

Національний університет “Львівська політехніка”

**КРІЛЬ СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 681.533.36

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИМ РЕЖИМОМ  
МАГІСТРАЛЬНОГО НАФТОПРОВОДУ**

05.13.07 «Автоматизація процесів керування»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Національного університету “Львівська політехніка”.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Пістун Євген Павлович,**  
завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету “Львівська політехніка”.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Горбійчук Михайло Іванович,**  
завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

доктор технічних наук, професор  
**Максимов Максим Віталійович,**  
завідувач кафедри автоматизації теплотехнічних процесів Одеського національного політехнічного університету

Захист відбудеться \_\_\_\_\_ 2017 р. о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04 в Національному університеті “Львівська політехніка” за адресою: 79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 51 Х-го навчального корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий \_\_\_\_\_ 2017р.

*Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.04,  
кандидат технічних наук, доцент*



Вашкурак Ю.3.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Стратегічно важливою ланкою економіки України слід вважати нафтогазову галузь. Результати її роботи визначають стан забезпеченості національного господарства основними енергоресурсами, а хімічні виробництва - сировою.

Одним з найважливіших елементів паливо-енергетичного комплексу України є система магістральних трубопроводів для транспортування нафти та продуктів її переробки. Географічне розташування родовищ нафти та її споживачів ставить трубопровідний транспорт на перше місце серед всіх інших. Тільки трубопровідний транспорт може забезпечити безперербійне та рівномірне постачання значних вантажопотоків нафти, забезпечуючи при цьому найменші економічні затрати. Крім того, важливою перевагою трубопровідного транспорту нафти над залізничним та водним є можливість повної автоматизації технологічного процесу перекачування нафти.

Під час експлуатації нафтопроводу постійно виникають стрибки тиску: планові, при переключенні режимів перекачування, та непланові, при аварійній відмові насосного агрегату. Для забезпечення безперервної та надійної роботи магістральних нафтопроводів необхідно регулювати тиск на вході та виході нафтоперекачувальних станцій (НПС). Основний вплив на гідродинамічний режим магістрального нафтопроводу створюють елементи НПС, найбільш важливими є магістральний насос або група насосів, запірні засувки та регулюючі органи на виході кожної станції.

Роботи спрямовані на покращення технологічного процесу перекачування нафти та вдосконалення систем керування цим процесом є актуальними та економічно доцільними.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-дослідної роботи кафедри "Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій" Національного університету "Львівська політехніка" і носить науково-прикладний характер. Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри «Методи та засоби обліку енергоносіїв та автоматизація технологічних процесів».

Робота виконана в рамках програм згідно розпоряджень Кабінету міністрів України «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року» та «Про схвалення Концепції розвитку, модернізації і переоснащення нафтопереробної промисловості України на 2009-2015 роки», та спрямована на підвищення екологічної безпеки підприємств нафтопереробного комплексу.

Дисертаційні дослідження пов'язані з виконанням держбюджетної науково-дослідної роботи «Дослідження схем імпульсних регуляторів у промислових системах автоматизації», номер державної реєстрації 0116U004098 (2016-2017 рр., виконавець).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка ефективної системи автоматичного керування (САК) гідродинамічного режиму магістрального

нафтопроводу, яка забезпечила б зменшення кількості аварійних зупинок нафтопроводу та зменшення економічних втрат при транспортуванні нафти.

Мета реалізується вирішенням наступних завдань:

- провести аналіз причин створення аварійних ситуацій та економічних втрат при транспортуванні нафти, зокрема зумовлених недосконалістю існуючих методів регулювання тиску на НПС;
- побудувати математичну модель комплексу поворотна заслінка – виконавчий механізм;
- розробити структурну схему регулятора тиску на НПС, що реалізує новий принцип формування керуючої дії в системі регулювання тиску на НПС ;
- розробити алгоритми роботи системи керування гідродинамічним режимом НПС;
- реалізувати та дослідити систему автоматичного керування гідродинамічним режимом на реальному нафтопроводі.

**Об'єктом дослідження** є магістральні нафтопроводи, а саме НПС, які забезпечують перепад тиску необхідний для транспортування нафти.

**Предметом дослідження** є система керування гідродинамічним режимом НПС.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених в роботі задач, зокрема для побудови математичних моделей поворотної заслінки, виконавчого механізму, регулятора та усієї системи загалом, застосовувалися методи математичного моделювання та теорії вимірювань. Під час виконання експериментальних досліджень застосовано методи планування експерименту, теорії ймовірності. Для розроблення програмного забезпечення програмованого логічного контролера застосовано методи алгоритмізації та програмування.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

- вперше запропоновано новий принцип формування керуючої дії в системі регулювання тиску на НПС, особливістю якої є сумісне формування переміщення та швидкості переміщення поворотної заслінки, що дозволяє усунути негативні наслідки гідроудару та кавітації у нафтопроводі;

- отримав подальший розвиток метод регулювання тиску на НПС шляхом дроселювання потоку нафти, особливістю якого є запропонована зміна швидкості переміщення поворотної заслінки залежно від її положення, що дозволило покращити швидкодію системи регулювання тиску та якісні показники процесу регулювання;

- вперше побудовано математичну модель комплексу поворотна заслінка – виконавчий механізм, яка відрізняється від існуючих введенням зміни швидкості переміщення заслінки, в залежності від її положення, і дозволяє лінеаризувати динамічну характеристику цього комплексу;

- удосконалено структуру цифрового ПІ-регулятора системи керування гідродинамічного режиму нафтопроводу, яка відрізняється від існуючих тим, що вона побудована на основі рекурсивних рівнянь, що забезпечує значне підвищення швидкодії регулятора, при різких змінах тиску, а це дозволяє відреагувати на початку хвилі гідроудару і усунути аварійну ситуацію.

- вперше розроблено метод компенсації нелінійності коефіцієнта підсилення системи регулювання тиску на НПС шляхом плавної зміни часу повного ходу виконавчого механізму.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що:

- запропонований алгоритм зміни швидкості переміщення заслінки від її положення, може бути застосований для будь-яких заслінок та кульових кранів, які використовуються для регулювання витрати та тиску великих потоків;

- розроблена система регулювання тиску на НПС впроваджена на станціях «Новини» та «Плещівка», які входять до складу філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ПАТ «Укртранснафта». Акти впровадження наведені в Додатку 1. Впроваджені системи дозволили скоротити кількість аварійних зупинок НПС, підвищити швидкодію системи і покращити якість відпрацювання збурень гідродинамічного режиму та зменшити енергозатрати при транспортуванні нафти. На протязі двох-трьох років планується заміна систем регулювання тиску на всіх НПС філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ПАТ «Укртранснафта».

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертації отримані автором особисто, на основі власних ідей і розробок, а окремі досягнуті у співавторстві з науковим керівником та працівниками за місцем роботи. У публікаціях, в яких викладено результати досліджень і які написані у співавторстві, дисертанту належать:

- обґрунтування застосування перетворювача частоти для зміни швидкості переміщення виконавчого механізму, що дозволяє покращити динамічну характеристику комплексу поворотна заслінка – виконавчий механізм [2, 8];

- розробка на основі експериментальних даних математичної моделі поворотної заслінки та обґрунтування переваг її застосування для регулювання витрат великих потоків[10];

- математична модель об'єкта із змінними параметрами та виконавчим механізмом із змінним часом повного ходу[2];

- моделювання та дослідження аналогового ПІ регулятора з імітатором позиціонера та імпульсного ПІ регулятора з генератором імпульсів[1].

**Апробація результатів дисертації.** Дисертаційна робота обговорювалась на наукових семінарах кафедри «Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій» Національного університету «Львівська політехніка».

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на конференціях: XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика - 2011» (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, 2011); I Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, студентів та аспірантів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, 2011); 4-а науково-практична конференція студентів і молодих вчених "Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання" (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2013); "Electric power engineering&control systems 2013" (EPECS-2013, Lviv, Ukraine)

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані у 10 наукових працях: 5 статей у фахових наукових виданнях України та 1 стаття, що входить до міжнародної науково-метричної бази *Web of science*, 4 публікації у збірниках доповідей міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій.

Робота виконувалась в Національному університеті «Львівська політехніка» з 2011 р. по 2014 р.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел інформації та додатків. Дисертація викладена на 125 сторінках. Крім того, робота проілюстрована 59 рисунками, містить 1 таблицю, список літературних джерел із 90 найменувань та 2 додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дано загальну характеристику дисертаційної роботи. Розкрито суть та стан науково-технічної проблеми керування гідродинамічним режимом магістрального нафтопроводу. Обґрунтовано актуальність теми, на підставі чого сформульовані мета та основні задачі дослідження. Висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, подано відомості про особистий внесок здобувача та апробацію роботи.

**В першому розділі** розглянуто технологічний процес перекачування нафти та будову магістрального нафтопроводу. Показано, що для забезпечення безпечної та безперебійної роботи трубопровідного транспорту нафти необхідно здійснювати регулювання гідродинамічного режиму нафтопроводу. Стрибки тиску у нафтопроводі можуть спричинити пошкодження лінійної частини та насосних агрегатів, що може надовго обмежити транспортування нафти і завдати значної шкоди навколишньому середовищу. На гідродинамічний режим магістрального нафтопроводу найбільший вплив здійснюють елементи НПС, до яких відносяться насосні агрегати, регулюючі та запірні органи.

У цьому розділі проведено аналіз існуючих схем перекачування нафти та визначено, що схема «з насосу в насос» є найбільш економічно виправданою для проміжних НПС і тому вона отримала широке застосування. Проте для такої схеми перекачування нафти є важливим забезпечити постійний гідродинамічний режим нафтопроводу. Методи регулювання тиску на НПС можна розділити на методи, які впливають на потік нафти шляхом зміни продуктивності насосних агрегатів та методи, які змінюють протік нафти шляхом дроселювання. Аналіз цих методів показав, що економічно доцільнішим є метод дроселювання потоку нафти на виході НПС.

Основним напрямом досліджень визначено створення системи автоматичного керування гідродинамічним режимом магістрального нафтопроводу, в основі якої лежить метод регулювання тиску у нафтопроводі шляхом дроселювання потоку нафти.

**Другий розділ** присвячено дослідженню елементів і систем, які мають безпосередній вплив на гідродинамічний режим магістрального нафтопроводу та розробці їх математичних моделей.

Було визначено, що найбільш доцільно для дроселювання потоку нафти на магістральному нафтопроводі використовувати поворотну заслінку (ПЗ). Перш за все на основі експериментально отриманих даних було побудовано модель ПЗ. Ця модель відображає нелінійність її статичної характеристики (рис.1).

Якщо ПЗ повністю відкрита, то вона практично не створює перепаду тиску; значення перепаду на рівні 1-2 % від максимального. Коли в процесі регулювання заслінка рухається в сторону закриття від положення повного відкриття, до певного кута повороту заслінки (положення близько 60%) перепад тиску на ній зростає незначно (до 5 % від максимального). При подальшому закритті ПЗ перепад тиску на ній почне поступово збільшуватись. В цій області починає зростати загальний коефіцієнт підсилення об'єкту регулювання. При досягненні положення ПЗ 0-15% відкриття незначні переміщення ПЗ призводять до різкої зміни перепаду тиску на ній.

При отриманні експериментальної характеристики, коли заслінка закрилась до положення 15% відкриття, перепад тиску на ній досягнув значення 19 бар, що спричинило спрацювання системи захисту нафтопроводу, яка відімкнула магістральний насос. Тому отримані експериментальні дані в області положень заслінки 0-15% відкриття дещо спотворені.

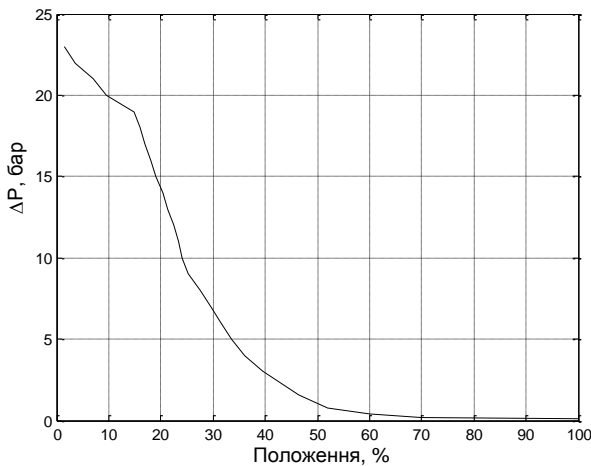


Рис. 1. Експериментальна характеристика залежності перепаду тиску на поворотній заслінці Ду500 від її положення при номінальному режимі роботи нафтопроводу діаметром 700мм (0%- повне закриття, 100%- повне відкриття)

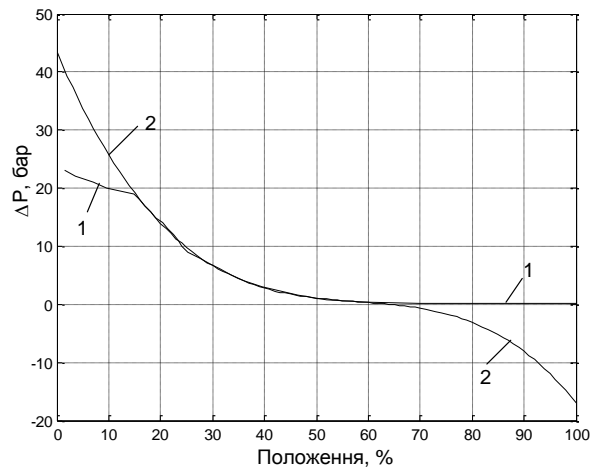


Рис.2. Результат апроксимування експериментальної характеристики перепаду тиску на заслінці поліномом 3-го порядку:  
1 – експериментальні дані; 2 – розрахований поліном 3-го порядку

Отриману експериментальну характеристику було апроксимовано поліномом 3-го порядку.

$$\Delta P = -199,62 \cdot 10^{-6} \cdot S^3 + 34,772 \cdot 10^{-3} \cdot S^2 - 2,0836 \cdot S + 43,271, \quad (1)$$

де  $\Delta P$ - перепад тиску на заслінці, бар;  $S$ - положення заслінки, 0-100%.

Результати перевірки апроксимації за полінома 3-го порядку у всьому діапазоні переміщення заслінки наведені на рис.2, максимальна абсолютна

похибка у зоні «ефективного регулювання» (15-60%)  $\Delta=0.49$  бар, відносна похибка  $\delta=2.64\%$ . Як видно з рис.2, одержаний поліном достатньо точно описує експериментальні дані на ділянці 15% - 60%, але є суттєві відхилення на суміжних ділянках. Оскільки, на ділянці 0 – 15% експериментальні дані спотворені та при дроселюванні потоку нафти ПЗ майже ніколи не доходять до цього положення, адже це може призвести до повної зупинки НПС та нафтопроводу загалом, тому в цьому діапазоні часто вводять обмеження на допустиме закриття заслінки, відповідно результат апроксимації у межах положень 0-60% можна вважати задовільним. На ділянці 60 – 100% характеристику ПЗ було замінено лінійною залежністю.

Отримана математична модель ПЗ має наступний вигляд :

$$\begin{cases} \Delta P = -199,62 \cdot 10^{-6} \cdot S^3 + 34,772 \cdot 10^{-3} \cdot S^2 - 2,0836 \cdot S + 43,271; & S \in [0:60] \\ \Delta P = 0,316; & S \in [60:100] \end{cases} \quad (2)$$

де  $\Delta P$ - перепад тиску на заслінці, бар;  $S$  - положення заслінки, 0-100%.

Основні вимоги до виконавчого механізму (ВМ), що переміщає ПЗ на НПС, є можливість долати великі моменти на валу ПЗ та вибухобезпечне виконання, тому для переміщення ПЗ вибрано електричний ВМ типу МЕО. Цей ВМ оснащений асинхронним двигуном, змінюючи частоту живлення якого можна змінювати швидкість переміщення ПЗ.

Оскільки математична модель такого ВМ - це ідеальна інтегровальна ланка, то враховуючи час повного ходу 12сек. та переміщення 0-100% функція передачі ВМ наступна:

$$W(p) = \frac{100}{12p} \quad (3)$$

Для реалізації імпульсного вихідного сигналу на ВМ пропонується застосувати схему без зворотного зв'язку за положенням ВМ, яка складається з трипозиційного реле, охопленого зворотнім зв'язком через інтегровальну ланку, яка відтворює ВМ (рис.3). Така схема дозволила уникнути збурень внаслідок похибки давача положення ВМ, наявності люфтів у ВМ та інших гістерезисів.

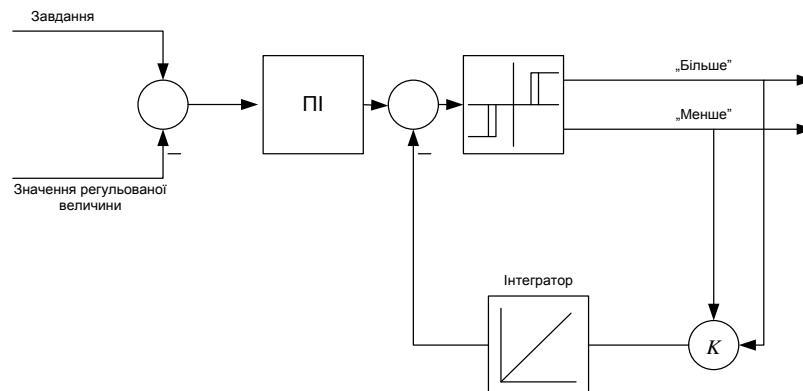


Рис.3. Схема реалізації імпульсного виходу без застосування зворотного зв'язку за положенням виконавчого механізму



Зазвичай в схемах регулювання тиску нафти на НПС застосовується дроселювання на нагнітанні станції. В зв'язку з цим пропонується реалізація системи регулювання, що показана на рис.4. Вона включає об'єкт регулювання магістральний нафтопровід, параметри гідродинамічного режиму якого підлягають зміні або стабілізації. Оскільки в магістральному нафтопроводі відбувається спільне одночасне регулювання двох параметрів насосної станції, одним з яких є тиск на вході НПС, а іншим – тиск на виході станції після регулюючого органу, така система є двовимірною. Чутливими елементами схеми є давачі, встановлені на лінії всмоктування і на лінії нагнітання. Вони встановлюються поблизу місця відбору й здійснюють дистанційний вимір тиску в точці контролю. На схемі зображений регулюючий пристрій, у якому відбувається формування сигналу на переміщення виконавчого механізму 1-6. Регулюючий пристрій складається з двох регуляторів, вихідний сигнал з яких надходить на елемент порівняння 1-4, на вихід з якого пропускається більший з двох сигналів. Регулятор тиску на виходу є прямої дії (закриття регулюючого органу призводить до зменшення регульованого параметру), а регулятор тиску на входу – зворотної. Завдяки цьому два регулятори здійснюють регулюючий вплив за допомогою одного регулюючого органу та не наносять збурення в роботу один одного.

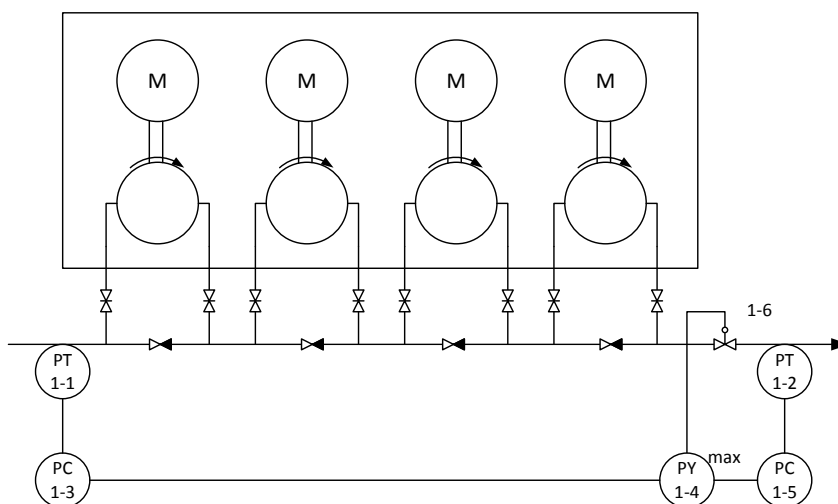


Рис.4. Спрощена функціональна схема системи регулювання тиску в насосній

У розробленій системі автоматичного регулювання (САР) порівнюються два неперервні (аналогові) виходи регуляторів, на основі вибраного селектором більшого з виходів регуляторів формується імпульсний вихід.

До застосування у САР тиску на НПС, згідно СОУ 60.3-31570412.012:2005, пункт 6.2.6.9, рекомендуються ПІД регулятори. Диференційна складова є корисною для подолання запізнь притаманних пневматичним системам керування, які широко використовуються на даний момент. Досвід застосування пневматичних ПІД регуляторів показує що диференційна складова є шкідливою у момент спрацювання системи, коли поворотна заслінка досягнула зони ефективного регулювання. Вона призводить до коливання заслінки у потоці нафти, що спричиняє поширення нафтопроводом хвиль зміни тиску, які

відбиваються від сусідніх НПС, повертаються і викликають нові коливання, спричинені диференційною складовою. В той же час, якщо час диференціювання вибраний таким, що забезпечує відсутність коливань тиску, то швидкість випередження збурення буде недостатньою. У деяких реалізаціях диференційна складова працює лише у визначених межах положення регулюючого органу. Тому у розробленій САР використовується ПІ регулятор.

Досліджуючи роботу цифрових ПІ регуляторів побудованих на основі диференційних рівнянь (position algorithm) (4) та рекурентних рівнянь (velocity algorithm) (5,6) особливу увагу було приділено явищу «пропорційного стрибка» (proportional kick).

$$x_{вих(n)} = K_p (\varepsilon_n + z_{n-1} + \frac{\Delta t}{T_i} \varepsilon_n), \quad (4)$$

де  $x_{вих}$  - вихід ПІ регулятора,  $K_p$  – коефіцієнт пропорційної складової,  $\varepsilon$  - розузгодження між завданням і поточним значенням регульованої величини,  $\Delta t$  – час дискретизації цифрового ПІ регулятора,  $T_i$  – коефіцієнт інтегральної складової,  $z_{n-1}$  - попереднє значення інтегральної складової.

$$x_{вих(n)} = x_{вих(n-1)} + \Delta x_{вих} \quad (5)$$

$$\Delta x_{вих} = K_p (\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) + \frac{1}{T_i} \varepsilon_n \Delta t \quad (6)$$

де  $\Delta x_{вих}$  – різниця між поточним та попереднім значеннями виходу цифрового ПІ регулятора.

Явище «пропорційного стрибка» виникає в цифровому ПІ регуляторі побудованому на основі рекурентних рівнянь, внаслідок того, що зміна пропорційної складової визначається зміною розузгодження завдання та заданого значення (рис.5). У спеціалізованій літературі це явище згадується як шкідливе, адже воно спричиняє небажані рухи ВМ при зміні завдання.

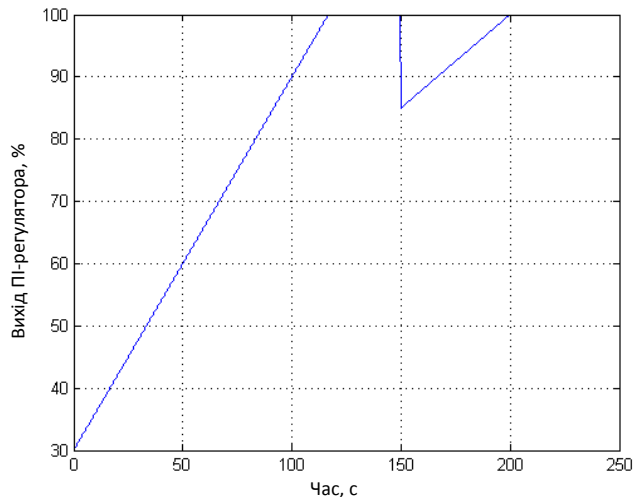


Рис.5. Вихідний сигнал цифрового ПІ регулятора побудованого на основі рекурентних рівнянь при миттєвому зменшенні розузгодження з 2 до 1 бар

Використання «пропорційного стрибка» у побудованому цифровому ПІ регуляторі дає можливість швидше реагувати на різкі стрибки тиску у нафтопроводі, адже зміна знаку пропорційної складової відбувається швидше ніж зміна знаку розузгодження. Це дозволило компенсувати вищеописану відсутність диференційної складової регулятора.

**Третій розділ** присвячено побудові моделі та дослідженні системи керування гідродинамічним режимом магістрального нафтопроводу.

Для того, щоб наблизити динамічну характеристику комплексу ПЗ-ВМ до лінійної, тобто забезпечити сталу зміну перепаду тиску на ПЗ у часі, запропоновано для керування асинхронним двигуном ВМ застосувати частотнокерований привід з можливістю зміни частоти живлення двигуна в межах від 0 до 100 Гц. Крім того застосування частотнокерованого приводу дозволив одержати інші переваги - забезпечити плавні пуски двигуна та збільшити допустиму кількість ввімкнень двигуна за одиницю часу за рахунок багатократного зменшення перевантажень в момент пуску.

Для одержання залежності швидкості переміщення від положення ПЗ у «зоні ефективного регулювання» було знайдено похідні до зворотних залежностей  $\Delta P = f(t)$  для переміщення ПЗ при постійній швидкості ВМ та для бажаної лінійної динамічної характеристики. Відношення цих похідних і є шуканою залежністю:

$$Z(\Delta P_{ПЗ}) = \frac{dt}{d\Delta P_{лін}} / \frac{dt}{d\Delta P_{ПЗ}}, \quad (7)$$

де:  $\Delta P_{лін}$  – перепад тиску при лінійній динамічній характеристиці,  $\Delta P_{ПЗ}$  – перепад тиску при постійному часі повного ходу ВМ – 12 с, бар.

Ця залежність була апроксимована поліномом 3-го порядку і, враховуючи залежність  $\Delta P_{ПЗ} = f(S)$ , була подана у формі:

$$Z(S) = 1.2791 \cdot 10^{-5} \cdot S^3 + 1.6702 \cdot 10^{-4} \cdot S^2 - 1.6148 \cdot 10^{-2} \cdot S + 0.36226, \quad (8)$$

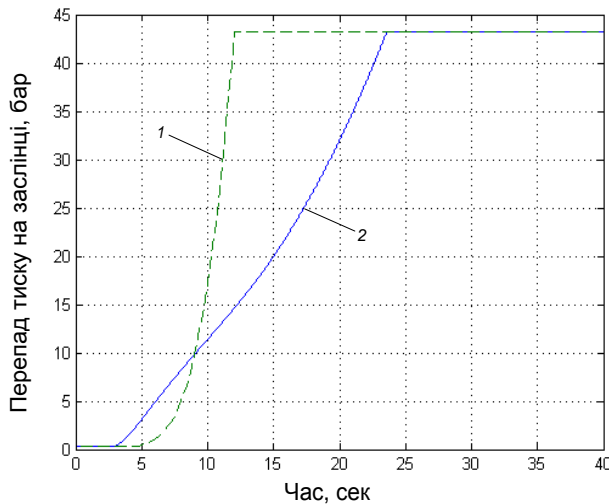
де  $Z$  – коефіцієнт швидкості ВМ ( $Z = 1$  при номінальній швидкості 50 Гц),  $S$  – положення заслінки ( $S = 100\%$  при повному відкритті).

Запропонований алгоритм переміщення ПЗ має наступний вигляд:

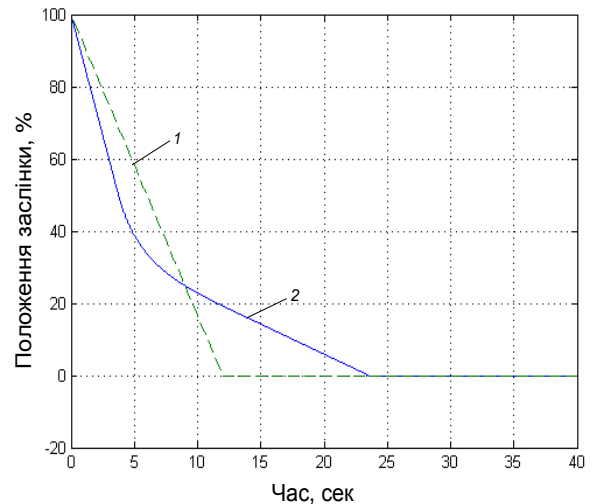
- 1) у межах положень 50-100% відкриття ПЗ її переміщення у сторону закриття здійснюється з максимальною швидкістю шляхом подачі частоти живлення асинхронного двигуна ВМ 80 Гц;
- 2) у межах 15-50% - зміну швидкості ВМ здійснюється згідно отриманої залежності (8);
- 3) у межах 0-15% переміщувати ПЗ з мінімальною швидкістю, що відповідає частоті живлення 10 Гц.
- 4) при реверсивному ході ВМ (відкриття заслінки) частота живлення буде незмінною та становить 10 Гц (час повного ходу 60 с). Таке рішення прийняте для того, щоб при відкритті заслінки зміна перепаду тиску не була швидкою і не наносилось надмірне гідравлічне збурення у трубопроводі.

Результати моделювання комплексу ПЗ-ВМ зображені на рис.6 та рис.7

Аналіз рис.6 показує, що при застосуванні частотного перетворювача для зміни швидкості ВМ вдалося досягти наближення динамічної характеристики комплексу ПЗ-ВМ у зоні «ефективного регулювання» до лінійної. Отримана характеристика не повністю лінійна тому, що для полегшення реалізації алгоритму на мікропроцесорному контролері отриману залежність швидкості переміщення ВМ від положення ПЗ було апроксимовано залежністю 3-го порядку (8); проте такий результат повністю задовольняє поставлені вимоги.



*Рис.6. Динамічна характеристика комплексу ПЗ-ВМ при зміні швидкості переміщення ВМ (2) та при постійній швидкості (1)*



*Рис.7. Переміщення заслінки при зміні швидкості переміщення ВМ(2) та при постійній швидкості (1)*

Систему регулювання тиску на НПС пропонується зробити двовимірною, тобто, відбувається спільне одночасне регулювання двох параметрів – тиску на вході та виході НПС. Регулюючий пристрій складається з двох регуляторів та селектора, який пропускає більший сигнал на трипозиційне реле, що формує імпульси для ВМ (рис.8). Регулятори не впливають на роботу один одного, наприклад, при зупинці насосного агрегату на попередній до досліджуваної НПС відбувається падіння тиску на вході досліджуваної НПС; селекторний пристрій перемикається на регулятор тиску на вході і ПЗ починає закриватися. Тиск на виході НПС після ПЗ у цей час зменшується, але регулювання по виходу не працює. Імовірність такої ситуації, коли одночасно відбувається велике збурення по тиску на вході та на виході НПС вкрай мала, внаслідок таких збурень спрацює система аварійного захисту, вимкнуться перекачувальні насоси і НПС зупиниться. Тобто, при такому рідкісному збуренні не спрацює жодна система регулювання гідродинамічного режиму і такий випадок однозначно розглядається як гарантоване аварійне вимкнення. Для полегшення моделювання реакції системи на різні збурення система регулювання була розділена на систему регулювання тиску на виході НПС та на вході НПС.

Об'єктом регулювання (ОР) системи регулювання тиску після НПС є ділянка нафтопроводу від ПЗ та до давача тиску на виході НПС. Функцією передачі такого об'єкта є аперіодична ланка першого порядку, коефіцієнт підсилення (КП) якої залежить від гідравлічного опору ділянки:

$$K = \frac{2F}{C_R^2}, \quad (9)$$

де  $F$  - витрата нафти, м<sup>3</sup>/год;  $C_R$  - гідравлічний опір трубопроводу.

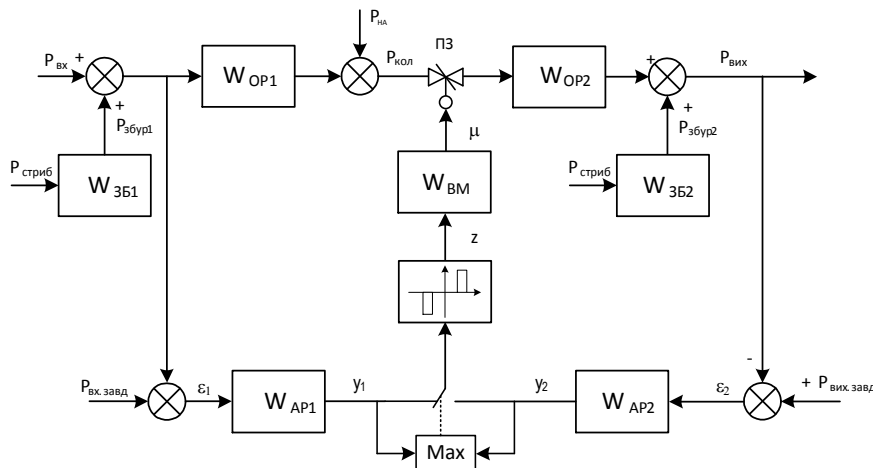


Рис. 8. Структурна схема системи регулювання тиску на НПС.

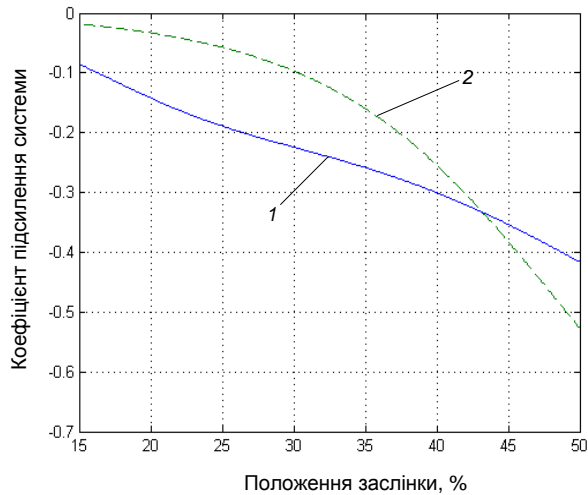
ЗБ 1,2 - канал збурення по вхідному та вихідному тиску;  $P_{збур\ 1,2}$  - тиск збурення;  $P_{стриб}$  - стрибкодібна зміна тиску;  $P_{вх}$  - тиск на вході НПС;  $P_{кол}$  - тиск у колекторі,  $P_{на}$  - тиск після насосних агрегатів;  $P_{вих}$  - тиск на виході НПС; ОР 1,2 - об'єкт регулювання;  $P_{вх.завд}$  - задане значення тиску на вході НПС;  $P_{вих.завд}$  - задане значення тиску на виході НПС;  $\varepsilon_{1,2}$  - розузгодження; АР1,2 - автоматичний регулятор;  $z$  - імпульсний сигнал; ВМ - виконавчий механізм;  $\mu$  - кут повороту поворотної заслінки; ПЗ - поворотна заслінка.

Гідравлічний опір ділянки залежить від гідравлічного опору який створює ПЗ, тому при моделюванні вони розглядались у комплексі ОР-ПЗ. КП такого комплексу змінюється нелінійно, внаслідок чого ускладнюється регулювання такого об'єкта.

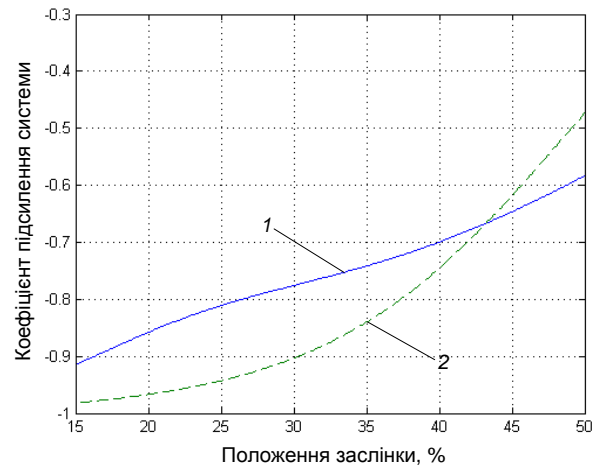
Запропонований нами метод керування ВМ дозволяє компенсувати нелінійну зміну КП системи регулювання за рахунок зміни КП регулятора, яка відбувається при зміні часу повного ходу ВМ (рис.9, 10). Зміна КП комплексу АР-ВМ (10) відбувається внаслідок того, що неперервний вихід ПІ регулятора спершу диференціюється трипозиційним реле охопленим від'ємним зворотнім зв'язком через інтегральну ланку, а потім інтегрується на ВМ. Таким чином змінюючи час повного ходу ВМ можна змінювати КП комплексу АР-ВМ.

$$K_{АР-ВМ} = \frac{T_{IH} K_{ВМ} K_{П}}{K_{IH} T_{ВМ}} \quad (10)$$

де  $K_{ВМ}$  - коефіцієнт підсилення ВМ,  $T_{ВМ}$  - час повного ходу ВМ,  $K_{IH}$  - коефіцієнт підсилення інтегрувальної ланки,  $T_{IH}$  - стала часу інтегрувальної ланки,  $K_{П}$  - коефіцієнт підсилення ПІ регулятора.

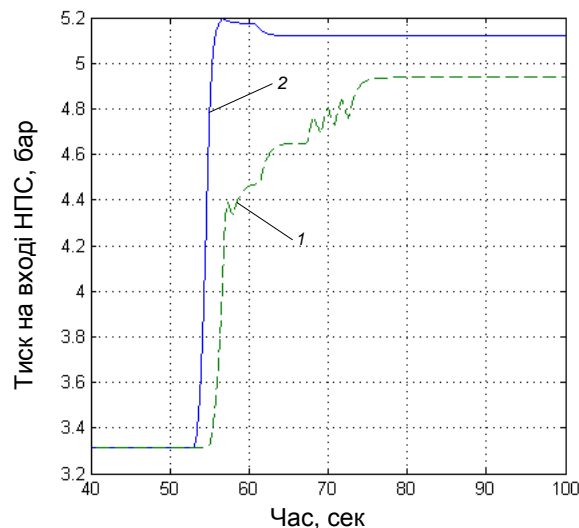


*Рис. 9. Зміна коефіцієнту підсилення системи при збуренні каналом збурення. 1 - для системи зі змінним часом повного ходу ВМ, 2 – для системи з постійним часом повного ходу ВМ.*



*Рис. 10. Зміна коефіцієнту підсилення системи при збуренні каналом завдання. 1 - для системи зі змінним часом повного ходу ВМ; 2 – для системи з постійним часом повного ходу ВМ.*

**У четвертому розділі** проведено дослідження запропонованої системи керування гідродинамічним режимом магістрального нафтопроводу на різні можливі збурення, спочатку на моделях, а, відтак, на розробленій робочій системі керування.



*Рис.11. Перехідний процес при стрибкоподібній зміні завдання регулятора: 1 – при постійному часі повного ходу ВМ; 2 – при змінному часі повного ходу за розробленим алгоритмом*

Проаналізовані та дослідженні можливі збурення, які можуть мати місце на робочому магістральному нафтопроводі. Розроблена модель системи регулювання тиску нафти на вході НПС у середовищі Simulink була перевірена на збурення:

- стрибкоподібну зміну завдання (рис.11);
- падіння тиску на вході НПС до значення, меншого ніж завдання (рис.12);
- падіння тиску на вході НПС до значення, яке перевищує завдання;

Для порівняння отримані результати співставлялись з реакцією на аналогічне збурення моделі системи оснащеної ВМ постійного часу повного ходу. На рисунках видно, що запропонована система реагує на збурення швидше та без перерегулювання, також відсутні часті коливання ПЗ у потоці.

Аналогічні результати показало дослідження системи регулювання тиску на виході НПС.

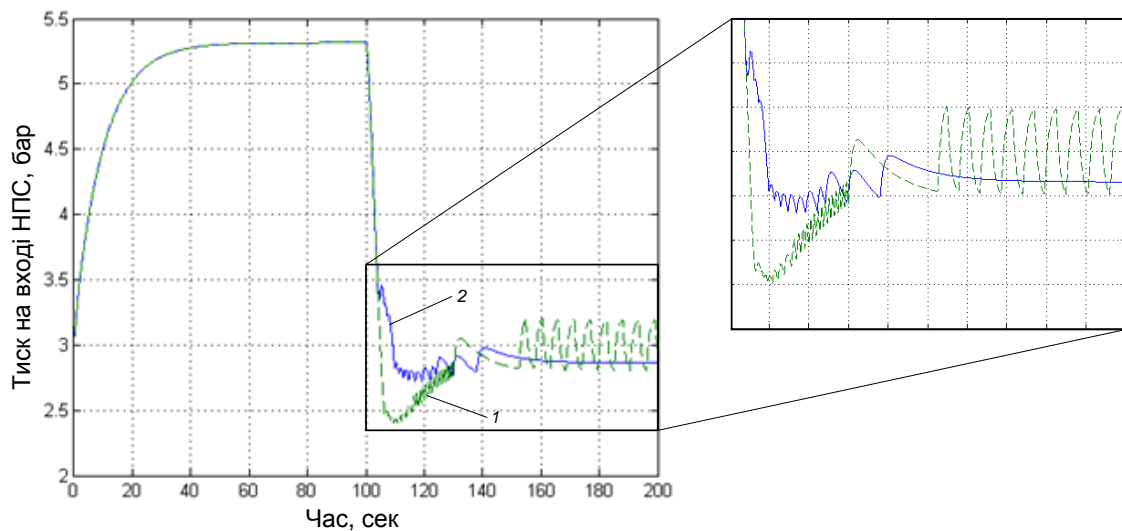


Рис.12. Перехідний процес при нанесенні стрибкоподібного збурення на 7 бар каналом збурення:  
1 – при постійному часі повного ходу ВМ; 2 – при змінному часі повного ходу ВМ за розробленим алгоритмом

Для того, щоб експериментально перевірити результати дослідження було розроблена система регулювання тиску на НПС діючого нафтопроводу. Система регулювання складається з ВМ, давачів тиску та положення ВМ та щита керування (рис.13).

Дані для аналізу процесу регулювання записувались у самописець SIREC D300. На отриманих графіках параметри НПС зображені наступними кольорами:

- червоний - тиск на вході НПС, бар;
- рожевий - тиск на виході НПС, бар;
- світлозелений - завдання тиску на вході НПС, бар;
- синій - завдання тиску на вході НПС, бар;
- блакитний - тиск у колекторі, бар;
- коричневий - перепад тиску на ПЗ, бар.
- фіолетовий - положення ПЗ1, %;
- зелений - положення ПЗ2, %;



*Рис.13. Вигляд зовнішньої та внутрішньої панелі щита системи автоматичного керування тиску на нафтоперекачувальній станції «Плещівка» філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ПАТ «Укртранснафта»*

На рис.14. зображена реакція системи на зміну завдання тиску на вході НПС. Система перебувала у ручному режимі, заслінка повністю відкрита, тиск на вході становив 18,65 бар. Значення завдання було встановлено 19,65 бар. При переключенні у автоматичний режим роботи заслінка закрилась до положення 50% і відбулось плавне підвищення тиску на вході НПС. Як видно з рисунку експериментальна реакція системи добре узгоджується з реакцією розробленої моделі (див.рис.11.).

Далі проводились дослідження реакції системи на збурення у вигляді падіння тиску на вході НПС (рис.15). Для цього було проведено зупинку насосного агрегату на попередній НПС, що призвело до різкого падіння тиску на вході. Слід зазначити, що для дослідження можливості відпрацювання різкого падіння тиску на вході НПС, завдання системи регулювання - 10,51 бар спеціально було встановлено максимально близьким до тиску на вході НПС, який на момент зупинки агрегату попередньої станції був рівним 10,8 бар. Тобто, запас по тиску до спрацювання був мінімально можливим.

Внаслідок такого збурення заслінка закрилась до положення 45%, швидко компенсувавши різке падіння тиску, і далі продовжила плавно закриватись до 35%, підводячи регульовану величину до значення завдання. Максимальне динамічне відхилення становило 1,1 бар, що задовольняє умови роботи САР



тиску згідно вимог нормативних документів. Перехідний процес та переміщення ВМ по характеру зміни аналогічні до змодельованих вище при подібному збуренні (див. рис.12).

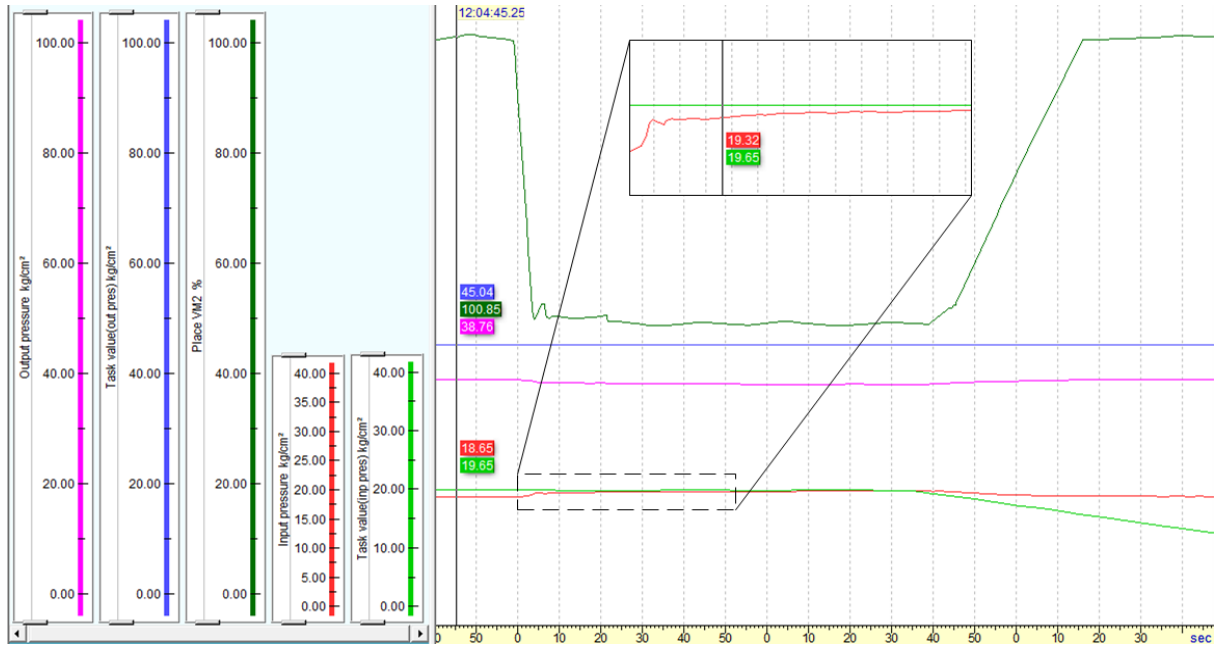


Рис.14. Реакція розробленої системи на зміну завдання по тиску на вході НПС на 1 бар (запис експериментального дослідження)

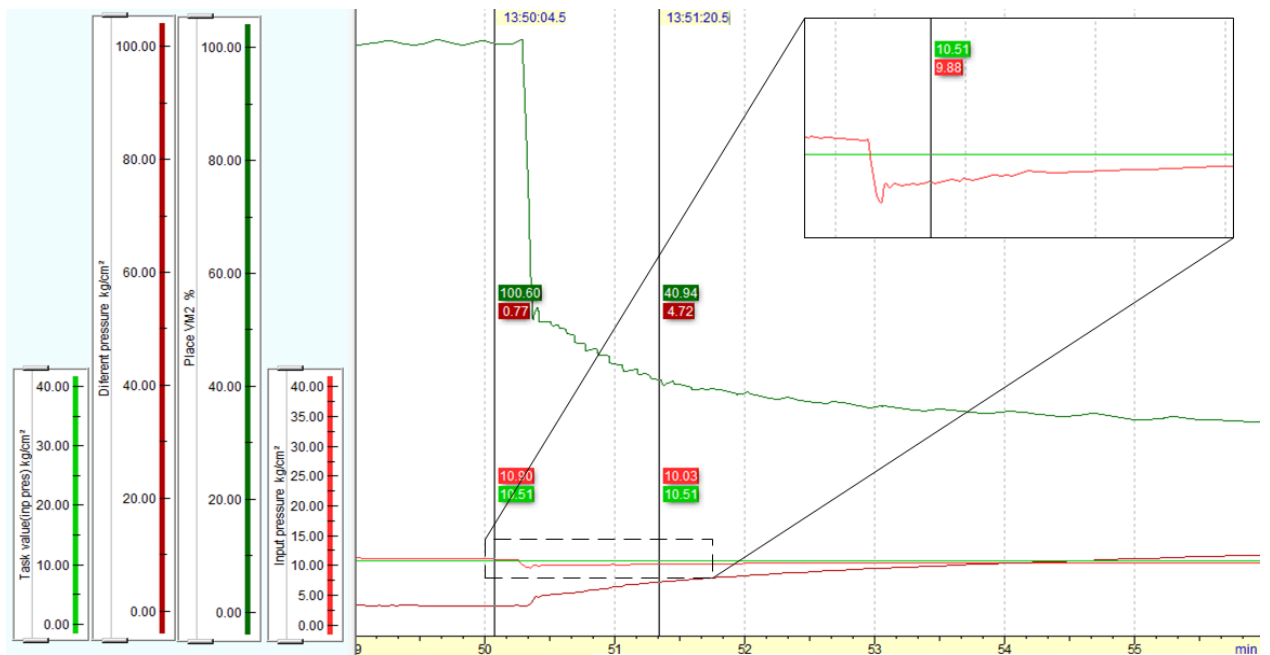


Рис.15. Реакція розробленої системи на збурення у вигляді падіння тиску на вході НПС (запис експериментального дослідження)

Також було досліджено реакцію системи на ввімкнення додаткових насосних агрегатів на НПС, на якій проводилось дослідження.

Як бачимо з графіків на рис.16, в момент часу близько 25 хв відбулося ввімкнення ще одного агрегату на НПС, на якій відбувалось дослідження. Хоча тиск на виході НПС значно менший від завдання, внаслідок різкої зміни цього тиску відбувається закриття регулюючого органу до положення близько 60%. Це сталося внаслідок вищеописаного «пропорційного стрибка» регулятора (рис.5). Оскільки немає потреби в регулюванні тиску на виході станції, то після спрацювання система регулювання плавно виводить заслінку у повністю відкрите положення.

Проведені експериментальні дослідження показують, що всі запропоновані і змодельовані в попередніх розділах складові САР гідродинамічного режиму нафтопроводу дають очікуваний ефект, зокрема кращу якість перехідних процесів, вищу швидкодію, потрібну реакцію на різні види збурення, що суттєво відрізняється від існуючих систем керування.

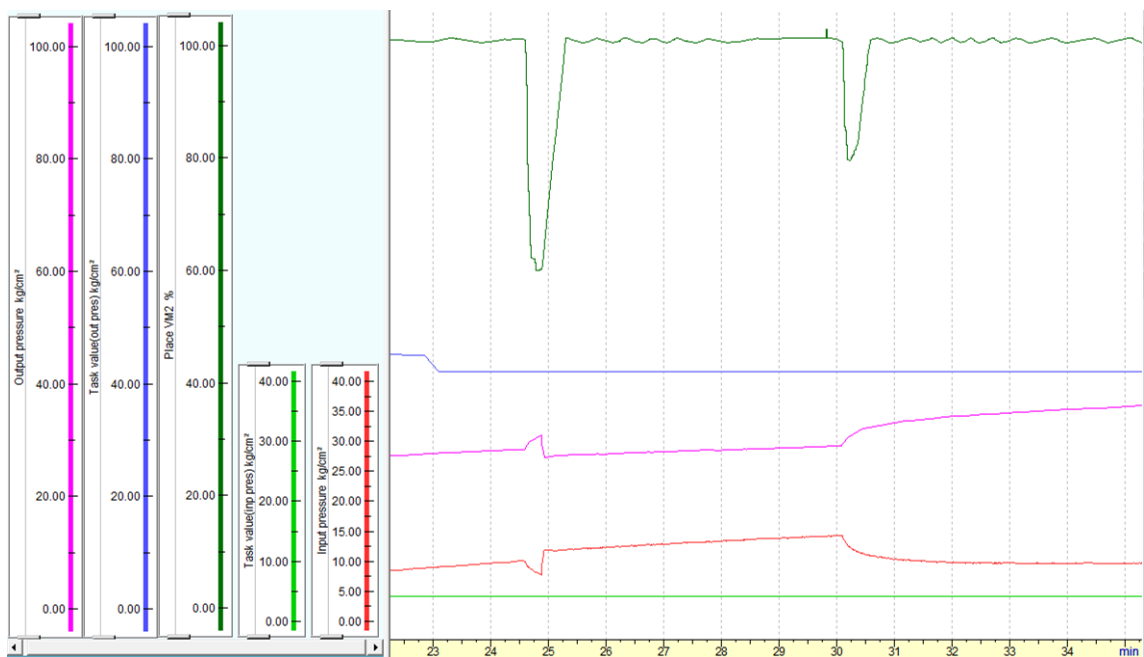


Рис.16. Реакція розробленої системи на ввімкнення ще одного насосного агрегату на НПС, на якій проводилось дослідження (запис експериментального дослідження).

Аналогічний комплекс досліджень був проведений при реалізації САР гідродинамічного режиму на НПС «Плещівка» філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ПАТ «Укртранснафта», де також була впроваджена розроблена система керування. Результати досліджень при таких самих збуреннях аналогічні, тобто, співпадає вигляд перехідних процесів, характер реакції регуляторів на однакові з попередніми дослідженнями збурення і факт відпрацювання САР всіх потенційно можливих збурень на НПС.

На основі проведених експериментальних досліджень можна зробити висновок, що одержані структури САР добре відтворюються при їхній технічній реалізації і працездатні на різних НПС, незважаючи на певні відмінності в параметрах технологічного обладнання цих НПС.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науко-прикладна задача, яка полягає у розробленні нової системи автоматичного керування гідродинамічним потоком магістрального нафтопроводу. При цьому отримані такі основні результати:

- 1) проведений аналіз існуючих методів регулювання тиску на НПС та обґрунтовано подальший розвиток методу регулювання тиску на НПС шляхом дроселювання потоку нафти, особливістю якого є новий підхід щодо реалізації регулюючої дії, а саме зміна швидкості переміщення поворотної заслінки залежно від її положення, що дозволило покращити швидкодію системи регулювання тиску та якісні показники процесу регулювання;
- 2) досліджено комплекс поворотна заслінка – виконавчий механізм та запропоновано вдосконалення його роботи шляхом введенням зміни швидкості переміщення заслінки, в залежності від її положення, що дозволяє лінеаризувати динамічну характеристику цього комплексу; розробити структуру регулятора тиску на НПС. Побудовано модель досліджуваного та вдосконаленого комплексу;
- 3) запропонована система керування гідродинамічним режимом НПС та розроблена її модель, яка відрізняється від існуючих застосуванням структури цифрового ПІ-регулятора, яка побудована на основі рекурсивних рівнянь, що дозволяє значно підвищити швидкодію при різких змінах тиску;
- 4) запропонований алгоритм реалізації зміни швидкості переміщення заслінки, що дозволило зменшити діапазон зміни коефіцієнту підсилення системи;
- 5) розроблена система автоматичного керування гідродинамічним режимом магістрального нафтопроводу та проведені експериментальні дослідження на реальному нафтопроводі;
- 6) запропонований алгоритм зміни швидкості переміщення заслінки від її положення, може бути застосований для будь-яких заслінок та кульових кранів, які використовуються для регулювання витрати та тиску великих потоків;
- 7) розроблена система регулювання тиску на НПС впроваджена на станціях «Новини» та «Плещівка», які входять до складу філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ПАТ «Укртранснафта». Впроваджені системи дозволили скоротити кількість аварійних зупинок НПС, підвищити швидкодію системи і покращити якість відпрацювання збурень гідродинамічного режиму.
- 8) виключена необхідність примусового дроселювання потоку нафти при включенні та переключенні насосних агрегатів на НПС, із реалізованою системою регулювання та наступною і попередньою НПС за потоком. Це дозволяє заощадити сотні кВт електроенергії щорічно.
- 9) застосування частотного перетворювача дозволило гнучко змінювати час повного ходу, в зв'язку з цим час проходження зони неефективного регулювання у порівнянні з стандартним виконавчим механізмом зменшився на 37%, що дозволило підвищити швидкодію системи.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:*

1. Kril S., Fedoryshyn R., Kri O., Pistun Y.. Investigation of Functional Diagrams of Step PID Controllers for Electric Actuators // *Procedia Engineering*. –2015. –№100. – P.1338–1347
2. Кріль Б.А., Кріль С.О. Покращення якості регулювання під час застосування частотного приводу для електромоторного виконавчого механізму // *Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація: Вісник НУ “ЛП”*. – 2011. – №712. – С.156-159.
3. Кріль С.О. Дослідження та моделювання комплексу поворотна заслінка – виконавчий механізм на магістральному нафтопроводі // *Методи та прилади контролю якості*. – Івано-Франківськ. – 2013. – С.84-88.
4. Кріль С.О. Переваги застосування поворотної заслінки для регулювання витрат великих потоків // *Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація: Вісник НУ “ЛП”*. – 2014. – №792. – С.65-69.
5. Кріль С.О. Застосування цифрових регуляторів у системі автоматичного регулювання тиску на нафтоперекачувальній станції // *Вісник інженерної академії*. –Київ. –2015. – №1 –С.218-224.
6. Кріль С.О. Система автоматичного регулювання тиску на НПС з виконавчим механізмом із змінним часом повного ходу // *Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр.* – К.: Век+, – 2015. – № 62. – С.71-78.

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

7. Кріль С.О. Застосування частотнорегульованого приводу для покращення характеристик імпульсного регулятора // *Збірник матеріалів I Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, студентів та аспірантів “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”*. - Київ. - 2011. – С.30-31.
8. Кріль Б.А., Кріль С.О. Покращення характеристик систем імпульсного регулювання при застосуванні частотного приводу для електромоторного виконавчого механізму // *Збірник матеріалів XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління “Автоматика - 2011”*. – Львів. – 2011. – С.400.
9. Кріль С.О. Дослідження характеристик комплексу поворотна заслінка – виконавчий механізм // *Збірник тез доповідей 4-ої науково-практичної конференції студентів і молодих вчених "Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання"*. – Івано-Франківськ. - 2013. – С.84-86.
10. Кріль С.О., Кріль Б.А., Кріль О.В. Дослідження впливу поворотної заслінки на гідродинамічний режим нафтопроводу // *Збірка тез доповідей 4-ої міжнародної конференції "Electric power engineering&control systems 2013" (EPESCS-2013)*. – Львів. – 2013. – С.82-83.

## АНОТАЦІЯ

**Кріль С.О.** Автоматизація процесу керування гідродинамічним режимом магістрального нафтопроводу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування. – Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Львів, 2017 р.

Дисертація присвячена розробці нової ефективної системи автоматичного керування гідродинамічного режиму магістрального нафтопроводу, що дозволить підвищити надійність роботи нафтопроводу та зменшити економічні втрати при транспортуванні нафти. В роботі отримав подальший розвиток метод регулювання тиску на НПС шляхом дроселювання потоку нафти, особливістю якого є запропонована зміна швидкості переміщення поворотної заслінки залежно від її положення, що дозволило покращити швидкодію системи регулювання тиску та якісні показники процесу регулювання. Побудовано математичну модель комплексу поворотна заслінка – виконавчий механізм, яка відрізняється від існуючих введенням зміни швидкості переміщення заслінки, в залежності від її положення, і дозволяє лінеаризувати динамічну характеристику цього комплексу. Удосконалено структуру цифрового ПІ-регулятора системи регулювання гідродинамічного режиму нафтопроводу, яка відрізняється від існуючих тим, що вона побудована на основі рекурсивних рівнянь, що забезпечує значне підвищення швидкодії регулятора, при різких змінах тиску, а це дозволяє відреагувати на початку хвилі гідроудару і усунути аварійну ситуацію. Розроблено метод компенсації нелінійності коефіцієнта підсилення системи регулювання тиску на НПС шляхом плавної зміни часу повного ходу виконавчого механізму. Розроблена система регулювання тиску на НПС впроваджена на станціях “Новини” та “Плещівка”, які входять до складу філії “Магістральні нафтопроводи “Дружба” ПАТ “Укртранснафта”. Впроваджені системи дозволили скоротити кількість аварійних зупинок НПС, підвищити швидкодію системи і покращити якість відпрацювання збурень гідродинамічного режиму та зменшити енергозатрати при транспортуванні нафти.

**Ключові слова:** нафтоперекачувальна станція, поворотна заслінка, регулювання тиску, гідроудар, ПІ регулятор, час повного ходу, математична модель.

## АННОТАЦИЯ

**Кріль С.А.** Автоматизация процесса управления гидродинамическим режимом магистрального нефтепровода. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 - Автоматизация процессов управления. - Национальный университет «Львовская политехника» МОН Украины, Львов, 2017г.

Диссертация посвящена разработке новой эффективной системы автоматического управления гидродинамического режима магистрального нефтепровода, которая позволит повысить надежность работы нефтепровода и уменьшить экономические потери при транспортировке нефти. В работе получил дальнейшее развитие метод регулирования давления на НПС путем

дросселирования потока нефти, особенностью которого является предложенное изменение скорости перемещения поворотной заслонки в зависимости от ее положения, что позволило улучшить быстродействие системы регулирования давления и качественные показатели процесса регулирования. Построена математическая модель комплекса поворотная заслонка - исполнительный механизм, который отличается от существующих введением изменения скорости перемещения заслонки, в зависимости от ее положения, и позволяет линеаризовать динамическую характеристику этого комплекса. Усовершенствована структура цифрового ПИ-регулятора системы регулирования гидродинамического режима нефтепровода, которая отличается от существующих тем, что она построена на основе рекурсивных уравнений, обеспечивает значительное повышение быстродействия регулятора, при резких изменениях давления, что позволяет отреагировать в начале волны гидроудара и устранить аварийную ситуацию. Разработан метод компенсации нелинейности коэффициента усиления системы регулирования давления на НПС путем плавного изменения времени полного хода исполнительного механизма. Разработанная система регулирования давления на НПС внедрена на станциях “Новости” и “Плещевка”, которые входят в состав филиала "Магистральные нефтепроводы “Дружба” ОАО “Укртранснафта”. Внедренные системы позволили сократить количество аварийных остановок НПС, повысить быстродействие системы и улучшить качество отработки возмущений гидродинамического режима и уменьшить энергозатраты при транспортировке нефти.

**Ключевые слова:** нефтеперекачивающая станция, поворотная заслонка, регулирования давления, гидроудар, ПИ регулятор, время полного хода, математическая модель.

### ABSTRACTS

Krill Sergii. Automation control hydrodynamic mode of main oil pipeline. - Manuscript.

Dissertation for obtaining scientific degree of Candidate of Technical Sciences by the specialty 05.13.07 – Automation of control processes. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2017.

The thesis is devoted to the development of a new effective automatic control system for the hydrodynamic mode of the main oil pipeline, which will increase the reliability of the pipeline and reduce economic losses during the transportation of oil. The method was developed for regulating the pressure on the oil pumpstation by throttling the flow of oil. Main feature of this method is the proposed change in the speed of the butterfly valve, depending on its position, which improved the speed of the pressure control system and the quality of the control process. A mathematical model of butterfly valve - actuator complex is developed. Changes of butterfly valve speed depending on its position, allows to linearize the dynamic characteristic of this complex. The structure of the digital PI controller of the pipeline's hydrodynamic mode has been improved, which differs from existing ones in that it is built on the basis of recursive equations. This structure provides a significant increase in controller speed, with fast changes in pressure, which allows reacting at the beginning of a shock wave and

eliminating an emergency situation. A method for compensating the nonlinearity of the gain of the pressure control system on the oil pumpstation is developed. This compensation provides by smoothly changing the full stroke time of the actuator. The developed pressure control system on oil pumpstation was implemented at the “Novyny” and “Pleshchivka” stations, which are part of the Druzhba Oil Pipeline branch of Ukrtransnafta .The implemented systems allowed reducing the number of emergency stops of the pumpstations, increasing the control system's speed and improving the quality of reaction on disturbance of hydrodynamic mode and reduce energy losses during oil transportation.

**Key words:** oil pump station, butterfly valve, pressure control, fluid hammer, PI controller, full stroke time, mathematical model.