

# ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПОСЛІДОВНО З'ЄДНАНИХ НАСОСІВ В ПАКЕТІ SIMHYDRAULICS ПРИ ЗМІНІ ПАРАМЕТРІВ ТРУБОПРОВОДУ

*Бур'ян С.О., к.т.н., доц., Печеник М.В., к.т.н., доц., Бабарова А.І., студентка  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем  
та електроприводу*

**Вступ.** Системи водопостачання та водовідведення на сьогоднішній день відіграють важливу роль в забезпеченні життєдіяльності людства, також вони являються невід'ємною частиною багатьох промислових комплексів. На даний час у цих сферах функціонують як одноагрегатні насосні установки (НУ), так і системи з кількома насосами. У багатоагрегатних НУ, в залежності від бажаного функціоналу системи та підтримання режимів роботи, використовують послідовне або паралельне підключення насосів. Не менш важливою задачею в таких системах є забезпечення постійного рівня напору (тиску) в гідравлічній мережі відповідно до необхідної величини, зумовленої як вимогами конкретного промислового технологічного процесу, так і необхідністю забезпечення відповідного рівня побутових умов. Адже, відсутність стабілізації напору, як правило, призводить до зриву технологічного процесу, сприяє виникненню аварійних ситуацій, до зниження рівня експлуатаційної надійності елементів гідравлічної системи. Одним з варіантів вирішення цієї проблеми є використання насосних комплексів з послідовним з'єднанням насосів. Проте до теперішнього часу процес проектування таких систем майже повністю базується на експериментальних даних. Для подальшого підвищення якості проектування, одночасно скорочуючи його строки і витрати, необхідно використовувати сучасні технології і техніки, програмне забезпечення та комп'ютерне моделювання.

Одним із способів дослідження режимів роботи НУ є метод математичного моделювання, але класичний математичний опис роботи насосної установки [1] не повністю відображає складні гідро-механічні процеси, що там протікають. В свою чергу пакет прикладних програм MATLAB пропонує інструмент для моделювання SimHydraulics, в якому в достатньо повному обсязі представлені засоби моделювання гідро мереж. У роботі [2] та [3] показано доцільність використання пакету SimHydraulics для підвищення точності досліджень електромеханічної системи з одним керованим насосом та системи з двома послідовно з'єднаними насосами відповідно.

**Мета роботи.** Проведення порівняльного аналізу результатів дослідження системи віртуальної моделі двох послідовно з'єднаних насосних установок в пакеті SimHydraulics та електромеханічної системи з гідравлічною частиною на основі математичного опису з класичних рівнянь в умовах стабілізації тиску при зміні гідравлічного опору та параметрів трубопроводу.

**Матеріали досліджень.** Пакет SimHydraulics – це окрема бібліотека пакету Simulink середовища MATLAB. Вона поєднує в собі функціональні можливості бібліотек SimPowerSystems, SimMechanics и SimDrivline,

дозволяючи розробникам систем імітувати взаємопов'язану роботу механізмів. Такий інструмент моделювання дозволяє не тільки моделювати режими роботи насосної установки, але й проводити дослідження впливу зміни параметрів трубопроводу в цих режимах.

Розглянемо систему стабілізації тиску НУ з послідовним з'єднанням насосів, структурна схема якої представлена на рис. 1. В такій системі результуючий напір дорівнює сумі напору двох насосів. При цьому один насос є регульованим, інший – нерегульований. Для уникнення високого рівня збурень в гідравлічну мережу для включення останнього використовується пристрій плавного пуску (ППП).

Дана система досліджувалась при таких варіаціях моделей в Matlab: перша – гідравлічна частина представлена блоками пакету SimHydraulics, а друга – моделлю побудованою в середовищі Simulink, гідравлічна частина якої базується на класичних рівняннях, що описують двоагрегатну насосну установку. Класична модель апроксимує характеристики НУ диференціальним рівнянням першого порядку та параболічним рівнянням для визначення напору, в той час як модель побудована в SimHydraulics враховує апроксимацію Q-H та Q-P характеристик. Тому модель в SimHydraulics точніша ніж модель побудована на класичному математичному описі, оскільки Q-H та Q-P характеристики зазвичай параболічні тільки на певному відрізку на різних швидкостях обертання

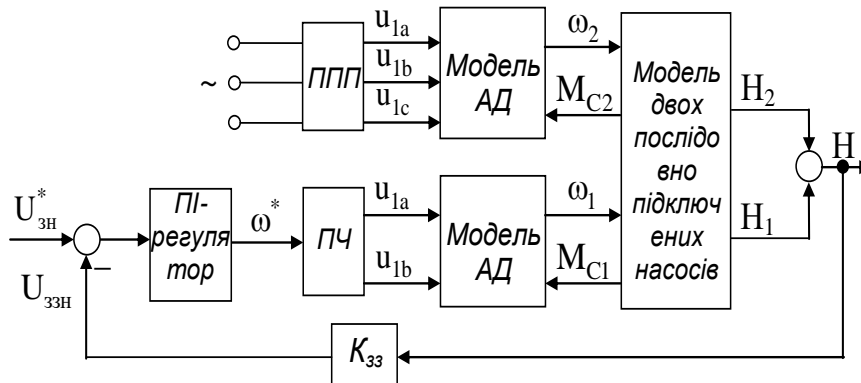


Рисунок 1 – Структурна схема системи керування насосною установкою

На рис. 1 введені наступні позначення:  $U_{зп}^*$  – напруга завдання за тиском;  $\omega^*$  – сигнал завдання швидкості;  $U_{ззп}^*$  – напруга зворотного зв'язку за тиском;  $u_{1a}$ ,  $u_{1b}$ ,  $u_{1c}$  – компоненти вектора напруги статора;  $M_{c1}$ ,  $M_{c2}$  – моменти навантаження, що формують перший та другий насоси відповідно;  $K_{зз}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за тиском;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – кутові швидкості обертання першого та другого двигунів відповідно;  $H_1$ ,  $H_2$  – напори першого та другого насосів відповідно;  $H$  – сумарний напір на виході. Дану систему можна розділити на дві основні частини: механічну, яка містить систему керування асинхронним двигуном та власне двигун, та гідравлічну, яка включає в себе два послідовно з'єднані насоси, резервуар та гідравлічні з'єднання.

Блоки «ЛЧ» та «Модель АД» представляють собою підсистеми, які поєднують в собі модель перетворювача частоти та асинхронного двигуна [4]. Блок «Модель двох послідовно підключених насосів» – це підсистема моделі насоса, тобто гідравлічна частина, яка реалізована за допомогою блоків бібліотеки SimHydraulics. Також модель містить підсистему ПІ-регулятора тиску.

Перехідні процеси в двоагрегатній насосній установці описуються нелінійним диференціальним рівнянням першого порядку [5]:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{H_{01H}}{\chi\omega_{H1}^2}\omega_1^2 + \frac{H_{02H}}{\chi\omega_{H1}^2}\omega_2^2 - \frac{H_{ст}}{\chi} - \frac{1}{\chi}(a_{H1} + a_{H2} + a)Q^2, \quad (1)$$

$$H_1 = \frac{H_{01H}}{\omega_{H1}^2}\omega_1^2 - a_{H1}Q^2, \quad (2)$$

$$H_2 = \frac{H_{02H}}{\omega_{H1}^2}\omega_2^2 - a_{H2}Q^2, \quad (3)$$

$$M_{c1} = \frac{\rho g Q H_1}{\eta_1 \omega_1}, \quad (4)$$

$$M_{c2} = \frac{\rho g Q H_2}{\eta_2 \omega_2}, \quad (5)$$

$$H = H_1 + H_2, \quad (6)$$

де  $Q$  – продуктивність насосів;  $H_{01H}$ ,  $H_{02H}$  – номінальні напори при нульових подачах першого та другого насосів при номінальних швидкостях;  $\omega_{H1}$ ,  $\omega_{H2}$  – номінальні кутові швидкості обертання першого та другого насосів відповідно;  $\chi$  – стала інтегрування;  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  – коефіцієнти корисної дії (ККД) першого та другого насосів відповідно;  $a_{H1}$ ,  $a_{H2}$  – номінальні гідравлічні опори першого та другого насосів відповідно;  $a$  – опір гідравлічної мережі;  $H_{ст}$  – геодезична висота підйому води;  $\rho$  – густина води;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $t$  – час.

Розглянемо реалізовану в SimHydraulics підсистему «Модель двох послідовно підключених насосів», яка зображена на рис. 1 в розгорнутому вигляді в SimHydraulics, як показано на рис. 2. Детальний опис елементів та їх функцій наведені у роботі [2].

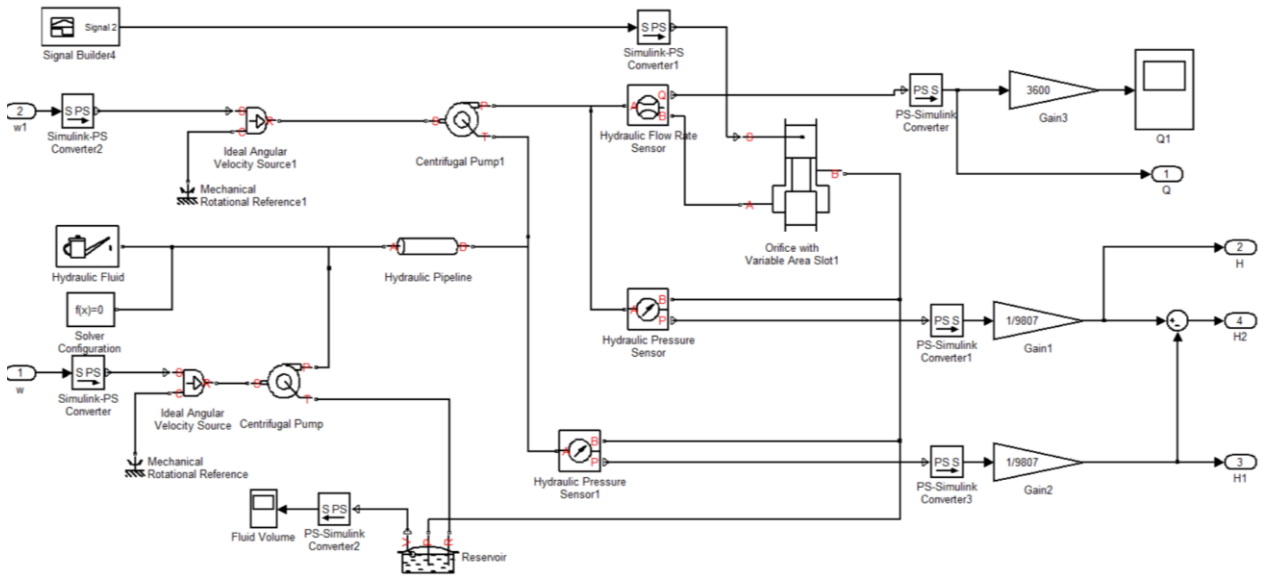


Рисунок 2 – Вигляд підсистеми «Модель двох послідовно підключених насосів»

Для врахування впливу параметрів трубопроводу в пакеті SimHydraulics використовуються наступні елементи, які знаходяться в розділах «Гідравлічні опори (Hydraulic Resistances)» та «Трубопроводи (Pipelines)» пакету, зображення вікон (screenshots) яких наведено на рис. 3 та рис. 4.

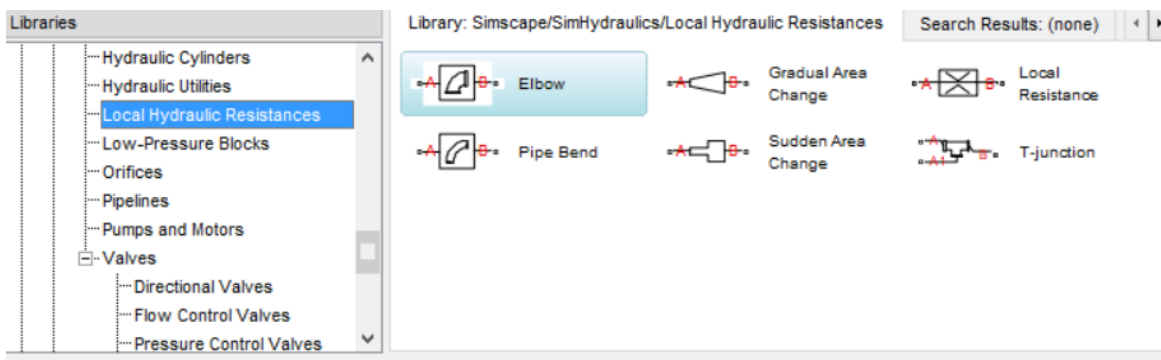


Рисунок 3 – Вікно бібліотеки SimHydraulics розділу Hydraulic Resistances

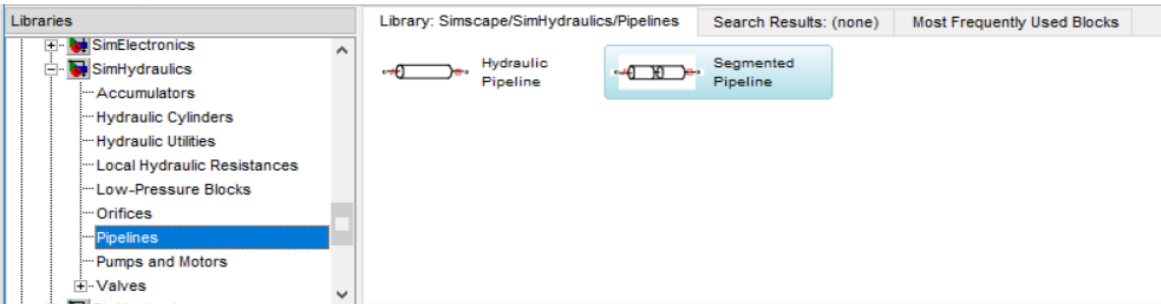


Рисунок 4 – Вікно бібліотеки SimHydraulics розділу Pipelines

При русі реальної робочої рідини по трубопроводах або каналах відбуваються втрати напору, які складаються з опору тертя об стінки та місцевих опорів, що виникають при зміні напрямку або швидкості течії (потoku).

В трубопровідних системах технологічних та енергетичних установок на частку місцевих гідравлічних опорів може приходити до 50% від загального гідравлічного опору системи.

В моделі даних блоків інерція рідини не враховується, в відводі прийнятий турбулентний режим по всій його довжині, відвід виконаний з суцільної труби, при виборі способу параметризації, використовуючи напівемпіричні формули, режим руху рідини приймається турбулентним по всій довжині. Блоки мають два гідравлічних порти А і В, які пов'язані з вхідним та вихідним отворами відводу відповідно.

Блок *Elbow* являє собою відвід як місцевий гідравлічний опір з кутом згину  $0...90^\circ$  та діаметром 5...100 мм. Існує два типи відводів: плавний і з гострою кромкою (колiно).

Блок *Gradual Area Change* представляє собою плавне розширення каналу як місцевий гідравлічний опір, який базується на блоці *Local Resistance*. Блок може виступати в якості *дифузора* (плавне розширення каналу), так і *конфузора* (плавне звуження каналу) в залежності від напрямку протікання рідини.

Блок *Local Resistance* являє собою універсальний місцевий гідравлічний опір будь-якого типу (згин, відвід, фільтр тощо).

Місцеві гідравлічні опори можуть бути симетричними або асиметричними. В симетричних опорах втрати тиску не залежать від напрямку потоку. Для асиметричних опорів, коефіцієнти перепаду тиску повинні описувати як прямий напрямок потоку, так і зворотній.

Блок *Pipe Bend* представляє собою згин труби як місцевий гідравлічний опір. Перепад тиску на згині складається з:

- втрат в прямій трубi (моделюється блоком *Resistive Tube*);
- втрат через згин (моделюється блоком *Local Resistance*).

Блок *Sudden Area Change* являє собою різку зміну перерізу як місцевий гідравлічний опір. Опір представляє різке розширення, якщо рідина тече від порту А до порту В, або різке звуження, якщо рідина протікає в зворотному напрямку. Даний блок базується на блоці *Local Resistance*.

Блок *T-junction* представляє собою трійник як місцевий гідравлічний опір. Даний блок базується на поєднанні трьох блоків *Local Resistance*. Для того щоб визначити втрати тиску для всіх можливих напрямків потоку, повинні бути визначені шість коефіцієнтів втрат тиску.

Гідролініями називаються пристрої, які призначені для об'єднання окремих елементів об'ємного гідроприводу в єдину гідросистему. По ним, в процесі роботи, відбувається рух робочої рідини від одного гідроапарату до іншого.

В гідроприводі розрізняють наступні типи гідроліній:

- усмоктувальна – це гідролінія, по якій робоча рідина рухається до насоса;

- напірна – робоча рідина рухається від насоса або гідроаккумулятора до гідродвигуна;
- зливна - це гідролінія, по якій робоча рідина зливається в гідробак (рухається від гідродвигуна чи регулювального апарату у гідробак);
- гідролінія керування, по якій робоча рідина рухається до пристроїв керування і регулювання;
- дренажна – це гідролінія, яка призначена для відводу втрат (надлишку) робочої рідини в гідробак.

Гідролінії виконуються або у вигляді трубопроводів, або у вигляді каналів в корпусі агрегату.

Обидва блоки розділу *Pipelines* мають два гідравлічних порти А та В, пов'язаних з входним та вихідним отворами трубопроводу відповідно.

Блок *Hydraulic Pipeline* представляє собою гідравлічні трубопроводи з круглим і некруглим перерізом. Блок враховує втрати тиску рідини на тертя по всій довжині трубопроводу.

Блок *Segmented Pipeline* моделює гідравлічні гофровані трубопроводи з круглими секціями. Такі трубопроводи можуть бути представлені набором ідентичних, послідовно з'єднаних сегментів. При моделюванні такого трубопроводу необхідно мати на увазі, що зі зростанням числа сегментів ускладнюється і процес моделювання. Для цього необхідно знайти компромісне вирішення між точністю та складністю обчислювальних операцій.

Розглянемо роботу цих двох моделей при ступінчатій зміні гідравлічного опору в умовах стабілізації тиску на виході насосної установки. В першій моделі, де гідрочастина НУ реалізована за допомогою SimHydraulics зміна параметрів трубопроводу застосовувалась з використанням блоку *Hydraulic Pipeline*, у вікні параметрів якого змінюємо параметр довжини трубопроводу: 10, 25 та 75 метрів. Блок *Hydraulic Pipeline* знаходиться між двома послідовно з'єднаними насосами. Виконавши моделювання при цих варіаціях, отримаємо графіки для порівняння перехідних процесів у двох моделюючих програмах та визначимо як залежить характер стабілізації напору системи від зміни відстані між насосами. На рис. 5-7 (червона лінія – модель з насосом на основі рівнянь, чорна – гідравлічна частина виконана в SimHydraulics) зображені графіки перехідних процесів при відстані між насосами 10, 25 та 70 метрів відповідно.

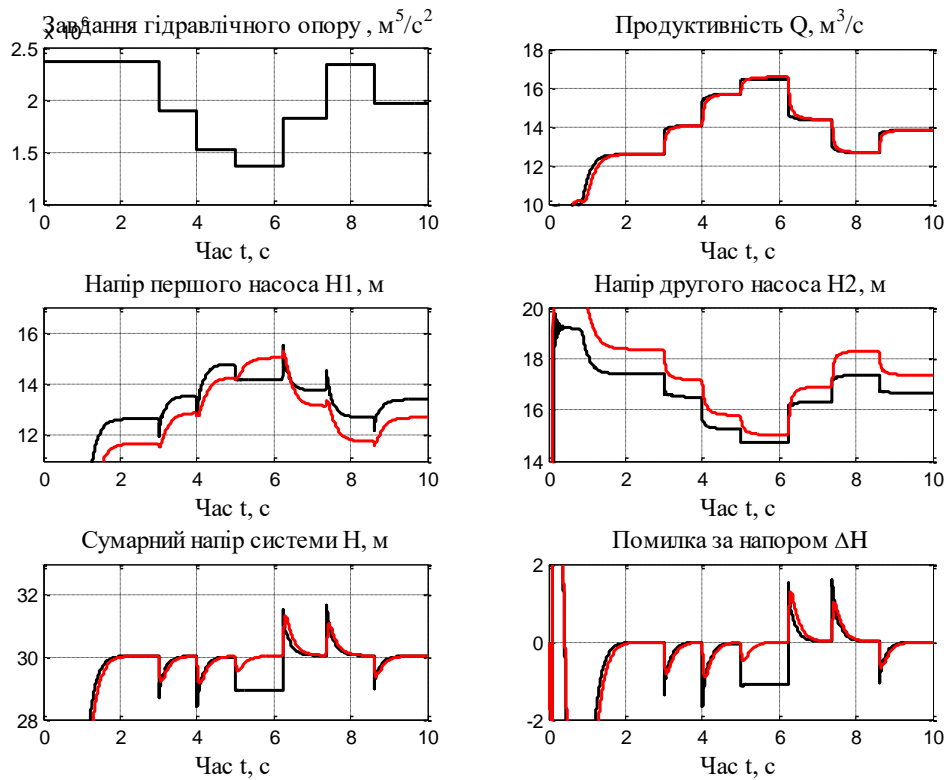


Рисунок 5 – Графіки перехідних процесів при моделюванні двох моделей НУ при ступінчатій зміні гідравлічного опору  $a$  та завданні параметру довжини трубопроводу 10 м

Як видно з графіків на рис. 5, при ступінчатій зміні завдання гідравлічного опору продуктивність обох моделей однакова, напір стабілізується, проте з різними перехідними процесами. Також слід відмітити, що при дискретній зміні гідравлічного опору, коли він спочатку зменшується, а потім наступним кроком збільшується (проміжок часу 4.5 – 6.2 с ) напір системи не стабілізується у задане значення, що відображає модель в SimHydraulics. На модель на основі рівнянь дана зміна не впливає, так як вона не враховує всі властивості гідромережі, також це відображається на графіку перехідного процесу помилки за напором.

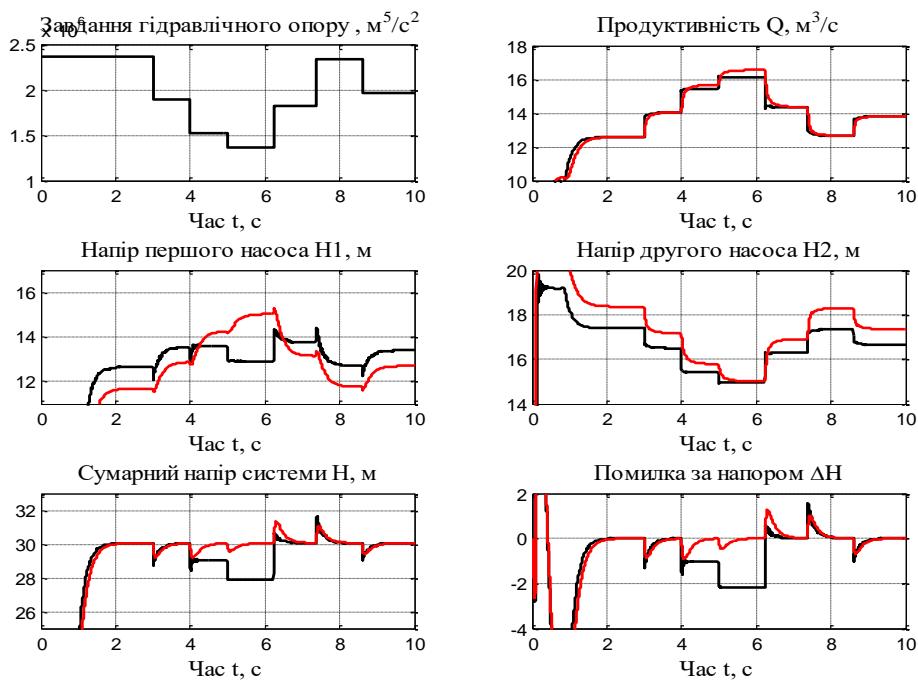


Рисунок 6 – Графіки перехідних процесів при моделюванні двох моделей НУ при ступінчатій зміні гідравлічного опору  $a$  та заданні параметру довжини трубопроводу 25 м

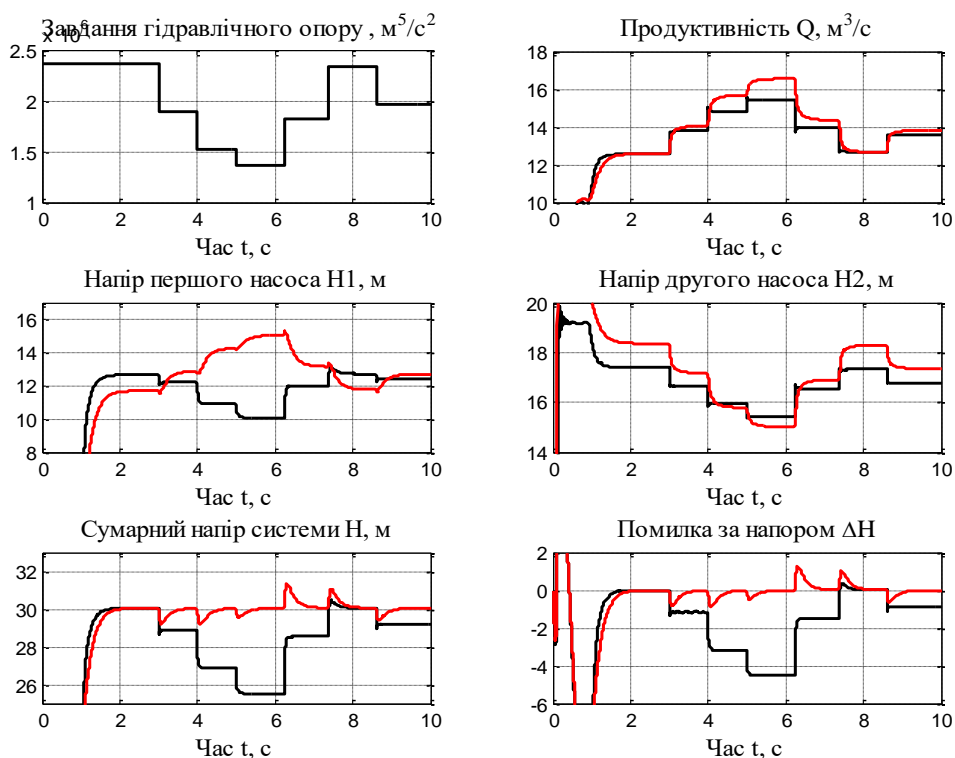


Рисунок 7 – Графіки перехідних процесів при моделюванні двох моделей НУ при ступінчатій зміні гідравлічного опору  $a$  та заданні параметру довжини трубопроводу 75 м



З рисунків 6 та 7 видно, що модель в SimHydraulics реагує на збільшення параметру довжини трубопроводу між насосами, а саме продуктивність установки на деяких проміжках зміни гідравлічного опору зменшується, а напір системи зі збільшенням даного параметру перестає стабілізуватися, відповідно похибка за напором також збільшується та максимально набуває значення 4.2 м, що не задовольняє вирішенню задачі стабілізації тиску.

Так як у моделі на основі класичного математичного опису двоагрегатної насосної установки неможливо задати зміну параметру трубопроводу, поведінка перехідних процесів на рис. 5 – рис. 7 залишається однаковою, що й показує доцільність використання пакету SimHydraulics для більш точного аналізу перехідних процесів системи при проектуванні гідромереж та насосних комплексів.

**Висновки.** В роботі показаний порівняльний аналіз використання пакету SimHydraulics для дослідження систем автоматизації багатоагрегатних насосних установок з послідовним з'єднанням насосів та моделі з класичним математичним описом системи. Математична модель, розроблена в SimHydraulics, дозволяє підвищити точність досліджень за рахунок використання розширеного методу апроксимації робочих характеристик насоса, використання блоків для моделювання реальної фізичної насосної станції, де можна вказати різні параметри трубопроводів, згинів трубопроводу та ін. Отримані результати можна використовувати при проектуванні та дослідженні нових систем автоматизації насосних установок з метою підвищення їх енергоефективності за рахунок більш точного аналізу процесів, що протікають у системі.

#### Перелік посилань

1. Pechenik N. Sensorless control of water supply pump based on neural network estimation / N. Pechenik, O. Kiselychnyk, S. Buryan, D. Petukhova // Electrotechnic and Computer Systems. Scientific and technical journal. – Odesa, 2011. – №03 (79). – pp. 462-466.
2. Бур'ян С.О. Дослідження роботи електромеханічної системи автоматизації насосної установки на основі пакету SimHydraulics / С.О. Бур'ян, М.В. Печеник, А.І. Бабарова // Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 11-12 квітня 2019 р. – Кременчук, КрНУ, 2019. – с. 10-12.
3. Бур'ян С.О. Дослідження роботи електромеханічної системи автоматизації послідовно з'єднаних насосних установок в пакеті SIMHYDRAULICS / С.О. Бур'ян, М.В. Печеник, Г.Ю. Землянухіна, А.І. Бабарова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 204 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2019. – С. 84-86.
4. Leonhard W. Control of Electrical Drives. Springer – Verlag, Berlin: 1996. – 420 p.
5. Бур'ян С.О. Дослідження енергоефективності електромеханічної системи насосного комплексу з врахуванням плавної зміни параметрів гідромережі / М.В. Печеник, С.О. Бур'ян, //Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. Тематичний випуск: Проблеми автоматизованого електроприводу. – Київ: «Техніка». – 2014. – №15(91). – С. 162-164.