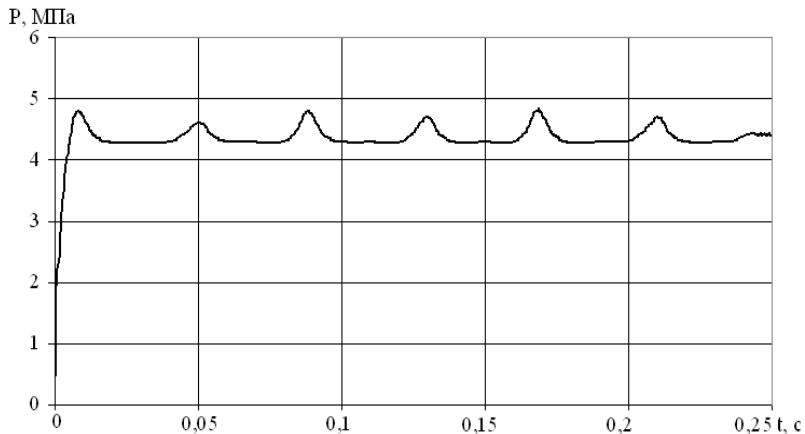


Рис. 12 – Зміна тиску в нагнітаючій магістралі ГОП (оброблені результати)

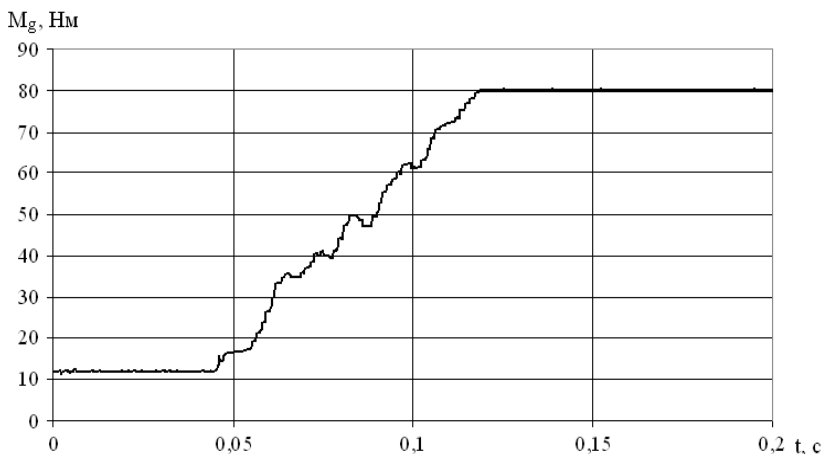


Рис. 13 – Зміна моменту на валу порошкового гальмівного механізму (оброблені результати)

Вищенаведений алгоритм універсальний для визначення тиску в нагнітаючій магістралі ГОП P , тиску, що створюється насосом підпитки P_p , крутного моменту на валу асинхронного електродвигуна M_0 та на валу порошкового гальмівного механізму M_g .

Більш складніше відбувається процес обробки результатів з індуктивних датчиків частоти обертання. Отримана вольтова характеристика розбивається на ділянки довжиною 0,1 секунди, в

межах кожної ділянки вводиться припущення, що кутова швидкість постійна та протягом часу не змінюється, виходячи з цього визначається значення кутової швидкості на даній ділянці з виразу:

$$\omega = 20 \cdot \pi \cdot \frac{T_s}{z}, \quad (1)$$

де T_s – кількість періодів сигналу в межах обраної ділянки;

z – число зубців зубчастого вінця датчика частоти обертання.

Визначивши значення кутових швидкостей, отримуємо ступінчасту характеристику зміни кутової швидкості від часу. З метою усунення цієї ступінчастості, пропонується отримане значення кутової швидкості привласнювати не всьому діапазону часу, довжина якого 0,1 секунди, а точці, яка знаходиться в середині часового діапазону ділянки, тобто значення першої отриманої кутової швидкості буде відповідати часу 0,05 секунди, другої – 0,15 секунди, третьої 0,25 секунди і т.д.

За даною методикою визначаються кутові швидкості валів гідромотора ω_{e2*} , асинхронного електродвигуна ω_0 , порошкового гальмівного механізму ω_g . На рис. 14 – 15 розглянуто, як приклад, знаходження кутової швидкості вала порошкового гальмівного механізму ω_g .

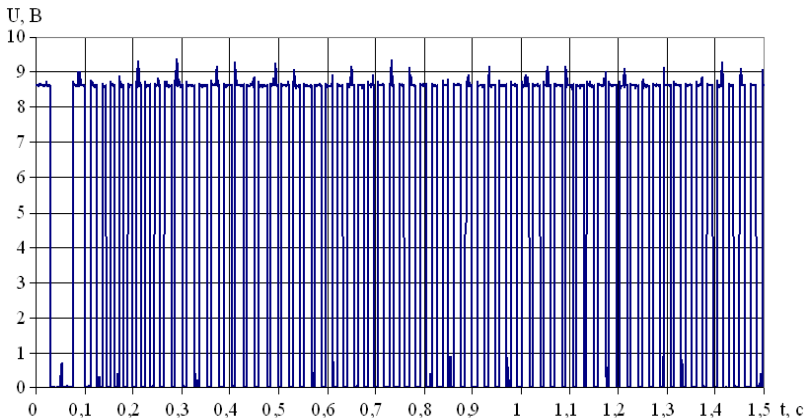


Рис. 14 – Вихідний сигнал з індуктивного датчика частоти обертання вала порошкового гальмівного механізму

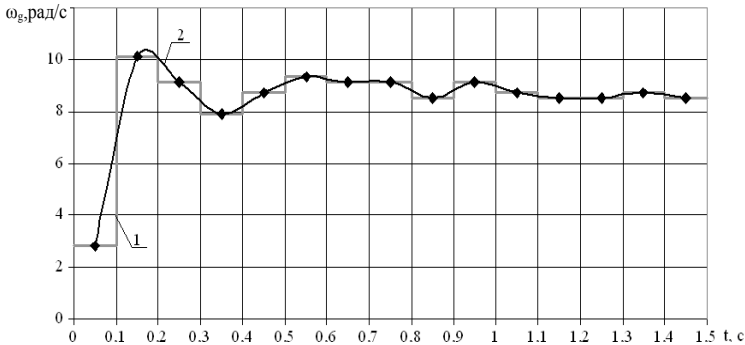


Рис. 15 – Кутова швидкість валу порошкового гальмівного механізму:
 1 – ступінчаста зміна кутової швидкості; 2 – плавна зміна кутової швидкості

З метою збереження працездатності стелів, максимальний гальмівний момент в процесі дослідження задавався $M_g=40$ Нм. Збільшення гальмівного моменту M_g призводить до зменшення часу від початку гальмування до повної зупинки валу порошкового гальмівного механізму та суттєвого підвищення перепаду робочого тиску в ГОП ΔP .

Основні результати експериментальних досліджень наведені у висновку.

Висновки.

1. Наведена методика обробки результатів, отриманих при експериментальних дослідженнях ГОМТ дозволяє визначити дійсні значення перепаду робочого тиску в ГОП, крутних моментів на валах трансмісій та кутових швидкостей валів.

2. У результаті експериментального дослідження було встановлено, що чим нижче інтенсивність зміни параметра регулювання гідронасосу та повільніше наростання гальмівного моменту, тим менше перепад робочого тиску в ГОП, на інші параметри розглянутих ГОМТ закони $e_1(t)$ та $M_g(t)$ в процесі гальмування суттєво не впливали.

3. Збільшення гальмівного моменту призводить до зменшення часу від початку гальмування до повної зупинки валу порошкового гальмівного механізму та суттєвого підвищення перепаду робочого тиску в ГОП.

Література

1. Бондаренко А.І. Просторова математична модель процесу гальмування колісного трактора FENDT 926 VARIO / А.І. Бондаренко

// Східно-Європейський журнал передових технологій. Серія: Математика та кібернетика – фундаментальні та прикладні аспекти. – 2011. – № 5/4 (53). – С. 47 – 51.

2. Митцель Н.А. Датчик крутящего момента / Н.А. Митцель // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2014. – № 48 (1090). – С. 3 – 9.

3. Кожушко А.П. Порівняльний аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень робочих процесів у безступінчастих гідروоб'ємно-механічних трансмісіях // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні засади сталого розвитку національного господарства», 21 – 22 листопада 2014 р., м. Кам'янець-Подільський / Міністерство аграрної політики та продовольства України, Подільський державний аграрно-технічний університет. – Кам'янець-Подільський: Подільський державний аграрно-технічний університет, 2014. – С. 181 – 184.

4. Самородов В.Б. Експериментальне дослідження робочих процесів у гідрооб'ємно-механічних трансмісіях з диференціалом на вході та з диференціалом на виході / В.Б. Самородов, **А.І. Бондаренко** // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – 2014. – № 39. – С. 60 – 67.

5. Samorodov V.B. Experimental Appropriateness Verification of K. Gorodetsky's Mathematical Model for Losses Determination in Hydrostatic Transmissions for Modern Hydraulic Machines / V.B. Samorodov, S.A. Shuba, O.I. Derkach, V.M. Shevtzov, N.A. Mittsel // *Eastern European Scientific Journal: Düsseldorf (Germany): Auris Verlag.* – 2014. – № 6. – P. 285 – 291.

6. Кассандро́ва О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений: учебн. для студ. высш. учебн. зав. / О.Н. Кассандро́ва, В.В. Лебедев. – М.: Наука, 1970. – 104 с.

7. Клец Д.М. Метод повышения точности обработки данных, полученных в ходе испытаний мобильных машин, с помощью фильтра Баттерворта / Д.М. Клец // Вісник НТУ «ХП». Серія: Транспортне машинобудування. – 2012. – № 60 (966). – С. 98 – 104.

8. Клец Д.М. Применение алгоритма адаптивной фильтрации при динамических испытаниях колесных машин / Д.М. Клец // Вибрації в техніці та технологіях. – 2012. – № 3 (67). – С. 38 – 42.

9. Канунников Г. Фильтр Баттерворта [Электронный ресурс] / Г. Канунников – Режим доступа: <http://motosnz.narod.ru/bdpcf.htm>.

Рецензенти: д.т.н., проф. Є.М. Гецович; д.т.н., проф. Д.О. Волонцевич