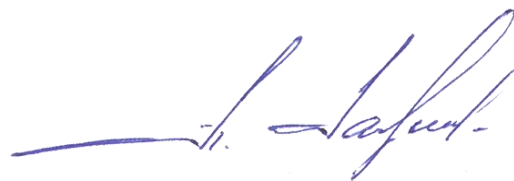


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ГАВРИЛЕНКО Олексій Миколайович

УДК 621.225

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ СИНХРОНІЗАЦІЇ РУХУ ГІДРАВЛІЧНИХ
ДВИГУНІВ**

Спеціальність 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент
Кулініч Сергій Павлович,
Сумський державний університет,
доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Андренко Павло Миколайович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний Інститут»
професор кафедри деталей машин та мехатронних
систем»;

кандидат технічних наук,
Руденко Андрій Анатолійович,
ПАТ «ВНДІАЕН»,
перший заступник генерального директора
– технічний директор.

Захист дисертації відбудеться «19» грудня 2019 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 при Сумському державному університеті (40007, Україна, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету (40007, Україна, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2).

Автореферат розіслано «18» листопада 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Є.М.Савченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Рух механізмів широкого спектру машин в машинобудуванні, будівельній галузі, хімічній промисловості здійснюється за допомогою декількох робочих органів, що приводяться в дію багатодвигунними приводами. Синхронізація роботи декількох робочих органів для забезпечення точного переміщення одного робочого елемента (застосування багатодвигунних гідравлічних агрегатів) є актуальною проблемою в багатьох галузях промисловості: обладнання для пресування і кування, підйомно-транспортні пристрої, пристрої для створення вібрації, землерийні машини тощо. Ефективність використання сучасного технологічного обладнання, яке представляє собою складні автоматизовані комплекси з великою кількістю виконавчих органів, в значній мірі залежить від можливості прогнозування характеристик силових приводів, які в ньому застосовуються. У переважній більшості сучасних технологічних машин для приводу робочих органів застосовуються гідравлічні двигуни, які розвивають значні зусилля при малих габаритах і масі. Для деяких технологічних процесів необхідно забезпечити синхронізацію рухів кількох робочих органів.

Суворе узгодження в часі переміщення, швидкості або прискорення робочого органу (синхронізація роботи декількох робочих органів для забезпечення точного переміщення одного робочого елемента) є основним завданням, яке повинно бути вирішено на етапі проектування механізму в залежності від умов руху ланок.

Перспективним напрямом синхронізації є використання гідравлічних двигунів, що забезпечують узгодження вихідних характеристик виконавчих механізмів зі сталим та змінним навантаженням на їх вході.

В процесі роботи гідравлічного приводу з синхронізованими двигунами виникають додаткові проблеми, пов'язані з нестационарними режимами. Такі нестационарні режими роботи обумовлені: включенням (або виключенням) гідравлічних двигунів групового приводу, в результаті чого тиск на вході в дільник потоку різко змінюється; раптовою зміною навантаження на одному з гідравлічних двигунів.

З огляду на важливість створення високоточного технологічного обладнання, дослідження, спрямовані на підвищення точності синхронізації швидкості руху гідравлічних двигунів в нестационарних режимах, є своєчасними і визначають актуальність цієї роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки "Енергетика та енергоефективність" на період до 2020 року відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та пріоритетним напрямком наукової роботи Сумського державного університету «Дослідження робочих процесів насосів і приводів». (номер державної реєстрації 0114U000069).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є теоретичне і експериментальне обґрунтування підвищення точності синхронізації швидкості руху гідравлічних двигунів в нестационарних режимах.

Для реалізації поставленої мети необхідним є вирішення наступних задач:

- розробка математичної моделі робочого процесу гідравлічних агрегатів з синхронізацією руху гідравлічних двигунів для визначення характеристик гідравлічного агрегату в перехідних режимах роботи;

- обґрунтування підвищення точності синхронізації швидкості руху вихідних ланок гідравлічних двигунів шляхом введення додаткового зворотного зв'язку по перепаду тиску в міждросельних камерах дільника потоку;

- встановлення основних залежностей та основних параметрів гідравлічного регульованого дроселя;

- уточнення математичної моделі робочого процесу гідравлічних агрегатів з синхронізацією руху гідравлічних двигунів дільником потоку, з додатковим зворотнім зв'язком по перепаду тиску в міждросельних камерах і визначення характеристики гідравлічних агрегатів в перехідних режимах роботи;

- проведення експериментальних досліджень гідравлічних агрегатів з дільником потоку з додатковим зворотнім зв'язком по перепаду тиску в міждросельних камерах з метою підтвердження запропонованої концепції підвищення точності синхронізації швидкості руху вихідних ланок гідравлічних двигунів і адекватності розробленої математичної моделі робочого процесу;

- розробка методики проектування і рекомендацій щодо застосування запропонованої концепції на практиці та дослідно-промислове впровадження розробленої на підставі результатів дослідження автоматизованої системи синхронізації швидкості руху гідравлічних двигунів.

Об'єктом дослідження є гідродинамічні процеси в об'ємному гідравлічному агрегаті з синхронізацією руху гідравлічних двигунів.

Предмет дослідження – характеристики гідродинамічних процесів об'ємних гідравлічних двигунів з синхронізацією руху у складі гідравлічного агрегату.

Методи дослідження. Математичне моделювання здійснювалося на базі класичних рівнянь механіки рідини та гідродинаміки. Фізичний експеримент проведено із застосуванням математичного апарату планування експерименту та математичної статистики. Експериментальні дослідження проводилися з використанням стандартної контрольно-вимірювальної апаратури. Побудову теоретичних залежностей виконано диференціальними методами математичного аналізу та інтегрального обчислення.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі аналізу теоретичних та експериментальних даних одержано такі наукові результати:

- вперше запропонована концепція підвищення точності синхронізації швидкості руху гідравлічних двигунів застосуванням дільника потоку з додатковим зворотнім зв'язком по перепаду тиску в міждросельних камерах;

- уточнена фізична і розроблена нова математична модель робочого процесу гідроагрегату з синхронізацією швидкості руху гідравлічних двигунів з застосуванням дільника потоку з додатковим зворотнім зв'язком по перепаду тиску в міждросельних камерах, з урахуванням нелінійної сили тертя, нестационарних гідромеханічних процесів, стисливості і двофазності рідини, змінного навантаження вихідної ланки гідравлічного двигуна;

- виявлено особливості та закономірності робочих процесів, які відбуваються

в гідроапараті і підвищують точність математичної моделі, а саме: вплив на характеристики руху вихідної ланки гідравлічного двигуна змінного навантаження;

– вперше теоретичними і експериментальними дослідженнями доведена можливість підвищення точності синхронізації швидкості руху гідравлічних двигунів в гідравлічному апараті в перехідних режимах роботи за рахунок застосування додаткового зворотного зв'язку по перепаду тиску в міжросельних камерах дільника потоку.

Практичне значення одержаних результатів. На базі аналізу створеної фізичної та математичної моделей і проведених експериментальних досліджень визначені параметри дільника потоку з додатковим зворотнім зв'язком по перепаду тиску в міжросельних камерах, при яких можливо забезпечити підвищення точності синхронізації швидкості руху гідравлічних двигунів в гідравлічному апараті в перехідних режимах роботи;

розроблена методика розрахунку робочого процесу синхронізації гідравлічного двигуна в гідравлічному агрегаті, яка захищена авторським свідоцтвом.;

розроблені рекомендації з можливості застосування в промисловості запропонованої концепції забезпечення підвищення точності синхронізації швидкості руху гідравлічних двигунів в перехідних режимах роботи;

запропоновані заходи щодо вдосконалення технологічної установки виробництва гранульованих продуктів, зокрема, стадії транспортування сипучих матеріалів між ділянками технологічної лінії;

наукові результати і практичні рекомендації використані та впроваджені у виробництво під час розроблення обладнання із застосуванням гідравлічних приводів для конвеєрів переміщення сипких матеріалів в рамках виконання госпдоговірних науково-дослідних робіт за темами «Створення гідравлічного приводу з синхронним переміщенням робочих органів для установки транспортування сипких матеріалів» (замовник - ТОВ «Харбор Протект») і «Створення гідравлічного приводу з синхронним переміщенням робочих органів для установки одержання аміачної селітри із застосуванням вихрового гранулятора (замовник - ТОВ «СЕНСІ»), наукового гранту від Cultural and Educational Grant Agency of the Slovak Republic (KEGA), номер KEGA 002TnUAD-4/2019 та в рамках державного фінансування проекту «Малогабаритні енергозберігаючі модулі із застосуванням багатофункціональних апаратів з інтенсивною гідродинамікою для виробництва, модифікації та капсулювання гранул» (номер державної реєстрації 0119U100834).

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає у: проведенні математичного моделювання з метою визначення показників робочого режиму синхронізації руху робочих органів багатодвигунних гідравлічних агрегатів; аналізі класичних рівнянь і положень гідрогазодинаміки з подальшою адаптацією їх для одержання розрахункових залежностей; підборі та вдосконаленні методик проведення експерименту; розробленні та конструюванні натурального стенда для проведення експерименту; аналізі результатів та розробленні інженерної методики розрахунку багатодвигунних гідравлічних агрегатів із синхронізацією руху робочих органів. Поставлення завдання та формулювання висновків проводилися під керівництвом наукового керівника кандидата технічних наук, доцента Кулініча С.П. Здобувач

брав участь на всіх стадіях науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт із виготовлення й авторського нагляду, а також упродовж експлуатації експериментального та дослідно-промислового зразків гідроприводів з синхронізацією руху робочих органів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету СумДУ «Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати» (м. Суми, 2005, 2007 рр.), XII міжнародній науково-технічній конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці". (м. Луганськ, 2007 р), XI міжнародній науково-технічній конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці". (м. Київ, 2008 р), XVI Міжнародній науково-технічній конференції АС ППІ - «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Суми, 2015 р.), III Міжнародної науково-практичної конференції ІФНУНГ «Прикладні науково-технічні дослідження (м. Івано-Франківськ, 2019 р), IX Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2019 р.), II International conference on design, simulation, manufacturing the innovation exchange (м.Луцьк, 2019 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковані 16 наукових праць, зокрема: 3 статті у фахових виданнях, з затвердженого переліку МОН України, 2 статті у журналах, що індексуються базою даних Scopus, 3 статті у закордонних виданнях, 7 тез доповідей на науково-технічних конференціях, 1 авторське свідоцтво на науковий твір.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 145 сторінок. Дисертаційна робота містить 58 рисунків, 5 з яких – на окремих аркушах, 6 таблиць по тексту, 4 додатки на 8 сторінках, список використаних літературних джерел із 101 найменувань на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми досліджень, зв'язок із науковими програмами, сформульовані мета і завдання досліджень, їх наукова новизна та практичне значення, наведено основні дані щодо апробації роботи, публікацій, подано загальну характеристику роботи.

У **першому розділі** на основі огляду літературних джерел проаналізовано сучасний стан та перспективи розвитку напряму забезпечення синхронного руху гідравлічних двигунів в сталих та перехідних режимах роботи. Проведено аналіз робочого процесу гідравлічного приводу для синхронізації швидкості руху двигунів та розглянуто основні конструктивні рішення для забезпечення синхронізації руху гідравлічних двигунів.

На базі літературного огляду виділено наступні аспекти, які не розглянуті в роботах попередніх авторів:

– питання аналізу точності синхронізації руху гідравлічних циліндрів в перехідних режимах залишилися не вирішеними;

– не виконано аналіз впливу раптової зміни навантаження на гідравлічних двигунах на точність синхронізації швидкості руху гідравлічних двигунів;

– не було розглянуто вплив параметрів гідравлічного діляника потоку на точність синхронізації руху в перехідних режимах та час стабілізації швидкості руху двигунів при раптовій зміні навантаження;

– є підстави вважати, що відсутність аналізу точності синхронізації швидкості руху гідравлічних двигунів в перехідних режимах обумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямі з пошуком шляхів підвищення точності синхронізації та аналізом ефективності отриманих результатів.

На базі огляду сформульовано основні перспективи подальшого розвитку робочого процесу синхронізації. Узагальнення та зіставлення окремих результатів попередніх авторів у цій галузі дають можливість визначити перелік факторів, які впливають на похибку синхронізації руху гідравлічних двигунів впливають багато параметрів: величина та характер навантаження; швидкість та прискорення рухів гідравлічних двигунів; час (величина) переміщення; жорсткість вузлів привода та механізму в цілому; відхилення від номінальних значень розмірів робочих органів та двигунів, зумовлених похибками при виготовленні та змінами в процесі експлуатації; витоки робочої рідини в зазорах гідравлічних двигунів та апаратів.

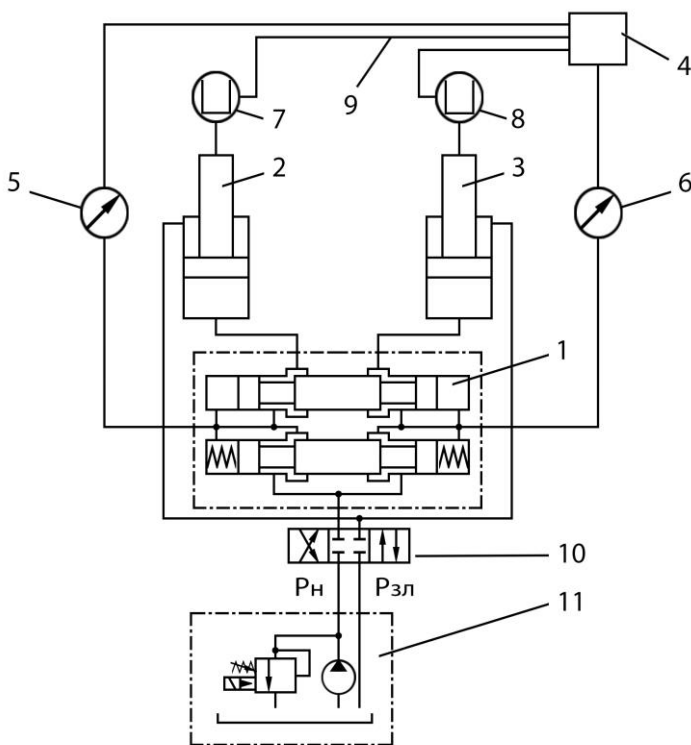


Рисунок 1 - Схема експериментального стенда: 1 – діляник потоку; 2, 3 – гідроциліндри; 4 – комп'ютер; 5, 6 – датчики тиску; 7, 8 – датчики лінійного переміщення; 9 – кабелі; 10 – розподільник; 11 – насосна станція

В результаті доведено актуальність теми досліджень, визначено мету роботи та поставлено завдання забезпечення допустимих відхилень в узгоджених рухах робочих органів механізмів за рахунок застосування діляника потоку з додатковим зворотним зв'язком.

У другому розділі наведено загальну методичку та основні методи досліджень, застосовані в дисертаційній роботі. Математичне моделювання здійснювалось на базі класичних положень механіки рідини та технічної гідромеханіки; Розв'язування рівнянь математичної моделі здійснено за допомогою програмного комплексу комп'ютерної алгебри MathCad. Побудову теоретичних залежностей виконано диференціальними методами математичного аналізу та інтегрального обчислення. Натурні експерименти підпорядковано меті зіставлення їх результатів і результатів теоретичних досліджень. Визначення похибки

вимірів і результатів розрахунку основних характеристик роботи багатодвигунного гідравлічного агрегату базується на загальноприйнятих методиках та рекомендаціях щодо проведення інженерного експерименту та обробки одержаних даних.

Для дослідження роботи гідроагрегата з синхронізацією швидкості руху гідравлічних двигунів ділянком потоку з двохшлінним дроселюючим розподільником, встановленим замість стандартних нерегульованих дроселів, створено експериментальний стенд, схема якого приведена на рис. 1., а функціональна блок-схема вимірювань наведена на рис.2.

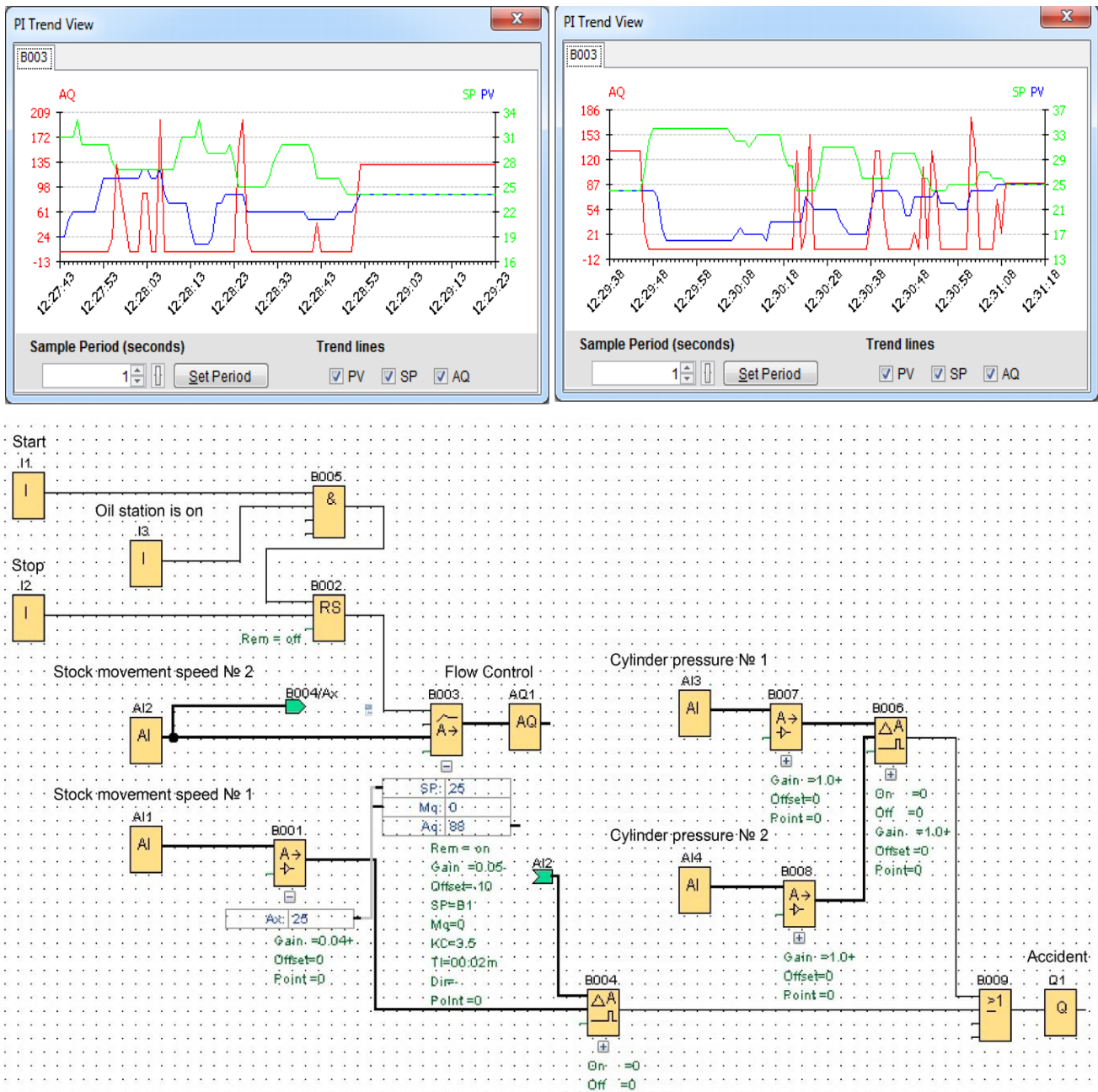


Рисунок - 2. Функціональна блок-схема вимірювань швидкості переміщення штоків гідроприводу

Для керування швидкістю переміщення штоків було застосовано пропорційно-інтегральний регулятор з негативним зворотнім зв'язком. Як сигнал завдання прийн-

ята швидкість переміщення штока без додаткового навантаження. Виміри проводилися за допомогою датчиків лінійного типу переміщення.

У лабораторному стенді реалізація регулятора виконана на базі контролера LOGO фірми Siemens 8-го покоління. Програмування контролера виконане на мові логічних діаграм або релейно-контактних схем.

У **третьому розділі** проведено теоретичний опис робочого процесу синхронізації роботи багатодвигунного гідравлічного агрегату за рахунок застосування дільника потоку з додатковим зворотним зв'язком.

Робота гідравлічного агрегату описується системою рівнянь, які включають:

- рівняння руху штоків гідроциліндрів та регулюючих елементів гідроапаратів;
- рівняння витрат рідини через регулюючі елементи гідроапаратів;
- рівняння балансу витрат в порожнинах гідроапаратів з урахування переміщення регулюючих елементів та стискальності робочої рідини;
- рівняння обмеження переміщень рухомих елементів;
- рівняння стану робочої рідини;
- вплив на роботу гідравлічних двигунів та регулюючих елементів контактної та в'язкого тертя.

$$m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum F_i, \quad (1)$$

де m_i – приведена до штоку маса рухомих частин поршня та механізму; y_i – переміщення поршня, $\sum F_i$ – сума сил, прикладених до штоку.

$$\sum F_i = F_{pi} - F_{mi} - F_{fi}, \quad (2)$$

де F_{pi} – сила, зумовлена тиском робочої рідини на поршень; F_{mi} – сила на робочому органі механізму, приведена до штоку; F_{fi} – сила, що виникає внаслідок тертя.

$$F_{pi} = s_1 p_{1i} - s_2 p_2, \quad (3)$$

де s_1, s_2 – площі поршня поршневої та штокової порожнин гідроциліндра; p_1, p_2 – тиск у порожнинах гідроциліндра.

$$\frac{d p_{1i}}{dt} = \frac{1}{\beta_{1i}} \left(Q_{2i} - s_1 \frac{d y_i}{dt} \right), \quad (4)$$

$$\frac{d p_2}{dt} = \frac{1}{\beta_2} \left[s_2 \left(\frac{d y_1}{dt} + \frac{d y_2}{dt} \right) - Q_{2v} \right], \quad (5)$$

де β_{1i}, β_2 – приведений коефіцієнт об'ємної деформації робочої рідини та порожнин;

Q_{2i} – витрати рідини через робочі щілини дільника потоку;

Q_{2v} – витрати рідини через робочу щілину розподільника.

$$\beta_{1i} = \frac{V_{l,i}}{E_l} + \frac{V_{e,i}}{E_{e,i}} + \frac{V_{g,i}}{n p_i}, \quad (6)$$

де V_{li} – об'єм робочої рідини; V_{ei} – об'єм порожнини з пружними стінками;

V_{gi} – об'єм нерозчинених газів у робочій порожнині; E_i – модуль об'ємної пружності рідини; E_{ei} – модуль об'ємної пружності стінок порожнини; n – коефіцієнт політропи.

$$V_{l,li} = V_{c,li} + s_1 y_i, \quad (7)$$

$$V_{l,2} = V_{c,2} + s_2 (2l - y_1 - y_2), \quad (8)$$

де V_{li} , V_{l2} – об'єм робочої рідини, що знаходиться в гідролініях; l – хід штоку.

$$Q_{11} = \mu_1 b_1 (x_0 + x_1) \sqrt{\frac{2|p_{t,1} - p_{11}|}{\rho}} \operatorname{sgn}(p_{t,1} - p_{11}), \quad (9)$$

$$Q_{12} = \mu_1 b_1 (x_0 - x_1) \sqrt{\frac{2|p_{t,2} - p_{12}|}{\rho}} \operatorname{sgn}(p_{t,2} - p_{12}), \quad (10)$$

$$Q_{ii} = \mu_t s_t \sqrt{\frac{2|p_{v,1} - p_{t,i}|}{\rho}} \operatorname{sgn}(p_{v,1} - p_{t,i}), \quad (11)$$

$$Q_{ii} = Q_{li}, \quad (12)$$

$$Q_{v,1} = \mu_v s_v \sqrt{\frac{2|p_p - p_{v,1}|}{\rho}} \operatorname{sgn}(p_p - p_{v,1}) \quad (13)$$

$$Q_{v,2} = \mu_v s_v \sqrt{\frac{2|p_2 - p_d|}{\rho}} \operatorname{sgn}(p_2 - p_d), \quad (14)$$

$$Q_{v,1} = Q_{t,1} + Q_{t,2}, \quad (15)$$

$$Q_p = Q_{v,1} + Q_{vo} + Q_{hm}, \quad (16)$$

$$Q_{vo} = \begin{cases} 0 & \text{при } p_p < p_n \\ k_v \frac{p_p - p_n}{\Delta p_{v,n}} & \text{при } p_p > p_n \text{ та } Q_{vo} < Q_p \\ Q_p & \text{при } p_p > p_n \text{ та } Q_{vo} > Q_p \end{cases} \quad (17)$$

де μ_1 – коефіцієнт витрат робочих щілин дільника потоку; b_1 – ширина робочої щілини дільника потоку; x_0 – початковий зазор між золотником і гільзою дільника потоку; x_1 – зміщення золотника дільника потоку з нейтрального положення; μ_v – коефіцієнт витрат робочих щілин розподільника; s_v – площа робочих щілин розподільника; p_2 – тиск на вході в дроселюючий елемент; p_d – тиск на виході з дроселюючого елементу; Q_p – подача насоса; Q_w – витрати через переливний клапан; Q_{lm} – витрата рідини в напірній лінії насоса, зумовлена роботою інших гідравлічних двигунів.

$$F_{f,i} = F_{fv,i} + F_{fk,i}, \quad (18)$$

$$F_{f,v,i} = k_{vi} \frac{d y_i}{d t}, \quad (19)$$

$$F_{f,k} = \begin{cases} |F_{fd}| \operatorname{sgn}(v) & \text{при } v \neq 0 \\ F_a & \text{при } v = 0 \text{ та } |F_{fps}| > |F_a|, \\ |F_{fps}| \operatorname{sgn}(F_a) & \text{при } v = 0 \text{ та } |F_{fps}| < |F_a| \end{cases} \quad (20)$$

де $F_{fv,i}$ – сила в'язкого в тертя; $F_{fk,i}$ – сила контактного тертя; k_{vi} – коефіцієнт в'язкого

тертя; F_{fd} – сила тертя при русі механізму; F_{fps} – сила тертя при зупинці механізму; v – швидкість руху штока; F_a – сума активних сил, що діють на шток.

До активних сил належать сили від тиску робочої рідини на поршень гідроциліндра та сила, що виникає в результаті роботи механізму.

Результати розрахунку швидкості руху штоків гідроциліндрів при раптовому збільшенню навантаження на гідроциліндрі на $\Delta F_m = 0,2F_{m.0}$ приведені на рис. 3. Для зручності результати надано у безрозмірному вигляді.

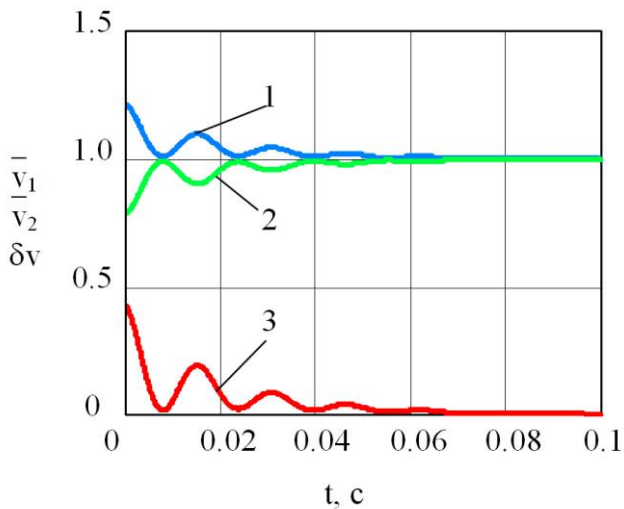


Рисунок - 3. Швидкості руху штоків гідроциліндрів при раптовій зміні навантаження: 1 – \bar{v}_1 ; 2 – \bar{v}_2 ; 3 – δv

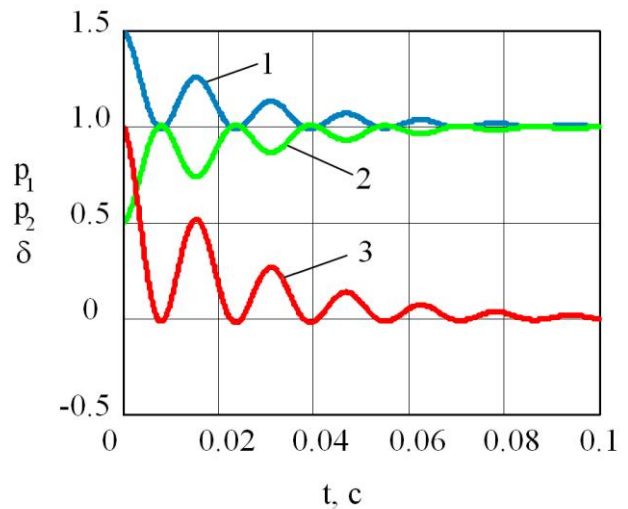


Рисунок - 4. Тиски в міждросельних камерах дільника потоку при раптовій зміні навантаження: 1 – \bar{p}_{t1} ; 2 – \bar{p}_{t2} ; 3 – δp

Відхилення швидкості руху від номінальної зумовлюється тим, що золотник дільника потоку не може миттєво змінити площу регульованого дроселя. Для того, щоб перепад тиску на нерегульованих дроселях встановився однаковий перепад тиску потрібен деякий час (рис.4).

З рис. 3 і 4 видно, що швидкість руху штоків гідроциліндрів та тиск в міждросельних камерах дільника потоку змінюються за аналогічними залежностями.

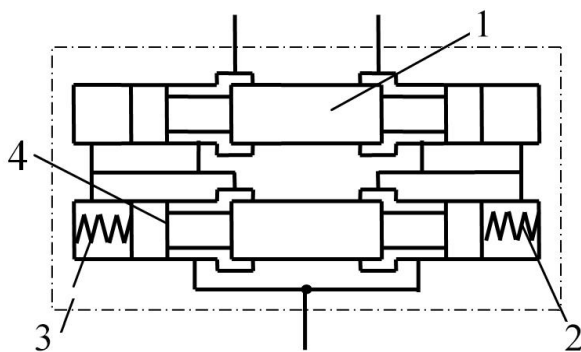


Рисунок - 5. Дільник потоку з двоциліндним дроселюючим розподільником: 1, 4 – золотник, 2, 3 – центруючі пружини

Такий результат пояснюється тим, що швидкість залежить від витрат через дроселі дільника потоку, а витрати в свою чергу, залежать від перепаду тиску на нерегульованому дроселі.

Оскільки витрати через дросель визначаються залежністю (11), то пропонується таке рішення: замість нерегульованих дроселів встановити двоциліндний дроселюючий розподільник (рис. 5). Положення золотника 4 в розподільнику залежить від перепаду тисків в міждросельних камерах та жорсткості пружин 2, 3.

Робоча рідина поступає в дільник

потокі і, розділяючись, через робочі щілини золотникового розподільника 4 поступає у торцеві камери золотника 1 та золотника 4. Якщо навантаження на гідродвигунах однакові, то тиски на виході з дільника потоку будуть однаковими, золотник 1 та 4 знаходяться в нейтральному положенні. При зміні навантаження на гідродвигунах, тиски в гідролініях зміняться, що призведе до зміни тиску в міжросельних камерах дільника потоку. При цьому золотники 1 та 4 переміщуються таким чином, що робочі щілини в менш навантаженій лінії зменшуються, а в більш навантаженій – збільшуються. Коли тиски в міжросельних камерах зрівняються, золотник 1 залишиться в новому положенні, а золотник 4 за рахунок центруючих пружин 2, 3 повернеться в нейтральне положення. Переміщення золотника 1 забезпечує однакові опори гідроліній, однаковий перепад тиску на робочих щілинах золотника 4. Оскільки площа робочих щілин золотника 4 в нейтральному положенні однакова, то і витрати в гідролініях будуть однаковими, що забезпечує синхронізацію руху гідравлічних двигунів.

З (11), враховуючи що $Q_{ii} = v_0 s_1$, отримуємо залежність площі робочих щілин золотника від тисків в міжросельних камерах, виходячи з умови $Q_{ii} = const$

$$s_{t,i} = \frac{v_0 s_1}{\mu_t \sqrt{\frac{2|p_{v,1} - p_{t,i}|}{\rho}}} \quad (3.21)$$

Залежність площі робочих щілин золотника, віднесеної до площі робочих щілин при нейтральному положенні, від перепаду тиску в міжросельних камерах приведена на рис. 6.

Мінімальна площа дроселюючої щілини золотника, виходячи з (21) при $\delta p = 0,25$ $\bar{s}_1 = 0,784$, максимальна – $\bar{s}_2 = 1,633$.

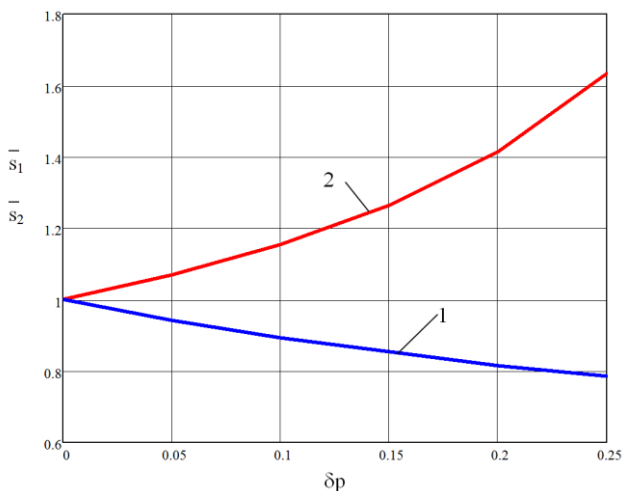


Рисунок - 6. Залежність площі дроселюючої щілини дільника потоку від перепаду тисків в міжросельних камерах: 1 – \bar{s}_1 ; 2 – \bar{s}_2

Залежність (рис. 6) дозволяє виконати профілювання робочих щілин золотника.

Результати дослідження динаміки руху синхронізованих гідравлічних циліндрів при тому ж збуренні, що і для дільника потоку з нерегульованими дроселями приведені на рис. 7, 8.

З рис. 7, 8 видно, що тиски в міжросельних камерах та швидкості руху гідравлічних двигунів при зміні навантаження мають відхилення від ustalених значень.

У четвертому розділі подано результати експериментальних випробувань дільника потоку на стенді, що імітує роботу механізму в усталеному режимі та при раптовій зміні навантаження на одному з гідравлічних двигунів.

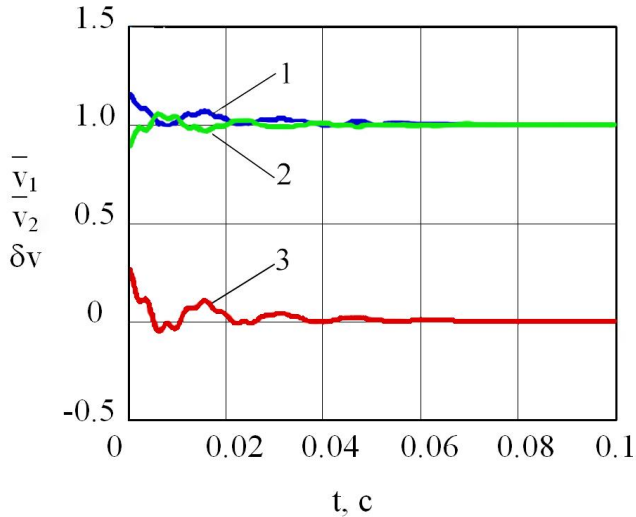


Рисунок - 7. Швидкості руху штоків гідроциліндрів при раптовому збільшенні навантаження для ділянки потоку з регульованими дроселями: 1 – \bar{v}_1 ; 2 – \bar{v}_2 ; 3 – δv

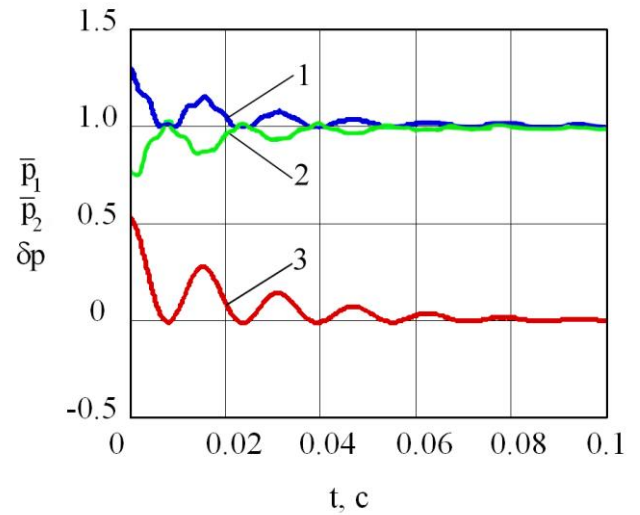


Рисунок - 8. Тиски в міждросельних камерах при раптовому збільшенні навантаження для ділянки потоку з регульованими дроселями: 1 – \bar{p}_{t1} ; 2 – \bar{p}_{t2} ; 3 – δp

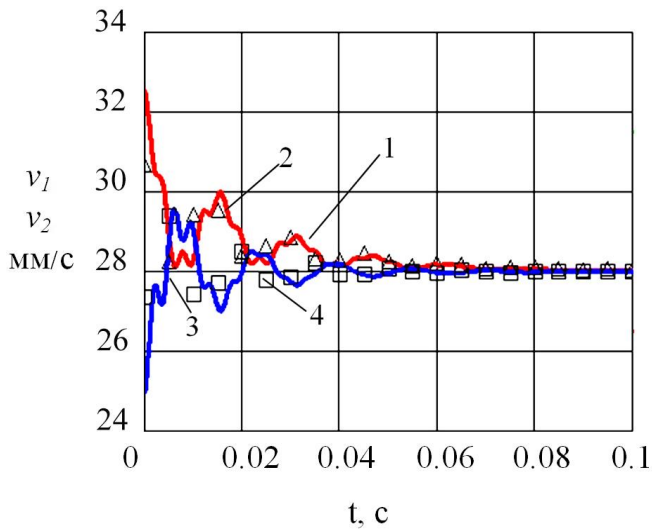


Рисунок - 9. Швидкості руху штоків гідроциліндрів при раптовому збільшенні навантаження для ділянки потоку з регульованими дроселями: 1 – v_1 теоретична; 2 – v_1 експеримент; 3 – v_2 теоретична; 4 – v_2 експеримент

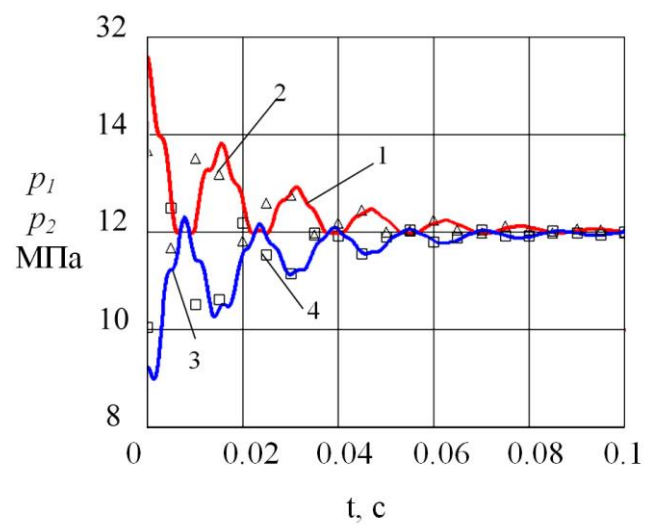


Рисунок - 10. Тиски в міждросельних камерах ділянки потоку з регульованими дроселями при раптовому збільшенні навантаження: 1 – p_1 теоретичний; 2 – p_1 експеримент; 3 – p_2 теоретичний; 4 – p_2 експеримент

Експериментальні дослідження мали декілька етапів:

- дослідження роботи пристрою для створення зусилля без застосування розробленого РГД;
- дослідження впливу нерівномірної подачі одноплунжерного насоса на ступінь рівномірності руху шпильки, що поздовжньо деформується;

- перевірка можливості реалізації синхронізації обертів золотникового елемента дроселя з привідним валом кривошипного однопоршневого насосу, використовуючи запропоноване конструктивне рішення;
- перевірка дієздатності та надійності дросельного елемента у динамічному режимі;
- дослідження роботи пристрою для створення зусилля із застосуванням створеного прототипу РГД та підтвердження підвищення рівномірності руху шпильки;
- підтвердження адекватності математичної моделі роботи пристрою для створення зусилля та дросельного елемента.

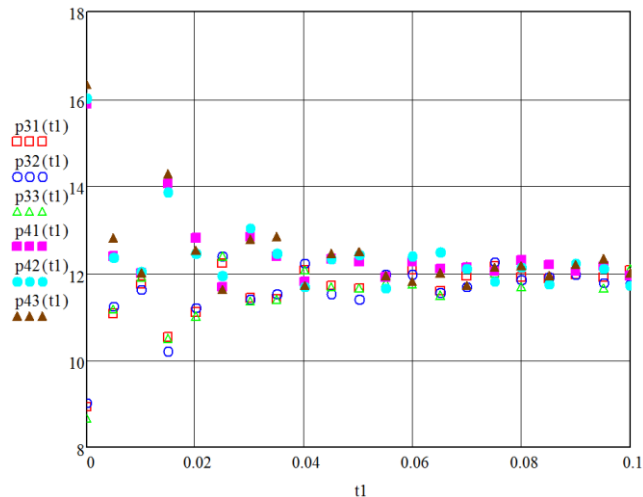


Рисунок - 11. Експериментальні осереднені (3 – перший циліндр, 4 – другий циліндр) дані по визначенню тиску в гідроциліндрах (МПа)

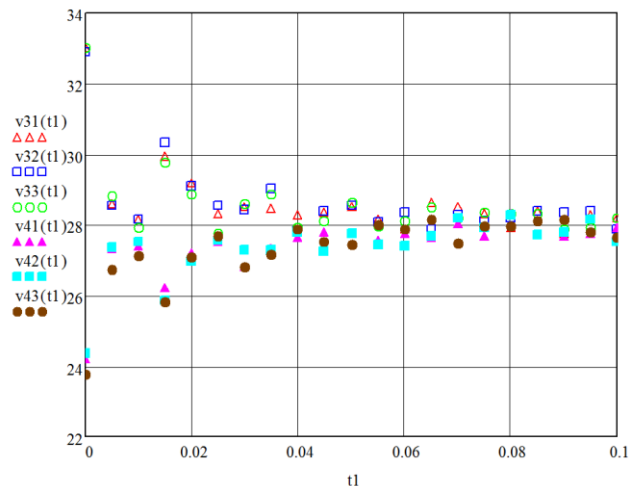


Рисунок - 12. Експериментальні осереднені (3 – перший циліндр, 4 – другий циліндр) дані по визначенню швидкості переміщення робочих органів гідравлічного приводу (мм / с)

Результати експериментальних досліджень руху робочих органів гідравлічного агрегату та тиску в гідроциліндрах представлені на рис. 9-12. Результати теоретичних досліджень, як видно з рис. 9 та 10, мають ряд відхилень від експериментальних. Це можна пояснити тим, що в реальному гідравлічному агрегаті не вдалося миттєво змінити навантаження на шток гідроциліндра. Незважаючи на теоретично миттєву зміну зусилля на штоку гідроциліндра при підйомі вантажу з площадки для створення додаткового навантаження, зусилля змінилося поступово. Тому зміна тиску в міждросельних камерах дільника потоку більш плавна, що зумовило також і меншу амплітуду коливань швидкості. Однак, з графіків витікає, що характер змін тиску та швидкості, отримані в результаті експериментальних досліджень, співпадають з результатами теоретичних досліджень. Можна зробити висновок про адекватність запропонованої моделі роботи гідравлічного агрегату з синхронним переміщенням двох гідравлічних двигунів.

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень підтверджено можливість підвищення точності процесу синхронізації гідравлічних двигунів в гідравлічному приводі за рахунок застосування регульованих дроселів в дільнику потоку робочої рідини.

У п'ятому розділі проведено аналіз одержаних теоретичних та експериментальних результатів та представлено результати дослідно-промислового впровадження розробленого на базі досліджень дільника потоку.

Отримані результати можуть вважатися за доцільні з практичної точки зору, тому що дозволяють обґрунтовано підходити до вибору конструкції дільника потоку. З теоретичної точки зору вони дозволяють стверджувати про можливість підвищення точності синхронізації швидкості за рахунок застосування в дільнику потоку дроселюючого розподільника, що є перевагами даного дослідження. Однак необхідно відмітити, що результати дослідження вказують на неоднозначний вплив дроселюючого розподільника на характер перехідного процесу. Це проявляється, в першу чергу, в наявності гармоніки вищого порядку в отриманому графіку перехідного процесу (рис. 9, 10).

В перехідному процесі для швидкості і тиску виникли гармоніки вищого порядку, зумовлені рухом золотника двощілинного розподільника.



Рисунок - 13. Дільник потоку з додатковим зворотним зв'язком по перепаду тиску в міждросельній камері

Наявність гармоніки вищого порядку в коливаннях тиску і швидкості несуттєво впливає на роботу гідравлічних двигунів, оскільки амплітуда коливань незначна. Підвищення точності синхронізації швидкості зумовлено одночасною зміною площі дроселя, який стабілізує перепад тиску та площі регульованого дроселя.

Для хімічних виробництв важливою стадією в загальному технологічному процесі є транспортування і одночасне дозування матеріалів, особливо сипких. Транспортування і одночасне дозування сипких матеріалів є досить складним і енергоємним процесом і вдосконалити цю стадію представляється можливим за рахунок застосування дільника потоку з додатковим зворотним зв'язком по перепаду тиску в міждросельній камері (рис.13).

Розроблений дільник потоку встановлений на транспортер Д1 подачі гранул ре-

тура в робочий простір гранулятора, транспортер Д1 подачі некондиційних гранул в змішувач для приготування розчину (розплаву), транспортер Д3 подачі гранул товарної фракції на пакування.

Технологічна схема виробництва гранульованої продукції представлена на рис. 14.

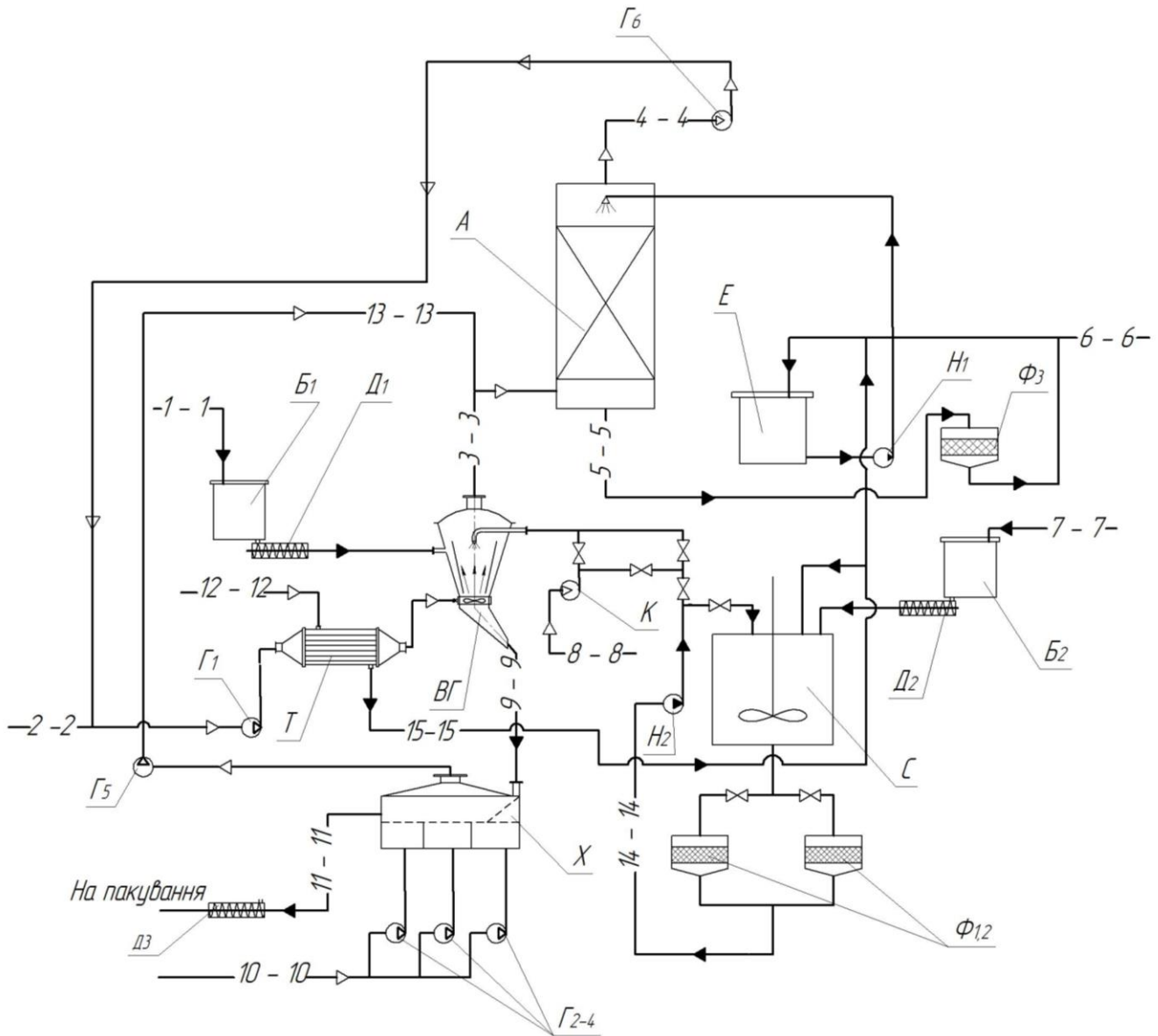


Рисунок – 14. Схема виробництва гранул з використанням вихрового гранулятора: ВГ – вихровий гранулятор; Т – калорифер; Х – охолоджувач; А – абсорбер; Ф – фільтр; С – змішувач; Д – транспортер-дозатор; Б – бункер; Г – газодувка; Н – насос; Е – ємність; К – компресор;

1-1 – ретур; 2-2 – технологічне повітря; 3-3 – забруднене повітря; 4-4 – очищене повітря; 5-5 – забруднена вода; 6-6 – вода; 7-7 – вихідний продукт; 8-8 – повітря на розпил розчину; 9-9 – продукт; 10-10 – повітря на охолодження продукту; 11-11 – продукт на пакування; 12-12 – пар; 13-13 – запилений газ; 14-14 – розчин; 15-15 – водяний конденсат



Рисунок - 14. Щит (панель) приладів для фіксації показників робочого процесу дільника потоку.

Використання в установці гранулювання на стадії транспортування розробленого дільника потоку має наступні переваги:

- відсутність громіздких редукторів;
- зменшення втрат енергії, які виникають внаслідок неповної завантаженості асинхронних двигунів;
- зменшення маси та габаритів приводу транспортера;
- зменшення ступеню зношуваності стрічки транспортера;
- відсутність засобів автоматизації, контролю та управління процесом переміщення стрічки транспортера;
- зменшення маси стріли транспортера;
- вибухозахищеність системи.

Для підтвердження працездатності запропонованого дільника потоку для транспортера ДЗ додатково створений щит (панель) приладів для фіксації значень швидкостей і переміщень гідравлічних циліндрів, а також тисків в міждросельних камерах (рис. 15).

ВИСНОВКИ

У дисертації здійснено теоретичне і експериментальне обґрунтування нового вирішення наукового завдання щодо підвищення точності синхронізації швидкості руху гідравлічних двигунів в нестационарних режимах, що дає змогу сформулювати наступні висновки

1. Створена нова математична модель робочого процесу гідравлічного агрегату з синхронізацією руху гідравлічних двигунів для визначення характеристик гідравлічного агрегату в перехідних режимах роботи.

2. Встановлено, що в перехідних режимах роботи синхронізованих гідравлічних двигунів виникає похибка синхронізації швидкості руху, яка досягає 43% від усталеної швидкості. Похибка обумовлена інерційністю золотникового дроселя дільника потоку. Це проявляється в запізненні компенсації впливу зміни навантаження на перепад тиску на нерегульованих дроселях. Застосування двоцилінного дроселюючого розподільника, регульованого по перепаду тиску в міждросельній камері, дозволило зменшити похибку в синхронізації швидкості з 0.43 до 0.27, тобто в 1.6 рази, а відносний перепад тиску в міждросельній камері з 1 до 0.53, тобто в 1.9 рази.

3. Встановлено основні параметри гідравлічного регульованого дроселя, а саме залежність площі дроселюючої щілини дільника потоку від перепаду тисків в міждросельних камерах, що дозволило вдосконалити процес синхронізації гідравлічних двигунів;

4. Розроблено методику розрахунку робочого процесу синхронізації гідравлічних двигунів в гідравлічному агрегаті (багатодвигунній установці) дільником потоку, з додатковим зворотнім зв'язком по перепаду тиску в міждросельних камерах і визначити характеристики гідравлічних агрегатів в перехідних режимах роботи;

5. Експериментально підтверджені теоретичні висновки і запропонована концепція щодо підвищення точності синхронізації швидкості при застосуванні подільника потоку з двощілинним дроселюючим розподільником.

6. На підставі результатів експериментальних досліджень і розрахунку робочого процесу із застосуванням авторської методики запропоновані заходи щодо вдосконалення технологічної установки виробництва гранульованих продуктів, зокрема, стадії транспортування сипких матеріалів між ділянками технологічної лінії.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в виробництво та навчальний процес.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових і фахових виданнях:

1. Математична модель гідравлічного приводу для синхронних переміщень / Гавриленко О.М., Кулініч С. П. // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2007. – №3(109), Ч. 1. – С. 39-43. *Особистий внесок: постановка завдань досліджень, формулювання мети та вибір інструментів математичного моделювання.*

2. Математична модель багатодвигунного гідравлічного приводу з забезпеченням синхронних переміщень двох двигунів / О.М. Гавриленко, О.С. Ігнат'єв, С.П. Кулініч // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». - 2008 . - № 55. - С. 276-282. *Особистий внесок: розробка загальної математичної моделі робочого процесу в багатодвигунному гідравлічному приводі.*

3. Багатодвигунний гідравлічний привід з забезпеченням синхронного переміщення двох двигунів / О.М. Гавриленко, С.П. Кулініч // Вісник Сумського національного аграрного університету - 2018 . - № 55. - С. 276-282. *Особистий внесок: розробка математичної моделі приводу, яка враховує двофазність і стисливість робочої рідини, а також нелінійність характеристик елементів приводу.*

4. Experimental studies of the hydraulic engines synchronization process in a multi-engine unit / Gavrylenko A.N, Kulinich S.P. // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). – Warszawa, Polska. - 2019. – No.7 (47). Volume 1– PP. 4-10. *Особистий внесок: створення експериментального стенду для дослідження дільника потоку з додатковим зворотнім зв'язком по перепаду тиску в міждросельній камері, планування та проведення експериментальних досліджень, аналіз результатів.*

5. Industrial implementation of a multiple engine hydraulic drive with synchronization of engines movement in a unit for the production of granular products / Gavrylenko A. // Slovak international scientific journal – Bratislava, Slovakia. - 2019. – #31. Volume 1– PP.19-22. *Особистий внесок: створення зразка дільника потоку з додатковим зворотним зв'язком по перепаду тиску в міждросельній камері, його впровадження в технологічну схему отримання гранульованого продукту на стадії транспортування сипких матеріалів.*

6. Evaluation of the impact made by the hydrodynamic regime of the granulation equipment operation on the nanoporous structure of N_4HNO_3 granules / A.E. Artyukhov, J. Krmela, O.M. Gavrylenko // Journal of nano – and electronic physics – 2019. – No.11(3) – PP. 03033-1 - 03033-5. *Особистий внесок: участь у створенні дослідно-промислового стенду виробництва гранул з особливими властивостями, зокрема, елементів транспортування сипких матеріалів із застосуванням створеного в рамках дисертаційних досліджень дільника потоку.*

7. Аналіз похибки синхронізації швидкості руху гідравлічних двигунів в перехідних режимах роботи / О. М. Гавриленко, С. П. Кулініч // Східно-європейський журнал передових технологій - 2019. - № 4/7 (100). - С. 30-38. *Особистий внесок: проведення розрахунку роботи синхронізованих гідроциліндрів в неусталеному режимі при раптовій зміні навантаження на одному з гідроциліндрів, визначення необхідної залежності зміни площі робочої щільності регульованих дроселів та наведено рекомендації щодо профілізації робочих щільностей золотникового дроселя.*

8. Проблеми синхронізації двигунів у гідравлічному агрегаті / Гавриленко О. М. // ПРАЦІ Таврійського державного агротехнологічного університету – Мелітополь - 2019. - Випуск 19 – Т. 2. – С. 103-109. *Особистий внесок: виконано аналіз схем синхронізації гідродвигунів, розглянуто фактори, які впливають на узгодження руху вихідних ланок двигунів (штоків гідроциліндрів, роторів гідромоторів).*

Інші публікації, матеріали конференцій та тези доповідей:

9. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 4356 Україна,. Науковий твір «методика розрахунку багатодвигунного гідравлічного приводу для синхронного переміщення робочих органів машин і механізмів» / О.М. Гавриленко, С.П. Кулініч, Я. Крмела, А.Є. Артюхов. – опубл. 20.05.2019.

10. Дослідження процесу синхронізації гідродвигунів в багатодвигунних приводах: аналіз похибок синхронізації в нестаціонарних режимах / Гавриленко О.М., Кулініч С.П. // «Прикладні науково-технічні дослідження» : тези доп. III Міжнародної науково-практичної конференції (м. Івано-Франківськ, 3-5 квітня 2019р.) – Івано-Франківськ, 2019. – С. 62.

11. Застосування гідравлічного приводу для паперорізальних машин [текст] / С.П. Кулініч, О.М. Гавриленко// матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету / відп. за вип. М.Б.Приходченко. – Суми : СумДУ, 2005. – вип. 7. – с. 170.

12. Синхронізація руху гідроциліндрів приводу паперорізальної машини приводі / О.М. Гавриленко, С.П. Кулініч // матеріали тез доповідей VII науково-технічної конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» (м.Вінниця,

5-6 жовтня 2006) - Київ, 2006. – С.13

13. Синхронізація руху двигунів в гідравлічному приводі / О.М. Гавриленко, С.П. Кулініч, Т.С. Кулініч // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету. – Суми : СумДУ, 2007. – Ч.2. – С. 58.

14. Синхронізація переміщень гідравлічних двигунів / Гавриленко О.М., Кулініч С.П. // матеріали тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Промислова гідравліка та пневматика», (м. Суми , 15 - 17 жовтня 2015 р.)- м. Суми 2015 р.

15. Optimization of the multi-engine hydraulic drives work for synchronous movement of the working tools in the machines / Oleksii Gavrylenko // 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (Sumy, June 12-15, 2018) – 2018

16. Моделювання роботи гідравлічного приводу з синхронізованими двигунами / Гавриленко О.М., Кулініч С.П. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2019) : матеріали тез доповідей IX міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 14-16 травня 2019р.) : у 2-х т. / Чернігівський національний технологічний університет [та ін.]; відп. за вип.: А. М. Єрошенко [та ін.]. – Чернігів : ЧНТУ, 2019. – Т. 1. – С. 230.

АНОТАЦІЯ

Гавриленко О.М. Вдосконалення процесу синхронізації руху гідравлічних двигунів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. – Сумський державний університет МОН України, Суми, 2019.

Синхронізація роботи декількох робочих органів для забезпечення точного переміщення одного робочого елемента (застосування багатодвигунних гідравлічних агрегатів) є актуальною проблемою в багатьох галузях промисловості: обладнання для пресування і кування, підйомно-транспортні пристрої, пристрої для створення вібрації, землерийні машини тощо. Ефективність використання сучасного технологічного обладнання, яке представляє собою складні автоматизовані комплекси з великою кількістю виконавчих органів, в значній мірі залежить від можливості прогнозування характеристик силових приводів, які в ньому застосовуються.

Виконано аналіз схем синхронізації гідродвигунів, розглянуто фактори, які впливають на узгодження руху вихідних ланок двигунів (штоків гідроциліндрів, роторів гідромоторів). Розглянуті схеми синхронізації гідравлічних двигунів характеризуються сталою похибкою швидкості руху гідравлічних двигунів в усталеному режимі. Встановлено, що при несиметричному навантаженні похибка синхронізації за положенням вихідної ланки гідравлічного двигуна пропорційна величині переміщення (часу руху). За результатами аналізу поставлені задачі по вдосконаленню процесу синхронізації руху гідравлічних двигунів у багатодвигунному гідравлічному агрегаті.

Досліджено гідравлічний привід з двома гідравлічними циліндрами, синхронізація швидкості руху штоків яких здійснюється дільником потоку робочої рідини. На основі розробленої математичної моделі проведено розрахунок роботи синхронізованих гідроциліндрів в неусталеному режимі при раптовій зміні навантаження на одному з гідроциліндрів. Визначено швидкості руху штоків гідроциліндрів і тиск в міждросельних камерах дільника потоку. Встановлено, що при перехідних режимах роботи приводу, обумовлених раптовою зміною навантаження гідроциліндрів, виникають коливання тиску в міждросельних камерах дільника потоку і, в результаті цього, похибка синхронізації швидкості руху штоків гідроциліндрів на початковому етапі. Відносний перепад тисків в міждросельних камерах досягає 1, а відносна різниця швидкостей руху – до 0.43. Для підвищення точності синхронізації руху гідравлічних двигунів запропонований дільник потоку, в якому додано додатковий зворотний зв'язок по перепаду тиску в міждросельних камерах дільника. Додатковий зворотний зв'язок реалізований за рахунок застосування двохщілинного дроселюючого розподільника золотникового типу. Виходячи з умов забезпечення мінімальної похибки синхронізації, визначена необхідна залежність зміни площі робочої щілини регульованих дроселів та наведено рекомендації щодо профілізації робочих щілин золотникового дроселя.

Встановлено розрахунковим шляхом і підтверджено в експерименті, що застосування регульованих дроселів зменшує похибку синхронізації швидкості руху штоків гідроциліндрів до 0.27, а перепад тисків в міждросельних камерах дільника потоку – до 0.53.

В перехідному процесі для швидкості і тиску виникли гармоніки вищого порядку, зумовлені рухом золотника двохщілинного розподільника.

Наявність гармоніки вищого порядку в коливаннях тиску і швидкості несуттєво впливає на роботу гідравлічних двигунів, оскільки амплітуда коливань незначна.

Підвищення точності синхронізації швидкості зумовлено одночасною зміною площі дроселя, який стабілізує перепад тиску та площі регульованого дроселя

Ключові слова: дільник потоку, гідравлічний двигун, золотник, дроселюючий розподільник, синхронізація, перехідний процес.

SUMMARY

Havrylenko O.M. Improvement of the hydraulic engines motion synchronization process. – Manuscript.

Thesis research, presented for PhD degree in the specialty 05.05.17 – Hydraulic Machines and Hydropneumatic Units. – Sumy State University MES Ukraine, Sumy, 2019.

Synchronization of several working bodies operation to ensure the precise movement of one working element (the implementation of multi-engine hydraulic units) is an urgent problem in many industries: pressing and forging equipment, hoist and transport devices, vibration generators, earth-moving machines etc. The efficiency to use the modern technological equipment including complex automated aggregates with a large number of executive bodies greatly depends on the ability to predict the properties of the power

drivers used in it.

The schemes of the hydraulic engines synchronization are analyzed, the factors that influence the motion coordination of the output units in the engines (rods of hydraulic cylinders, rotors of hydraulic engines) are considered. The schemes of hydraulic engines synchronization are characterized by a constant error of the hydraulic engines motion velocity in the steady mode. It is established that at the asymmetrical loading the synchronization error by the position of the output link of the hydraulic engine is proportional to the amount of movement (motion time). According to the results of the analysis, tasks to improve the synchronization process regarding the movement of the hydraulic engines in a multi-engine hydraulic unit are set.

The hydraulic drive with two hydraulic cylinders is investigated, the motion velocity of rods is synchronized by the divider of the working fluid flow. Based on the investigated mathematical model, the operation of synchronized hydraulic cylinders in unsteady mode with a sudden change of load on one of the hydraulic cylinders is calculated. The motion velocities of the rods of the hydraulic cylinders and the pressure in the inter-throttle chambers of the flow divider are determined. It is established that during transient operation modes of the drive, caused by a sudden change in the load of the hydraulic cylinders, there are oscillations of pressure in the inter-throttle chambers of the flow divider and, as a result, the synchronization error of the motion velocity of the cylinders rods at the initial stage. The relative pressure drop in the inter-throttle chambers reaches 1, and the relative difference of motion velocities - up to 0.43. In order to improve the accuracy of the hydraulic engines synchronization, a flow divider is proposed, which added extra feedback regarding the pressure drop in the inter-throttle chambers of the divider. Additional feedback is realized through the use of a double-slotted spool-type throttle valve. Based on the conditions of minimum synchronization error, the necessary dependence to change the working gap of the regulated throttles is determined and the recommendations on the profiling of the working gaps of the spool-type throttle are given.

It is established through calculation and confirmed in the experiment that the use of adjustable throttles reduces the error regarding the synchronization of movement velocity of the cylinders rods to 0.27, and the pressure drop in the inter-throttle chambers of the flow divider - to 0.53.

In the transition process for the velocity and pressure, there are higher-order harmonics, caused by the movement of the spool valve of the double-slot distributor.

The presence of higher-order harmonics in pressure and velocity oscillations does not significantly affect the hydraulic motors operation, since the amplitude of oscillations is negligible.

The reduction of the velocity synchronization error is due to the simultaneous change of the throttle area, which stabilizes the pressure drop and the adjustable throttle area.

Keywords: flow divider, hydraulic engine, spool valve, throttle distributor, synchronization, transient process.

Підписано до друку 11.11.2019 р.
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 1005.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007 р.